

DRAKONTOS

José Enrique Campillo Álvarez



# Homo climaticus

El clima nos hizo humanos



CRÍTICA

## Índice

Portada

Sinopsis

Portadilla

Dedicatoria

Introducción

1. El origen de todo: la energía
2. La formación del universo: la materia
3. El planeta Tierra
4. ¿Qué es la vida?
5. El origen de la vida
6. El imperio de las bacterias
7. La vida pluricelular
8. La puerta hacia la humanidad
9. Los primates
10. Los homínidos
11. Los simios sin bosques
12. El cerebro que surgió del frío
13. El cerebro caprichoso y tragón
14. Cómo parir y criar un cerebro grande
15. Homo sapiens
16. El protagonismo de Eva
17. Homo sapiens sapiens
18. La consciencia
19. El universo inventado
20. La evolución cultural
21. Pintores, chamanes y escultores
22. Los ganaderos megalíticos
23. Los grandes imperios
24. El nuevo orden y las Fuerzas de la Vida
25. Veinte siglos de altibajos climáticos
26. Presente y futuro

Bibliografía

Notas

Créditos

**Gracias por adquirir este eBook**

Visita [Planetadelibros.com](http://Planetadelibros.com) y descubre una nueva forma de disfrutar de la lectura

---

**¡Regístrate y accede a contenidos exclusivos!**

Primeros capítulos

Fragmentos de próximas publicaciones

Clubs de lectura con los autores

Concursos, sorteos y promociones

Participa en presentaciones de libros

**PlanetadeLibros**

---

Comparte tu opinión en la ficha del libro  
y en nuestras redes sociales:



**Explora**

**Descubre**

**Comparte**

## SINOPSIS

Un recorrido desde el Big Bang a la actualidad para comprender cómo el clima condicionó la evolución de la vida y de nuestra especie. Un libro de divulgación científica que analiza los logros evolutivos, culturales y sociales de los seres humanos desde su aparición hasta el presente.

Junto a esta imbricación del hombre con la naturaleza que lo rodea, en la obra adquiere especial relevancia la cuestión de los cambios climáticos del Paleoceno y el Holoceno (y sus distintas fases), hecho que, según el autor, ha condicionado la evolución del hombre, diferenciándolo de otros seres vivos, principalmente mediante el desarrollo de un cerebro de mayor tamaño.

A lo largo del libro se justifica esta relación entre la climatología y la fisiología: la primera resulta determinante al poner a prueba a los seres en una alternancia de ciclos climáticos fríos y cálidos que obligan a desarrollar adaptaciones fisiológicas para poder sobrevivir y cumplir con lo que el autor llama las fuerzas de la vida.

Estas fuerzas de la vida (nutrición, reproducción, defensa y socialización) condicionan toda la evolución humana: la necesidad de cumplir estas funciones es lo que obligó a los seres humanos (así como a otros seres vivos) a evolucionar mediante las mutaciones genéticas y la adquisición de cultura que fueron pasando de una generación a otra hasta hoy.

# HOMO CLIMATICUS

El clima nos hizo humanos

José Enrique Campillo Álvarez

Director:  
JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON

**CRÍTICA**  
BARCELONA

*A mi nieto y ahijado, Javier*

## Introducción

Hay cuestiones que atosigan a la mayoría de las personas en algún momento de su vida. Ya se imagina las preguntas a las que me refiero: las que han conmovido a los seres humanos desde siempre. Enuncio unas cuantas a modo de ejemplo. Cada cual puede añadir las suyas propias. ¿Qué es la vida? ¿Qué sentido tiene el vivir? ¿Quiénes somos? ¿Por qué nos morimos? ¿Hay vida después de la muerte? ¿Hay un ser o seres superiores creadores de todo lo que existe? ¿Por qué somos como somos? ¿Estamos sujetos a un destino inexorable o gozamos de libertad? ¿Hacia dónde vamos? ¿Cuál es el futuro que nos aguarda? ¿Cómo podemos estar más sanos y vivir más y mejor? ¿Cómo podemos ser más felices? Hay muchas más, quien esté interesado puede incluso explorar en Internet; es uno de los temas estrella.

Se ha intentado responder, en todo o en parte, a estas cuestiones mediante diferentes disciplinas y con variadas metodologías como la filosofía, la religión, la historia, la ciencia, la introspección o la espiritualidad. Pero desde hace unos pocos años se viene utilizando para este menester una nueva herramienta. Se trata de la llamada Historia Total, Gran Historia o *Big History*, como la denominó el historiador David Christian, quien acuñó el término y la presentó al mundo en 2004 mediante un primer libro: *Maps of Time: An Introduction to Big History*. La idea general es que el ser humano y sus logros culturales y sociales están imbricados con la naturaleza. Por eso el fenómeno humano no se puede estudiar de una manera aislada, como si no tuviera nada que ver con el resto del universo, de su espacio, de su tiempo, de todas sus dimensiones y fuerzas. La versión española del libro de David Christian la publicó Crítica en 2005 con el título de *Mapas del tiempo. Introducción a la «Gran Historia»*. Recientemente esta misma editorial ha publicado *El viaje más improbable* (2017), un libro del geólogo Walter Alvarez, uno de los creadores de la teoría de la gran extinción que afectó a los dinosaurios, donde se analiza la Gran Historia desde una perspectiva



geológica. Este autor, en colaboración con sus alumnos, ha elaborado una cronología infográfica de la Gran Historia que se puede consultar en la página web *ChronoZoom.com*.

La Gran Historia aborda nuestra historia como un todo. Incluye los aspectos astronómicos, geológicos, climáticos, biológicos, paleoantropológicos, históricos y culturales, entre otros, que tuvieron que ver en algún momento con lo que hoy somos. Analiza nuestro más amplio pasado, intenta explicar nuestro presente e imagina nuestro futuro. Su método consiste en examinar diferentes escalas de tiempo, desde el Big Bang hasta el futuro, y utiliza para tal fin un acercamiento multidisciplinario. Recurre a numerosas especialidades humanísticas y científicas: historia, biología, física, astronomía, geología, climatología, prehistoria, antropología, medicina, demografía, ecología, etc. En la actualidad, la Gran Historia es una asignatura en muchas universidades, y en casi doscientos institutos de enseñanza de varios países, sobre todo en Estados Unidos y en Australia. También se imparten cursos a través de Internet. Cada vez se publican más obras sobre este asunto. Incluso existe una asociación internacional que promueve numerosas actividades sobre la Gran Historia. En parte están patrocinadas por Bill Gates, quien ha creado una fundación dotada de cuantiosos medios para este fin: The Big History Project.

En este libro se intenta abordar una nueva visión de la Gran Historia de la Humanidad. Para ello se han cruzado dos puntos de vista muy diferentes: la fisiología y la climatología. A veces, cuando se ponen en contacto polos de carga diferente saltan chispas. Estas nos proporcionan la luz que nos permite explorar algunos rincones del conocimiento con una nueva perspectiva. Espero que las chispas que broten en las páginas siguientes proporcionen una cierta originalidad respecto a los planteamientos precedentes y ayuden a comprender mejor el mundo y a nosotros mismos.

¿Por qué la fisiología? Yo no soy historiador, solo un médico que ha dedicado parte de su vida a la enseñanza e investigación de la fisiología; ya saben, es la ciencia que estudia los aspectos físicos, químicos, biológicos y estructurales de la vida. Así que ahí va a encontrar la justificación al sesgo que imprimen tales antecedentes a la versión de la Gran Historia que aquí le ofrezco. Se analizarán algunos de los cambios fisiológicos experimentados por

la vida en general y por el ser humano en particular a lo largo de los miles de millones de años de evolución. Un elemento que va a estar presente a lo largo de todo el relato son las variaciones climáticas que han ocurrido desde la formación del planeta hasta nuestros días. El clima es el mecanismo que dispensa y controla la cantidad de energía y de materia que recibimos los seres vivos que hemos evolucionado en el planeta Tierra.

Se parte de la base de que todo el impulso evolutivo que ha conducido desde la primera bacteria que surgió en los océanos terrestres hace tres mil quinientos millones de años hasta el último niño que esté naciendo en estos momentos proviene de dos elementos que han actuado durante los miles de millones de años de historia evolutiva: la energía y lo que denominaremos las Fuerzas de la Vida.

En primer lugar debemos considerar el aporte de energía, sin la cual la vida ni existiría ni evolucionaría. Toda la energía que se recibe, proceda de donde proceda (solar, cósmica, geotérmica o gravitacional), se elabora y se dispensa a los seres vivos en las dosis adecuadas a través del aire (atmósfera) y del agua (hidrosfera) de la Tierra. Y las variaciones energéticas de la atmósfera y la hidrosfera es lo que constituyen el clima. A lo largo de los tres mil quinientos millones de años de vida se han producido grandes variaciones en el clima de la Tierra y, por tanto, cambios en la disponibilidad de materia y de energía para la vida. El planeta ha sufrido desde glaciaciones en las cuales todo él parecía una bola de hielo hasta calentamientos globales donde se llegaron a alcanzar temperaturas en el aire y el agua del planeta que incluso pusieron en peligro a la propia vida. Estas amplias oscilaciones del aporte energético tuvieron gran repercusión en el desarrollo de la vida, incluidos la evolución y la historia de los seres humanos.

En segundo lugar tenemos que tener en cuenta que sea cual sea el ser vivo que consideremos, ya sea bacteria, planta, insecto o mamífero, todos ellos tienen obligatoriamente que cumplir cuatro requisitos fisiológicos vitales, a los que denominaremos las Fuerzas de la Vida; así, con mayúsculas. Todos los organismos tienen que alimentarse, reproducirse, asociarse y defenderse de las amenazas físicas o biológicas que pueden poner en riesgo su supervivencia o su capacidad reproductora. Y, a lo largo de los miles de millones de años de

evolución, la mayor o menor facilidad para cumplir con estas obligaciones dependió en gran medida de los acontecimientos climáticos que le tocó vivir a las diferentes formas de vida.

El interés por el estudio de la influencia del clima sobre la humanidad, el llamado «determinismo climático», es un asunto que se ha tratado desde la Grecia clásica hasta nuestros días. Ya Hipócrates, en su libro *Sobre aires, aguas y lugares*, y Heródoto, en sus *Historias*, abordaron este asunto con detalle. Hoy, numerosas evidencias científicas muestran que el clima condiciona la vida presente y ha determinado su evolución pasada. En los últimos años este interés se ha visto acrecentado a causa de la preocupación mundial por el llamado «cambio climático antropogénico» que nos amenaza. De hecho, el clima se ha convertido hoy en la piedra angular que configura nuestra forma de vida, la política internacional, la economía global y las teorías sociales. Es difícil encontrar hoy a alguien que no considere que las cuestiones ambientales y climáticas sean elementos esenciales para la salud y la felicidad de nuestra sociedad.

En las páginas que siguen les invito a un viaje a través de nuestro pasado, presente y futuro para intentar comprender cómo la vida fue evolucionando para encontrar las formas más eficaces posibles para cumplir con los imperativos de las Fuerzas de la Vida y cómo el clima condicionó (y lo va a seguir haciendo) los cambios en la fisiología de las diferentes especies en general y de la nuestra en particular. Analizaremos cómo el clima también determinó gran parte de la historia, cómo está condicionando nuestro presente y marcará sin duda la senda que habremos de recorrer en nuestro futuro. También aprenderemos que gran parte de nuestra salud y nuestra felicidad hoy están condicionadas por los cambios que los organismos de nuestros ancestros tuvieron que experimentar para adaptarse a las condiciones climáticas que les tocó vivir en cada etapa de nuestra evolución.

En la tarea de redactar y pulir este texto he recibido muchas valiosas ayudas. Destaco el trabajo de corrección de la profesora de Historia, Victoria Cuevas Fernández. También agradezco los trabajos de corrección y edición de la editorial Crítica y los esfuerzos de Silvia Bastos y todo su equipo de la agencia literaria para que esta publicación viera la luz. Se dice que todos caminamos a lomos de gigantes. Yo quiero agradecer a toda esa pléyade de

gigantes en diversas ramas del saber a los que me he subido para poder vislumbrar las ideas esenciales que sustentan esta obra. A todos, unos y otros, muchas gracias.

## El origen de todo: la energía

Solo existe la energía. Es el impulso que dio origen a la vida y que ha determinado su evolución. Todo en el universo es energía y sus transformaciones. Nosotros, en consecuencia, también somos energía. La salud, la enfermedad, la felicidad o la muerte no son ni más ni menos que el resultado de variaciones en las circunstancias energéticas de nuestro organismo. Por eso vamos a introducir en este primer capítulo algunas nociones básicas acerca de la energía, de sus transformaciones y de su implicación en nuestra vida, salud y felicidad.

Nadie sabe a ciencia cierta cuándo y dónde surgió la energía que formó y gobierna todo el universo, incluidos a nosotros mismos. Pero dado que todo lo que existe es consecuencia de esa misteriosa entidad, en el principio de todo tuvo que estar la energía. Podemos aceptar el relato de la Biblia según el cual Dios, en el primer día de la Creación, separó la luz (la energía) de las tinieblas. También podemos considerar las alternativas de otras religiones. Desde la perspectiva científica, la hipótesis más aceptada hoy día, avalada por pruebas físicas y astronómicas, es que toda la energía que compone el universo surgió de manera instantánea hace unos doce mil quinientos millones de años.

Sostienen los científicos que toda la energía se concentraba en un punto infinitamente denso, infinitamente energético e infinitamente ordenado, suspendido en medio de la nada infinita. Este punto infinitamente energético carecía de dimensiones, no era ni alto, ni ancho, ni largo, ni joven, ni viejo. Los físicos, a la espera de encontrar algo mejor, lo denominan una «singularidad espacio temporal». Fuera de este mínimo punto infinitamente pequeño, infinitamente energético e infinitamente ordenado no había nada. No

existía el espacio, ni lleno ni vacío, ni tampoco el tiempo, no había ni un antes ni un después; en la singularidad no existía pasado, ni futuro. Fuera de esta ínfima mota de energía no había nada de nada.

En el siglo pasado, el astrofísico y jesuita belga Georges Lemaître, propuso que esta acumulación inconmensurable de energía se liberó hace más de doce mil millones de años en un estallido colosal: la gran explosión, el Big Bang. La energía proyectada y la materia que se iba creando fueron ocupando un espacio que antes no existía y dotándose de una duración, ya que el tiempo se iba configurando a la misma vez. Todo lo que existe en el universo, el espacio, el tiempo, una roca, el agua del mar o usted y yo, somos productos de esa liberación explosiva de energía y de sus sucesivas transformaciones a lo largo de miles de millones de años.

Hay algunos físicos que discrepan de esta génesis. Por ejemplo, John Mather, astrofísico de la NASA y premio Nobel, declara que el universo no tiene centro, no tiene bordes ni tiene límites. No tuvo un primer momento. No empezó con un «bang», simplemente no empezó. Mather proclama que no hubo ningún momento cero, porque debería ser un instante de densidad infinita, lo cual no es posible. Este científico argumenta que toda la física tiene que ver con procesos. Debe haber algo que ya exista y que se transforme en algo diferente. El astrofísico insiste: mediante la física que hoy conocemos no podemos decir que no había nada y después había algo.

Hay muchas más opciones intermedias entre estas dos extremas que acabo de exponer. Incluso la cuestión podría ser aún mucho más compleja. Solo un dato. Resulta que según demuestran todas las medidas, ecuaciones matemáticas y observaciones astronómicas, alrededor del setenta por ciento del contenido energético (o puede que más) del universo consiste en la llamada energía oscura, que ejerce un gran efecto sobre la velocidad de la expansión del universo, pero sobre cuya naturaleza última se desconoce casi todo.

LAS FUERZAS FUNDAMENTALES DEL UNIVERSO

La energía primigenia, viniera de donde viniese, se manifestó desde los primeros instantes en las cuatro fuerzas fundamentales que gobiernan el funcionamiento de todo lo que existe vivo o inanimado. Los físicos afirman que la más ínfima variación en los valores de estas fuerzas hubiera hecho imposible la vida. El equilibrio del universo, nuestra salud y nuestra felicidad dependen del adecuado balance entre estas fuerzas, como se irá detallando en las próximas páginas.

### *1. La fuerza gravitatoria*

Es la que hace que alguien se caiga al suelo cuando tropieza. Es la fuerza de atracción que una masa ejerce sobre otra, y afecta a todos los cuerpos, sea cual sea su tamaño y la distancia a la que se encuentren. La gravedad es una fuerza muy débil, que opera en un solo sentido (solo atrae, pero no repele), pero su alcance es infinito. Y todos podemos percibir con claridad sus efectos, por ejemplo, cuando vemos subir la marea en la playa por la atracción que ejerce la Luna sobre las moléculas del agua. En enero de 2016 un grupo numeroso de científicos logró la proeza de detectar por primera vez en la historia las ondas gravitacionales, las responsables de la gravedad.

Todas nuestras estructuras, nuestras células, nuestras moléculas están sometidas a esta fuerza gravitacional, pero apenas comenzamos a entrever sus efectos para nuestra vida y nuestra salud, como veremos más adelante.

### *2. La fuerza electromagnética*

Esta fuerza poderosa es el resultado de la unificación de otras dos formas de manifestación de la energía primigenia: la electricidad y el magnetismo. Es mucho más potente que la fuerza gravitatoria y opera en los dos sentidos: atracción y repulsión. Se manifiesta en fenómenos como la electricidad, la luz, los rayos X, las ondas de radio, los imanes. Cuando usted escucha la radio mientras desayuna sepa que lo consigue gracias a esta fuerza creada tras el Big Bang inicial. También calienta usted su café en un horno que utiliza las microondas, que son los últimos ecos energéticos de esa gran explosión.

En los seres vivos las fuerzas electromagnéticas se encargan de mantener unidos los átomos en las moléculas. Son responsables de la mayor parte de las reacciones bioquímicas y del funcionamiento de todas nuestras células y en especial de nuestro cerebro y nuestros músculos. Usted, paciente lector, está ahora interpretando estos extraños signos negros sobre fondo blanco y se están creando en su cerebro sensaciones diversas según lee, porque sus células cerebrales funcionan y transmiten información mediante mecanismos electromagnéticos. Por ejemplo, cuando a usted le hacen un electrocardiograma lo que el aparato detecta y registra es la actividad electromagnética de su corazón. Nosotros somos, en gran parte, seres electromagnéticos y ya veremos cómo la vida es esencialmente electricidad organizada. Gran parte de nuestra salud y nuestra felicidad depende del equilibrio adecuado de esta fuerza electromagnética en nuestro organismo.

### *3. La fuerza nuclear fuerte*

Es la que proporciona la energía que mantiene unidos los componentes de los núcleos atómicos: protones y neutrones. Su alcance se limita a las dimensiones de un átomo, pero es la más intensa de todas las fuerzas. Por esta razón es tan difícil de romper (desintegrar) un átomo. Para obtener esta energía con fines prácticos, ya sea matar gente con una bomba, producir calor mediante una central nuclear o destruir células tumorales, hay que romper el átomo. Se utiliza el átomo de uranio y el de otros elementos denominados radioactivos a causa de su inestabilidad, ya que pueden romperse (desintegrarse) de manera espontánea y liberar partículas y energía, que es lo que constituye la radioactividad.

### *4. La fuerza nuclear débil*

Es una fuerza de muy poca intensidad y escaso alcance. No se conocen muy bien sus manifestaciones, ni su misión en el universo y en los seres vivos. Pero ahí está. Algún día nos sorprenderán sus funciones y sus aplicaciones prácticas.



## TODO LO QUE EXISTE ES ENERGÍA

Todo lo que existe procede de esa energía primordial liberada en el Big Bang (o como ocurriera): las galaxias, las estrellas, los planetas, los agujeros negros y todas las estructuras que pueblan el universo, el Sol, la Luna, nuestro planeta Tierra, las montañas, los mares, cada roca, cada desierto que pisamos, todos los seres vivos, las bacterias, las plantas, los animales, usted y yo. Todo es energía, que es el componente esencial con el que se fabricó todo lo que existe en el universo que habitamos. Y no se haga ilusiones con la firmeza y consistencia de su cuerpo o el sillón en el que está sentado o la casa que lo cobija: la materia, como veremos, no es más que un enorme vacío compuesto de energía condensada.

La energía permite que todo funcione. Las estrellas brillan por la energía que se libera en sus hornos termonucleares. La Tierra se alimenta de la energía que recibe del Sol y de la que emana de su propio interior incandescente. Un escarabajo se mueve porque transforma en trabajo muscular la energía de su metabolismo. Y usted es capaz de procesar la información que le llega a través de estas letras porque las neuronas de su cerebro producen energía al quemar la glucosa del café con leche que se acaba de tomar.

Ningún físico sabe qué es exactamente la energía. Su nombre procede de la Grecia clásica. Era el término que empleaban los filósofos clásicos para designar la actividad, la fuerza de acción, lo que todo lo mueve. Es una magnitud abstracta, no es un estado físico real, ni nada que se pueda ver, tocar u oler. Es lo único que existía al principio de todo, y todo lo que existe es consecuencia de su efecto, pero la energía solo podemos presentirla a través de sus diversas manifestaciones (calor, luz, etc.). En cada caso, a la energía responsable del fenómeno observado le damos un nombre específico (calorífica, luminosa, etc.), aunque todos los tipos de energía derivan de las cuatro fuerzas fundamentales ya descritas.

La energía que hace moverse nuestro coche es la mecánica. La que permite que dos imanes se atraigan, que exista luz eléctrica o que podamos escuchar la radio o ver la televisión es la electromagnética. La energía que permite que algo esté caliente y hasta pueda quemarnos es la térmica. La que ocasiona que caigamos al suelo cuando nos tropezamos es la gravitatoria. Lo

que permite que los ácidos de una batería reaccionen y enciendan una bombilla es la energía química, que es también la que mantiene los miles de reacciones químicas que permiten la vida de los seres vivos. Y así podríamos continuar ensartando ejemplos, aunque con los expuestos ya podemos tener una idea de la omnipresencia de la energía en todos los fenómenos vivos o inertes del universo.

## LA ENERGÍA ES ETERNA

La energía nunca se agota, solo se transforma en otras formas de energía. Hoy existe la misma cantidad de energía que había en el momento de la creación del universo, hace miles de millones de años, y seguirá siendo la misma cuando todo desaparezca. La energía no puede destruirse, solo se va transformando de unas formas a otras. Veamos algunos ejemplos.

Si damos una patada a un balón, este se eleva gracias a que la energía liberada por la contracción de nuestros músculos se ha transformado en energía cinética (movimiento) de la pelota. La pelota sube mientras consume esa fuerza cinética (que supera a la gravitacional). Cuando el impulso cinético es menor que la energía gravitacional, la pelota deja de subir y comienza a bajar, en este caso por efecto de la gravedad. Cuando la pelota cae al suelo, al ser un elemento elástico, la energía gravitatoria se transforma en energía de deformación de la estructura de la pelota. Esta energía elástica vuelve a lanzar la pelota hacia arriba, aunque no asciende tanto como la primera vez porque parte de la fuerza la ha absorbido el suelo, que se calienta un poco. La energía de la patada al balón se va transformando en sucesivas formas de energía hasta que queda quieto en el suelo. Toda la energía que se ha liberado en los sucesivos botes del balón se ha disipado en el universo en forma de calor.

El Sol inunda nuestro planeta de energía radiante, y esta se transforma en energía calorífica y hace subir la temperatura del agua del mar y de los lagos. Esto que llamamos incremento de temperatura es solo un aumento de la energía cinética de las moléculas del agua, que se mueven a mayor velocidad cuanto más energía se les aporta. Algunas moléculas de agua se agitan tanto que llegan a escapar del líquido y se transforman en vapor, que asciende y forma las nubes. Cuando estas se enfrían, las moléculas de agua pierden movilidad,

el vapor se condensa y las gotas caen en forma de lluvia. Esa agua se retiene en una presa que acumula una gran masa de líquido con una gran cantidad de energía potencial gravitatoria. Cuando los técnicos permiten que el agua se precipite con fuerza sobre un artilugio adecuado, su energía potencial puede transformarse en energía mecánica para mover una noria o un molino o una turbina, que transforma su energía mecánica en eléctrica. Pero con la electricidad también podemos cocinar unos alimentos (aportarles calor). Cuando los ingerimos, nuestro organismo los transforma mediante complejas reacciones bioquímicas en nuestra propia energía, que nos permite vivir. Vemos así cómo la energía del Sol se va transformando en las sucesivas formas de energía que permiten la vida.

Podríamos completar todas las páginas de este libro con ejemplos similares, pero de momento son suficientes estos dos para sustentar la principal propiedad de la energía: su conservación. Así lo predice la primera ley de la termodinámica, enunciada por Julius Robert von Mayer en 1841. Es el principio de la conservación de la energía: esta no se crea ni se destruye, solo se transforma. Es decir, la energía es indestructible, es eterna, existe siempre y para siempre, y por ello lo único posible es que se transforme en otras formas de energía.

#### LAS TRANSFORMACIONES DE ENERGÍA SON IRREVERSIBLES

El proceso de transformación de la energía es irreversible, es decir, la energía disipada en forma de calor cuando arde una cerilla nunca puede reutilizarse en su totalidad para volver a encender el fósforo. La energía siempre va desde las zonas más energéticas hacia las que tienen menos, nunca se puede dar el camino inverso de manera espontánea. Para que pueda producir trabajo o calor, la energía necesita que exista un gradiente, una pendiente, alguna forma de diferencia entre un estado inicial y otro final. Para que sea eficaz, la energía tiene que ir «cuesta abajo». La energía gravitacional contenida en el agua retenida en una presa (máximo grado de orden) es eficaz en producir trabajo cuando se vierte y forma un torrente que abandona la base de la presa (máximo grado de desorden). Si quisiéramos reintroducir en la presa toda el

agua que se ha vertido por los desagües habría que aportar una enorme cantidad de energía, mucha más de la que se ha liberado al caer. El estado más ordenado es el más energético; el desorden implica liberación de energía.

Cuando conducimos nuestro coche, la energía liberada por la combustión de la gasolina se transforma en energía de movimiento que permite girar las ruedas, en energía eléctrica que hace funcionar la radio y el navegador GPS, en el frío o el calor del climatizador, etc. Pero al final toda la energía liberada en la combustión de la gasolina se dispersa al ambiente en la estela de calor que deja el vehículo a su paso. Además, el movimiento produce rozamiento del coche con el aire y de las ruedas con el suelo y estas fricciones generan más energía térmica que también se dispersa por el universo. Según la primera ley de la termodinámica la totalidad de la energía térmica disipada en forma de calor es idéntica a la energía contenida en la gasolina que se ha quemado. Pero algo ha ocurrido. Es imposible volver a concentrar toda esa energía térmica dispersada para lograr que el automóvil se mueva.

## LA ENERGÍA CREA ORDEN

¿Por qué es esencial la energía para la vida? La irreversibilidad de las transformaciones de energía se debe a que, además de la disipación de esta, ha sucedido algo esencial: ha aumentado el grado de desorden del sistema, ha aumentado la entropía. La segunda ley de la termodinámica predice este comportamiento. Establece que todos los procesos físicos y químicos que existen en el universo (incluido el propio Big Bang) se desarrollan en la dirección en la que la dispersión de la energía y el grado de desorden (muchísima entropía) aumenten lo más posible. Todos los procesos reales son irreversibles, porque una forma de energía no puede ser convertida íntegramente en otra sin que se produzca alguna pérdida, dispersión o disipación. Y esta pérdida se acompaña siempre de un aumento del grado de desorden del sistema. La vida es el sistema más ordenado (poca entropía) que existe en lo que conocemos del universo.

Unos cristales de sal común son una estructura muy ordenada y, en consecuencia, almacenan energía. Si disolvemos el cristal en el agua, las moléculas de cloruro sódico que componen el cristal se desorganizan en el

seno del líquido y, en consecuencia, liberan la energía que almacenan (aumenta la entropía o desorden del sistema). Esta es la razón para echar sal en las carreteras heladas. Al disolverse en agua, la sal da lugar a un sistema más desordenado y libera calor. Nunca las moléculas de cloruro sódico disueltas en agua volverán espontáneamente, por sus propios medios, al estado inicial. Otra cosa es si le aportamos a esa solución de sal una energía externa. Colocamos el recipiente con la sal disuelta sobre una fuente de calor, evaporamos toda el agua y entonces, con esa energía aportada, el sistema recupera su orden y su estructura cristalina.

La tendencia espontánea de cualquier sistema, incluido el universo, es a la disipación de la energía y al aumento de su grado de desorden. Y este proceso es irreversible de manera espontánea. Todo organismo vivo es un sistema muy ordenado, con muy baja entropía. Como veremos más adelante, el estado de máxima entropía, es decir, el máximo desorden al que acabamos llegando todos tarde o temprano, es la muerte.

## ORDEN, SALUD Y FELICIDAD

Usted puede percibir los flujos de energía de su organismo que le permiten estar vivo (y sentirse vivo) por el procedimiento simple de constatar que su cuerpo está caliente. Es como comprobar que el motor de su coche funciona verificando con la palma de la mano la temperatura de la chapa que cubre el motor. Esto significa que usted está transformando grandes cantidades de energía en su interior y disipándola al universo en forma de calor. Los alimentos y el oxígeno los convertimos en energía de nuestro propio organismo gracias a un conjunto de miles de procesos que ocurren en nuestras células (metabolismo).

Nuestro organismo es una estructura energética, ordenada y muy compleja, en la que cada uno de los billones de elementos que lo componen (átomos, moléculas, células, tejidos y órganos) están debidamente ordenados y contienen la información precisa para desempeñar su función y otorgarnos ese atributo maravilloso que es la vida. Se pueden poner en un tubo de ensayo el agua, los iones y todas las moléculas que componen un organismo, en las proporciones correctas y a la temperatura, el pH (acidez) y la presión

adecuados, y aquello será un líquido turbio de aspecto más o menos nauseabundo y de mal olor, pero no será un ser vivo. El orden lo establecen los enlaces, las conexiones, las interrelaciones energéticas, físicas o químicas entre las diferentes partes del sistema vivo y que se ajustan a un patrón y a una estructura definida. El orden, la baja entropía, define la vida.

El cuerpo humano sano es la maquinaria molecular más ordenada y compleja que existe, por lo tanto la entropía o grado de desorden de un cuerpo sano está en su estado más bajo posible. Al funcionamiento normal y energéticamente ordenado de esta compleja estructura es a lo que llamamos salud, que nos proporciona un estado de bienestar físico, mental y social.

#### DESORDEN, ENFERMEDAD Y MUERTE

El orden y los flujos de energía de nuestro organismo se pueden alterar por numerosas circunstancias. Cuando esto sucede se produce un aumento de la entropía, un mayor grado de desorden, que es lo que denominamos enfermedad.

Puede ocurrir, por ejemplo, que nos invadan microorganismos que no deberían estar en nuestro interior. Esto crea una alteración del orden normal: las llamadas enfermedades infecciosas o parasitarias. A veces, a consecuencia de un golpe o de una herida, se rompen estructuras de nuestro organismo que deberían mantener su integridad para proporcionarnos orden estructural y una función normal. Es el desorden que nos produce un corte con un cuchillo o la fractura de un hueso. Las arterias se pueden atascar por un trombo o por un pelotón de grasa que interrumpe el flujo ordenado de sangre, lo que ocasiona el grave desorden que supone un infarto de miocardio o un ictus cerebral. Podemos alterar el flujo normal de energía en nuestro organismo por la ingestión excesiva de alimentos que nos ocasiona ese desorden que es la obesidad y las enfermedades metabólicas y cardiovasculares. O, por el contrario, podemos sufrir deficiencias de nutrientes que desencadenan el desorden de la falta de energía, un adelgazamiento excesivo o el desorden carencial por la ausencia en la dieta de algún nutriente (vitamina o mineral) que es indispensable para mantener nuestros flujos energéticos y nuestra estructura. Puede alterarse el normal crecimiento de determinadas células de

nuestro organismo que se tornan independientes y agresivas y provocan el devastador e invasivo desorden que es el cáncer. Y así sucesivamente podríamos citar todas aquellas alteraciones del orden de nuestro organismo y que ocasionan todas las enfermedades que podemos padecer.

La enfermedad es siempre la consecuencia de un desorden energético parcial o total del organismo. El tratamiento eficaz solo se consigue con el restablecimiento del orden perdido. Si nos fijamos en el aspecto termodinámico, también se observa con claridad que la muerte es lo opuesto a la vida. Uno de los signos más llamativos de un cadáver es su frialdad. Se han detenido los procesos energéticos que permitían acumular energía y así crear orden y oponerse al caos. El cadáver es una estructura desordenada, de elevada entropía, que se va desintegrando en el caos energético del universo.

## ENERGÍA, EVOLUCIÓN E HISTORIA

Así pues, la energía es esencial para el fenómeno que denominamos vida. Y toda la evolución de la vida en el planeta Tierra, desde la bacteria más primitiva hace tres mil millones de años hasta el ser humano de hoy, solo supone la búsqueda de mecanismos cada vez más eficaces para la obtención, almacenamiento y utilización de la energía. El sistema universal que sustenta este proceso extraordinario, por el momento, es la selección natural. La base de este mecanismo de evolución es la mutación aleatoria que se produce en la transmisión de la información genética a los descendientes. La mayoría de esas mutaciones son desfavorables y desaparecen, pero de vez en cuando surge alguna que proporciona alguna ventaja, por pequeña que sea, para la gestión de la energía por un determinado ser vivo. Entonces esa superioridad persiste. Los genes y la energía han ido siempre mano a mano a lo largo de toda la evolución biológica. Ello es el fundamento, como veremos más adelante, de la nueva síntesis evolutiva: la bioenergética de la evolución biológica. Esta nueva visión se sustenta en los principios de termodinámica que se han expuesto en este capítulo.

Toda la energía que reciben los organismos, proceda del espacio o de la propia Tierra, está modulada y dispensada por el planeta. Por eso los cambios en el aporte energético local o global que afectan a una o varias especies,

están determinados por los cambios climáticos locales o globales. Las plantas desaparecen si hay frío, sequía o la luz del sol se interrumpe por espesas y persistentes nubes volcánicas. Esto afecta a los animales herbívoros, que reducen sus poblaciones, y también lo padecen los carnívoros, que obtienen la energía alimentándose de su carne. Lo contrario sucede cuando el clima es cálido y húmedo y la atmósfera limpia permite que los fotones solares lleguen en abundancia a las plantas. El clima es un elemento esencial en la nueva síntesis energética de la evolución.

Con la llegada de la especie humana, la relación entre vida y energía experimentó un cambio revolucionario. Hasta entonces todos los seres vivos procesaban la energía en el interior de su organismo mediante el metabolismo. Es un proceso que permite la obtención, almacenamiento y gasto de energía mediante sistemas enzimáticos específicos. Pero los seres humanos, además de disfrutar de estas ventajas metabólicas, desarrollaron una capacidad extraordinaria que no existe en ningún otro ser vivo: el procesamiento extrasomático de la energía. Los humanos lograron producir, utilizar y almacenar energía a gran escala fuera de su organismo. La cuestión comenzó con la domesticación del fuego y continuó hasta las centrales nucleares. Esta capacidad extrasomática de procesar la energía sustentó una forma alternativa de evolución de la especie humana, de la que hablaremos con detalle: la evolución cultural, que permitió la cultura y la civilización, y dio paso a la historia.



## La formación del universo, la materia

La materia es energía condensada. La unidad básica de la materia son los átomos, que son espacios vacíos, solo rellenos de alguna forma desconocida de energía. La masa que forma todo en el universo y en nuestro propio organismo está vacía: la dureza y resistencia de las cosas es pura ilusión. Además, los átomos son inmortales. Todos los átomos que forman nuestro cuerpo vinieron de las estrellas y ya fueron usados con anterioridad por algo o por alguien. Vamos a analizar estas inquietantes cuestiones relacionadas con la materia y su relación con nuestra salud y nuestra felicidad.

Según los dictámenes de la física cuántica, la materia no es ni más ni menos que energía condensada. Comprendo que es un concepto que resulta difícil de asumir. Usted se toca con sus manos y comprueba que no es un ente energético y fantasmal, sino que palpa una apariencia de dureza; pero solo es eso, apariencia. Como demostró Einstein en el siglo pasado, la masa es energía. Y para que no quedara dudas lo formuló matemáticamente en su famosa ecuación  $E=mc^2$ . Es decir, la masa (m) es energía (E), ya que c, la velocidad de la luz, es una constante. La prueba práctica de esto la disfrutamos (salvo accidentes) en las centrales nucleares y la padecemos en las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki o en los accidentes de las centrales nucleares de Ucrania o de Fukushima.

En milésimas de segundo tras la Gran Explosión, la energía fue cuajando en entidades concretas de materia: las llamadas partículas elementales, que constituyen la urdimbre fundamental de la materia. La agrupación de varias partículas forma la estructura de los átomos. Para la moderna física cuántica, los átomos son vórtices de energía y materia que vibran de manera constante, como una peonza que gira e irradia energía.

Una de esas partículas que explican cómo la energía puede condensarse en materia es el llamado bosón de Higgs, estrella de los informativos en el año 2013, porque se logró verificar su existencia real en el acelerador de partículas del CERN. El bosón de Higgs es el responsable de que las partículas no sean solo energía y que adquieran esa propiedad que denominamos masa. Por ese efecto sobre la creación de masa, a este bosón se lo denominó «la partícula divina».

En menos de un minuto tras el Big Bang, el universo tenía ya un millón de miles de millones de kilómetros de anchura y continuaba su expansión vertiginosa. La elevada temperatura, de varios miles de millones de grados, permitía las reacciones de las partículas elementales entre sí para ir creando los átomos de los elementos más simples, como el hidrógeno, el helio y algo de litio. En los primeros quinientos mil años de existencia, este universo estaba formado por gigantescas nubes de hidrógeno, de helio y de partículas subatómicas, que constituyeron los ingredientes fundamentales a partir de los cuales se formarían las estrellas y las galaxias. A lo largo de los siguientes miles de millones de años, esas nubes se fueron concentrando por efecto de esa fuerza misteriosa que es la gravedad hasta condensarse en las primeras estrellas. En el seno de estas, la presión gravitatoria y las elevadas temperaturas desencadenaron las reacciones nucleares que son la causa de la energía de todas ellas, incluida nuestra favorita: el Sol, que no es más que un gigantesco horno termonuclear de hidrógeno y de helio. Estas reacciones termonucleares contrarrestan la gravedad, estabilizan los núcleos de las estrellas y evitan su colapso.

Los elementos hidrógeno y helio, mediante las condiciones de temperatura y de presión que se dieron en las estrellas, produjeron reacciones de nucleosíntesis y se fueron formando los átomos de todos los elementos: litio, carbono, hierro, azufre, cinc, oxígeno, etc., que constituyen toda la materia visible del universo y de la vida.

En un principio, estos elementos formaban nubes gaseosas interestelares, sujetas a remolinos violentos, lo que favorecía que los granos de materia chocaran entre sí y que, a lo largo de millones de años, se agruparan y se fueran haciendo cada vez mayores. En las colisiones, algunas de estas agrupaciones se fragmentaban, pero otras engrosaban su tamaño al asimilar la

nueva aportación de materia. Tras millones de años de remolinos cósmicos y colisiones fortuitas, se formaron los miles de millones de galaxias y de sistemas planetarios que se calcula que existen en el universo.

De este modo, las masas de materia continuaron alejándose del centro de la explosión. Son numerosas las pruebas físicas y astrofísicas que demuestran que habitamos un universo en expansión y que nuestra vida transcurre sobre un fragmento de materia, el planeta Tierra, que, como el resto de los cuerpos celestes, se aleja a gran velocidad de un mismo punto, impulsados por la inercia de la Gran Explosión.

Toda esta historia, por difícil de asimilar que resulte, está avalada por más de un siglo de investigación rigurosa, concuerda con un gran número de datos científicos y es compatible con casi todo lo que hoy se sabe de astronomía y de física. Otra cuestión es conocer de dónde vino esa primera mota infinita de energía; aunque fíjese en el doble error al utilizar la expresión «de dónde vino», cuando ya sabemos que en ese momento no existía el tiempo ni el espacio. Siempre estuvo ahí. No pudo llegar de ningún sitio porque no había ningún sitio de donde venir. ¡Qué lío!

#### LOS LADRILLOS DE LA MATERIA Y DE LA VIDA

Imagine que hacemos una foto de nuestro rostro con una cámara dotada de un *zoom* prodigioso. En la primera toma vemos nuestra cara completa y al incrementar el *zoom* ya solo apreciamos un trozo de piel. Si aumentamos la distancia focal, aparecería el pavimento de células que forman la piel, luego identificaríamos una sola célula y nos sorprendería comprobar que es todo un mundo compuesto de orgánulos complejos. A mayor aumento, veríamos que los orgánulos están formados por estructuras químicas complejas, las moléculas. Y si siguiéramos acercándonos, no tardaríamos en descubrir que las moléculas están formadas por racimos de unas estructuras esféricas de tamaño diverso. Habríamos llegado a las unidades básicas que forman la estructura de nuestro organismo, los átomos. Si repitiéramos el mismo proceso con un trozo de roca, obtendríamos un resultado parecido y encontraríamos los átomos que la forman.

La unidad básica de la materia es el átomo. Coja una regla de medir y constate la distancia que hay entre las dos líneas que marcan un milímetro: en ese espacio tan pequeño caben diez millones de átomos. Ya cinco siglos antes de Cristo, el filósofo griego Demócrito los definió como la unidad más pequeña de la materia que ya no podía dividirse en otras porciones; de ahí deriva la etimología griega de su nombre: *a* (sin) y *tomon* (parte). Pero desde hace un par de siglos a los átomos se los considera formados por tres elementos fundamentales: protones, neutrones y electrones. Hoy, la nueva física ha demostrado que dentro de cada átomo existen una gran variedad de partículas; algunas de ellas casi no tienen masa, son pura energía.

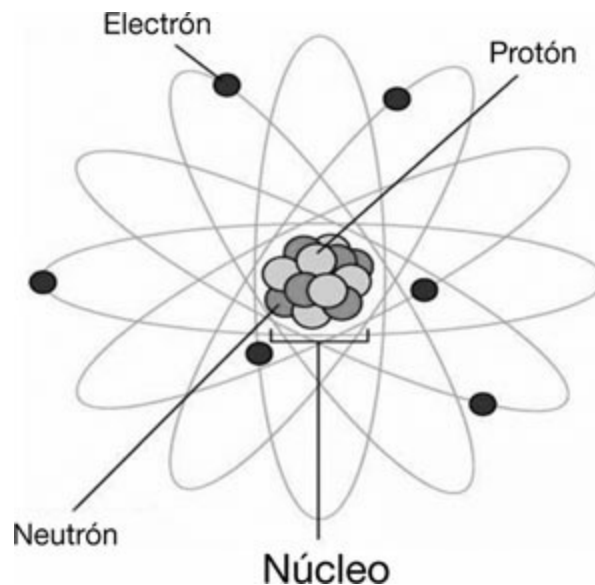


Figura 2.1. La estructura tradicional del átomo está formada por un núcleo con protones (carga positiva) y neutrones (carga neutra), rodeado de electrones (carga negativa) que orbitan aleatoriamente a su alrededor.

Gran parte de la energía primordial del Big Bang está condensada en los átomos que forman la materia. El Sol, las rocas y los mares, usted y yo, el libro que está leyendo, el sillón que lo acomoda y todo el aire que lo rodea están compuestos por átomos. Estas unidades fundamentales retienen, en las partículas que forman su estructura, una pequeñísima parte de la energía del universo. Así, los átomos que forman nuestro cuerpo proceden de las estrellas y albergan algo de la energía del Big Bang que es necesaria para sustentar nuestra vida.

Alrededor del núcleo del átomo giran los electrones como en un enjambre alucinante en el que estas partículas con carga negativa están a la vez en todas partes y en ninguna. Son como las aspas de un ventilador que, en pleno funcionamiento, parece que llenan por completo el espacio en torno al rotor central. Cuando un ventilador está parado, entre sus aspas hay espacios a través de los que puede pasar una pequeña pelota. Pero si arrojásemos una bola cuando está en funcionamiento, esta rebotaría como si hubiera impactado contra una pared.

Los átomos son espacios vacíos. Por ejemplo, vamos a situar el átomo más pequeño que existe, el de hidrógeno, en el espacio de un campo de fútbol. Su núcleo tendría el tamaño del balón y ocuparía el centro del campo. Su único electrón, del tamaño de una punta de un alfiler, estaría girando alrededor del núcleo a la distancia de las últimas gradas del estadio. Todo lo demás, el 99,999999 por ciento de la estructura de cualquier átomo, es espacio vacío.

A causa de esta estructura atómica, la masa que forma todo el universo está vacía: la dureza y resistencia de las cosas es pura ilusión. Nuestro propio organismo está vacío. Para una persona de unos cien kilogramos de peso se estima que su cuerpo está formado por  $0,98 \times 10^{28}$  núcleos atómicos y  $2,81 \times 10^{28}$  electrones. La mayor parte de los cien kilos de esa persona están contenidos en los núcleos de los átomos (el 99,9 por ciento). El volumen total que ocuparían los núcleos de todos nuestros átomos, si fuéramos capaces de eliminar todo el espacio vacío y estuvieran todos empaquetados y bien apretados, sería menor de  $5 \text{ mm}^3$  (una gota). La totalidad de los electrones apenas representarían el 0,1 por ciento del peso de esa persona. Es decir, si elimináramos por completo los espacios vacíos en nuestros átomos, toda nuestra masa apenas llenaría cuatro cucharitas de postre; claro que cada una de esas cucharitas pesaría 25 kilos. El cuerpo humano, como cualquier otro objeto animado o inanimado, es prácticamente un vacío por el que circulan a gran velocidad una nube de minúsculos electrones. Esa nube no es completamente uniforme, ya que se ve influenciada por la presencia de los núcleos atómicos distribuidos por todo el cuerpo.

A pesar de que nuestro cuerpo está esencialmente vacío y los muros de nuestra casa también, todos sabemos que si intentamos atravesar la pared de una habitación con nuestra cabeza nos daremos un buen golpe. Esto se debe a

que cuando acercamos el vacío de los átomos que componen nuestra superficie corporal al vacío de los átomos que forma la pared se establece una repulsión entre ellos. Esta repulsión electrostática es lo que percibimos como sensación de impenetrabilidad y si insistimos en superar esta barrera electrostática podemos hacernos un chichón en la cabeza. Ahora que está usted sentado leyendo este libro, realmente los átomos de su región glútea levitan sobre los átomos de su ropa y estos sobre el material del asiento a la distancia de un ángstrom (diezmilmillonésima de metro), a causa de que los electrones de los átomos del asiento repelen los electrones de los átomos de los pantalones y de las nalgas, oponiéndose a un contacto más íntimo. Lo mismo sucede entre sus pies y el suelo cuando camina. Vivimos permanentemente flotando, en lo que podríamos denominar un «estado de levitación cuántica».

La vida consiste esencialmente en las interacciones químicas y físicas de tres átomos: hidrógeno, oxígeno y carbono. Entre los tres constituyen el 99 por ciento de todos los átomos que componen cualquier ser vivo. El uno por ciento restante está formado por casi todos los elementos de la tabla periódica (unos sesenta), de los cuales unos veinte juegan algún papel activo en nuestra fisiología. Destacan los átomos de nitrógeno, calcio, fósforo, potasio, azufre, sodio, cloro, magnesio, hierro, flúor, cinc, yodo, selenio, cobalto, litio y manganeso. Para proporcionarnos salud, estos átomos deben estar en nuestro organismo en las cantidades y proporciones adecuadas. Un pequeño exceso de alguno ocasiona graves trastornos e incluso puede provocar la muerte, como sucede con el flúor, el plomo, el mercurio, el arsénico, el cadmio o el litio, entre otros muchos.

Ya hemos reiterado que cada uno de esos millones de átomos que forman nuestro organismo nos aporta una pequeña cantidad de la energía que almacena en las interacciones de sus partículas constitutivas. Pero la manera que tienen la mayoría de los átomos de hacer efectiva esa energía para darnos vida y salud es a través de las moléculas que forman.

Otra característica de los átomos es que son inmortales, no se pueden destruir salvo que se les someta a las condiciones físicas que reinan en las estrellas o en las bombas nucleares. Todos los átomos que existen en el universo, y los que forman todo su cuerpo, se han creado en el único lugar donde es posible su fabricación: en alguna estrella gigante que colapsó y explotó regando todo el universo con los átomos que albergaba. Así que usted y yo no somos ni más ni menos que una minúscula porción de universo. No solo formamos parte del universo que podemos contemplar en una noche de verano, sino que todo ese universo forma parte de nosotros. Como decía el astrónomo y divulgador I. Asimov somos polvo de estrellas.

Además, todos nuestros átomos son átomos de segunda mano. Todo lo que forma nuestro cuerpo al nacer ya ha sido usado con anterioridad por algo o por alguien. La estructura de nuestro cuerpo está en constante renovación. Nuestras células mueren y gran parte de las moléculas y los átomos que las forman son sustituidos por otros que penetran en el organismo a través del aparato digestivo, con los alimentos, o a través del aparato respiratorio, con el aire. Cada cinco años, más o menos, nuestro cuerpo renueva todos los átomos que lo forman y que esparcimos generosamente por todo el ambiente. Y algo similar ocurre con todos los seres vivos que viven en la actualidad o han vivido a lo largo de los miles de millones de años de evolución de la vida.

Nuestros átomos ya se han utilizado antes para formar millones de organismos a lo largo de los millones de años de evolución biológica; han sido átomos de bacterias, de trilobites o de algún dinosaurio. Y es casi seguro que usted alberga en su cuerpo átomos que en su día pertenecieron a Cervantes, a Beethoven o a Julio César. Es lo que podríamos denominar el «karma atómico». Cuando morimos, nuestras estructuras orgánicas y nuestras moléculas se deshacen y los átomos inmortales que las componen se separan y dispersan: se irán a buscar nuevos destinos y, en esa suerte de reencarnación atómica, aparecerán de nuevo en el barro, en una lombriz, en un tomate, en una gota de lluvia o en otro ser humano. Ni siquiera la incineración destruye los átomos que forman nuestro cuerpo: el carbono, el hidrógeno y el oxígeno y otros escapan a la atmósfera formando parte del humo de la combustión (y que inmediatamente empiezan a penetrar en el organismo de los parientes que asisten al sepelio y respiran estos humos); el resto de los átomos de las

moléculas que no arden se recogen en la urna que se entrega a los familiares y que estos esparcen según la voluntad del finado y acabarán formando parte de una lechuga que alguien se comerá.

## LAS MOLÉCULAS DE LA VIDA

La mayoría de los átomos que forman parte de los seres vivos son los ladrillos energéticos con los que se construyen unas estructuras más complejas, que son las moléculas. La energía del universo contenida en los átomos se transforma en energía molecular de nuestro organismo a través de los enlaces que establecen los átomos entre sí para construir las moléculas biológicas (carbohidratos, grasas, proteínas y ácidos nucleicos). Estos enlaces están constituidos en su mayor parte por las fuerzas electromagnéticas que se establecen entre los electrones que rodean cada núcleo atómico. Aunque la mayor parte de las moléculas están formadas por los átomos de hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno, sus múltiples combinaciones hacen que el número de moléculas posibles sea muy elevado. La mayor parte de esa cantidad enorme de moléculas, que son las que determinan nuestra fisiología y nuestra salud, son desconocidas.

La molécula más abundante en nuestro organismo es la de agua. Esta constituye entre el sesenta y el setenta por ciento del peso corporal, ya que nuestro organismo reproduce, en cierta media, la composición marina (agua y sales) del planeta en el que hemos evolucionado. La molécula de agua está formada por la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (ya saben, la fórmula  $H_2O$ ). Una curiosidad de la molécula del agua es que la mayor parte de las que componen los mares, lagos, ríos, acuíferos, vapor de agua y glaciares y todas las que forman parte de todos los seres vivos, incluidos nosotros, son de origen extraterrestre. Las que aportaron los numerosos cometas y meteoritos que impactaron con la Tierra en la infancia de nuestro planeta.

Veamos un ejemplo para completar la visión de la complejidad estructural y energética de las moléculas: la insulina. Esta es una hormona secretada por el páncreas cuya alteración ocasiona la diabetes. Esta proteína está formada por dos cadenas compuestas por la unión de unas moléculas más



pequeñas llamadas aminoácidos. Estos, a su vez, están formados por la unión de átomos de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y, a veces, azufre. Los aminoácidos se unen entre sí mediante un tipo especial de enlace llamado peptídico. Además, la insulina posee tres enlaces más que unen aminoácidos de la misma cadena y de cadenas diferentes a través de átomos de azufre. Estos conectores permiten que la molécula de insulina se pliegue en una compleja estructura tridimensional. La estructura ordenada y la energía de sus átomos es lo que proporciona a la molécula sus propiedades fisiológicas. Todo depende de las fuerzas electromagnéticas de los átomos que forman las moléculas. Cualquier cambio energético puede modificar la estructura de la insulina, alterar su función y provocar la diabetes.

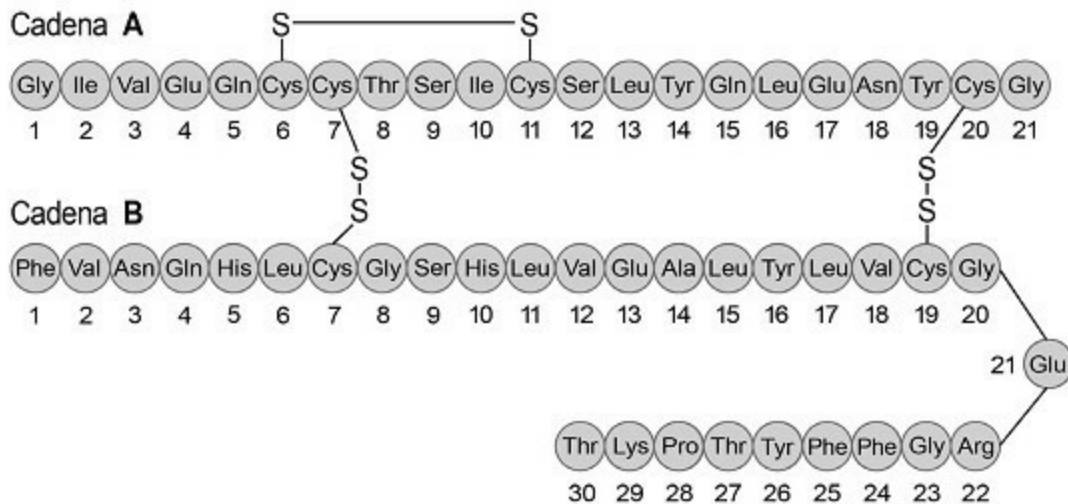


Figura 2.2. La molécula de insulina está formada por la unión de dos cadenas de aminoácidos enlazadas entre sí por átomos de azufre. En la insulina humana, la cadena alfa tiene 21 aminoácidos y la cadena beta, 30. Cada aminoácido es una molécula formada por la unión de átomos de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y algo de azufre.

Nuestro organismo funciona gracias a los miles de moléculas que lo forman. Cada una de ellas cumple una misión específica. La molécula de la hemoglobina transporta el oxígeno por nuestro cuerpo, las moléculas inmunoglobulinas nos defienden de las invasiones de elementos extraños, las enzimas controlan todas las reacciones químicas, las moléculas transportadoras permiten el paso de sustancias a través de la membrana de nuestras células, las hormonas y los neurotransmisores regulan el

funcionamiento de nuestro organismo para que resulte eficaz en cada situación y las moléculas que forman los ácidos nucleicos, las nucleoproteínas, son capaces de guardar y utilizar toda la información de nuestro diseño estructural y funcional. Nuestra fisiología es la consecuencia de los cambios energéticos que suceden en este micromundo formado por decenas de miles de moléculas diferentes.

## LA MATERIA ES VIBRACIÓN Y MOVIMIENTO

Todo en el universo (incluidos nosotros) vibra, se mueve; nada está quieto. Todo y todos formamos parte de ese concierto infinito interpretado por la vibración de numerosos instrumentos cuánticos. Cada ser animado o inanimado tiene su propia frecuencia de vibración. Este movimiento oscilatorio, de vaivén, es el truco que usa la energía para expresarse y formar la materia. Fíjese qué imagen más poética crea la física cuántica: la materia solo es vibración de la energía.

La nueva física cuántica habla de «campos»: campo gravitatorio, magnético, de electrones, de fotones, etc. La cuestión es muy compleja. Un campo es la distribución espacial y temporal de una magnitud física. Según la física, todo el universo (insisto, nosotros incluidos) está formado por un conjunto de campos. Un campo es como una especie de fluido que llena el espacio (y el tiempo). El universo estaría formado por un gran número de estos fluidos, que unas veces se mezclan entre sí y otras no. Dentro de esos campos se producen ondas, como en la superficie de un estanque, mediante las cuales se transmite la energía.

Una partícula elemental sería la ondulación más pequeña posible de un campo. Por ejemplo, por todas partes del universo se extiende un campo de electrones. Cada electrón del universo o de los que forman parte de nuestros átomos y moléculas es solo una vibración localizada de ese campo único. Cada partícula elemental tiene su propio campo que llena todo el universo, todas las partículas vibran y todas ellas son vibraciones localizadas de su propio campo. Campos de fotones, de quarks, de gluones, de muones. Hay un campo por cada partícula conocida y su vibración correspondiente.

¡Uf! Ya veo que les pasa como a mí con estos conceptos. Lo interesante de esta visión cuántica es que cada partícula que forma nuestro cuerpo está conectada con las que forman otras personas y otros seres vivos, así como con las del resto de los astros y de galaxias del universo. Todo está interconectado entre sí mediante esta red infinita de campos cuánticos de partículas y de energía. Es la unidad de todo lo que existe.

Lo que visualizamos como una partícula solo es una vibración localizada de su campo. Así fue como se descubrió el famoso bosón de Higgs. El campo del bosón de Higgs interacciona con otras partículas y les otorga el atributo de la masa. Pero este campo de Higgs es difícil de observar directamente, de ahí las dudas que había sobre su existencia. Se logró detectarlo proporcionándole suficiente energía mediante un acelerador para que la partícula vibrara y así, por decirlo de alguna forma, se hiciera notar.

El conjunto de las partículas que componen un átomo están vibrando. Además, el átomo en su conjunto también se mueve. Veamos una aplicación práctica para constatar que estos datos forman parte de la realidad, que no son meras disquisiciones teóricas. Un trozo de hielo está formado por moléculas de agua que por causa de la baja temperatura (poca energía cinética) se mueven poco, y esta falta de movimiento proporciona la sensación de solidez. Si lo calentamos ligeramente (aportamos energía), los átomos aumentan su movilidad y cuando estos se mueven también lo hacen las moléculas, y nosotros percibimos la sensación de liquidez (el hielo se ha fundido). Si continuamos calentando el agua (más energía) los átomos empiezan a agitarse cada vez más y las moléculas del agua se mueven tanto que comienzan a abandonar el líquido en forma de vapor. La mayor movilidad de los átomos nos proporciona el estado gaseoso. Por lo tanto la mayor o menor solidez de la materia depende, en gran parte, de la mayor o menor vibración de los átomos que la componen.

## ELECTRONES, ÁTOMOS, MOLÉCULAS Y SALUD

En 1960, el físico y premio Nobel, Albert Szent-Györgyi escribió: «La distancia entre estos abstrusos cálculos cuánticos y la cama del paciente puede que no sea tanta como parece». Estaba constatando que durante el siglo XX la

medicina clásica se había ido convirtiendo en medicina molecular y que se iniciaba (aunque con tibieza) la medicina submolecular o cuántica. Para Szent-Györgyi, toda enfermedad comenzaba a nivel molecular (o submolecular) y, por eso, todo tratamiento debería llevarse a cabo a ese mismo nivel. Él creía que muchas de las enfermedades eran el resultado de una distribución electrónica desfavorable en los átomos que conforman las moléculas y un tratamiento eficaz del problema tendería a restablecer esa situación anómala. Consecuente con sus estudios, en 1976 publicó su famoso trabajo acerca de la teoría electrónica del cáncer.

Hoy ya conocemos numerosas enfermedades cuya causa principal es la alteración de la distribución de electrones en determinadas moléculas. Un ejemplo representativo es la intoxicación por mercurio, un problema grave en la actualidad, ya que algunos alimentos, como por ejemplo los pescados azules de gran tamaño, lo pueden contener. Este metal dentro del organismo se une por enlace covalente (compartiendo electrones) con átomos presentes en las proteínas de nuestro organismo, como al azufre de los sulfhidrilos, al fósforo de los fosforilos y al nitrógeno de las amidas. Esto desorganiza la estructura electrónica de las proteínas y altera su función. Así proceden numerosos agentes tóxicos de uso común, como algunos de los herbicidas que utilizamos para eliminar las malas hierbas del jardín.

Veamos otro ejemplo muy popular de la relación de partículas subatómicas y la enfermedad. Para oxidarse, toda molécula o átomo tiene que perder electrones. Y esto tiene hoy especial relevancia cuando la moderna medicina ha demostrado que procesos de oxidación moleculares son la causa de gran parte de las enfermedades que hoy nos afectan, como el cáncer, la diabetes, el infarto de miocardio, el ictus cerebral, la enfermedad de Alzheimer o los trastornos autoinmunitarios, entre otros muchos. Los agentes responsables son los denominados «radicales libres de oxígeno», que no son otra cosa que compuestos de oxígeno que tienen un desequilibrio en los electrones de las órbitas más externas de sus átomos (el término correcto es decir que están «desapareados»). Estos átomos tienden a «robar» ese electrón que le falta de otra molécula (sobre todo de lípidos, ácidos nucleicos o proteínas), la cual pierde un electrón y por tanto se oxida y se altera su función y, además, se transforma en un nuevo radical libre: si te muerde un vampiro te

conviertes en vampiro. Si ocurre en una molécula de ADN puede alterar la información que contiene y ocasionar que se sintetice una proteína incorrecta (mutación) con una función alterada.

Los antioxidantes que ingerimos con los alimentos (vitamina E, vitamina C, betacaroteno, selenio y algunos compuestos fenólicos) o cuando los tomamos en preparados farmacéuticos ceden electrones a los radicales libres y los neutralizan al precio de convertirse ellos mismos en radicales libres. Entonces tendrán que ser neutralizados por otros antioxidantes. No lo olviden, los antioxidantes actúan en cadena, así que si quieren tener sus electrones bien controlados tienen que ingerir (mediante alimentos o preparados farmacéuticos) la serie completa de los principales antioxidantes.

No quiero aburrirles con una sarta interminable de ejemplos. Solo uno más por su importancia para comprender este asunto que venimos tratando. La diabetes afecta hoy a más de cuatrocientos millones de personas en el mundo. La mayor parte de estos diabéticos y los que padecen otros muchos problemas relacionados (como obesidad, hipertensión o alteraciones de los lípidos) sufren lo que se llama «resistencia a la insulina». Para poder regular la cantidad de glucosa en la sangre, la molécula de insulina tiene que unirse a un receptor que se encuentra en la superficie de las células, encajándose en este como una llave en su cerradura. Si todo va bien, la insulina abre las puertas para que entre la glucosa en las células y así controla el metabolismo. Para que esto funcione correctamente la insulina, al unirse al receptor, hace que este capte un átomo de fósforo (se fosforile). Esta incorporación cambia la estructura electrónica de todo el receptor de insulina y permite que funcione. Pero si esta fosforilación no ocurre, la llave no entra bien en la cerradura, la puerta de la glucosa no se abre y se produce la resistencia a la insulina, el aumento de la glucosa en sangre, la diabetes y todas sus consecuencias.

Vemos la importancia que tienen los átomos dentro de nuestro organismo para determinar nuestra salud y nuestro bienestar físico y mental. Muchas de estas alteraciones se deben a que voluntaria o involuntariamente introducimos en nuestro organismo átomos incorrectos o en cantidades inadecuadas. Piense en esto y tenga cuidado con lo que come a diario, bebe, respira o se aplica

sobre la piel. Esas son las vías a través de las que los átomos del medio externo penetran en nuestro interior y pasan a formar parte de nuestras propias moléculas y a determinar nuestra salud y felicidad.

## El planeta Tierra

La Tierra proporciona y dosifica la energía que permite la vida. Esta energía no llega directamente a los seres vivos, sino que lo hace a través del filtro de la atmósfera y de la hidrosfera y de las diferentes variaciones de sus estados energéticos, que es lo que se conoce con el nombre de clima. Las variaciones climáticas ocurridas a lo largo de la historia de nuestro planeta han condicionado toda la evolución biológica y, por lo tanto, la evolución de nuestra especie.

Toda la energía y la materia que permitieron el desarrollo de los primeros seres vivos, toda la energía que propició la evolución y la diversidad de las especies y toda la energía y la materia que mantiene hoy la vida nos la proporciona el planeta Tierra. Los organismos recibimos toda la energía y la materia que precisamos a través del aire (la atmósfera), del agua (la hidrosfera) y del suelo (litosfera).

Esta energía que nos da la vida procede de tres fuentes: el Sol, que representa más del 99 por ciento de todo el flujo de energía para la vida; el calor que aún guarda la Tierra en su interior (energía geotérmica); y la energía gravitacional que ejercen, sobre todo, las masas del propio planeta y de su satélite, aunque también recibimos la débil influencia gravitacional de todos los astros del universo.

Nuestro planeta debe considerarse, por tanto, como una entidad compleja y ordenada, casi viva, que resulta de la interacción e interconexión del espacio exterior, la atmósfera, la biosfera, la litosfera y todas las formas de almacenamiento de agua (océanos, mares, ríos, lagos y masas de hielo). Es un sistema cibernético capaz de regularse a sí mismo y de distribuir las principales fuentes de energía por todo el planeta gracias a fenómenos como la

nubosidad, la composición de gases de la atmósfera, el viento, los huracanes, los tornados, la lluvia, la nieve, el hielo, las tormentas eléctricas, la humedad, las mareas, el oleaje y la temperatura ambiental.

Toda la vida sobre el planeta depende fundamentalmente del clima. Y hoy sabemos que las variaciones climáticas ocurridas a lo largo de la historia de nuestro planeta han condicionado toda la evolución biológica y, por lo tanto, la evolución de nuestra especie, e incluso han determinado nuestra historia.

## FORMACIÓN DEL PLANETA TIERRA

Nosotros habitamos en una galaxia, que tiene un diámetro de unos cien mil años luz, que es solo una entre los cientos de miles de millones de conjuntos estelares que se pueden detectar con los instrumentos más modernos y potentes. Cada galaxia alberga cientos de miles de millones de estrellas y muchos más miles de millones de planetas. Nuestro Sol, responsable de que estemos vivos, es una estrella amarilla ordinaria, de tamaño medio y situada en uno de los brazos de la espiral de nuestra galaxia: en un rincón.

Hace unos cinco mil millones de años, se formó nuestro sistema solar a partir de una de estas nubes de materia y de energía agitada por remolinos cósmicos. En el centro de esa masa se acumuló el 99,9 por ciento de toda la materia que dio origen al Sol. Una circunstancia extraordinaria permitió que se formara el tipo exacto de estrella que convenía para el posterior desarrollo de la vida: lo suficientemente grande para irradiar mucha energía, pero no tan grande como para que se consumiera enseguida. Si nuestro Sol hubiera sido diez veces mayor, se habría agotado en la brevedad de diez millones de años, en lugar de los diez mil millones que tiene de vida nuestra estrella. Alrededor del Sol se fueron condensando los fragmentos de materia que originaron los planetas y el resto de los cuerpos de diversos tamaños que pueblan nuestro sistema solar.

La Tierra se formó hace cuatro mil setecientos millones de años como una masa incandescente de magma líquido, a una elevadísima temperatura. Esa pella ardiente se puso a girar alrededor del Sol, casualmente a la distancia precisa para favorecer la aparición de la vida. Solo un cinco por ciento más cerca todo se habría evaporado y la temperatura de la Tierra sería de varios



cientos de grados, como les sucede a Mercurio y a Venus. Apenas un quince por ciento más lejos sería un astro helado, con temperaturas de 100 °C bajo cero durante todo el año, como les sucede al resto de los planetas del sistema solar.

Esto de la cercanía al Sol, además de la temperatura, tuvo otra consecuencia interesante e indispensable para la vida. La estructura de nuestro planeta y de nuestro organismo depende del tipo de átomos que pudo atrapar y concentrar la Tierra para constituir su masa. Los elementos más pesados como el oxígeno, el magnesio, el silicio, el hierro y el carbono, entre otros, empujados por el viento solar, fueron atrapados por los planetas más cercanos al Sol: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Los elementos menos pesados llegaron más lejos y constituyeron Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, los llamados planetas gaseosos.

En esta fase precoz de formación de la Tierra ocurrió otro suceso extraordinario con consecuencias esenciales para la posterior aparición de la vida. Según propuso en los años sesenta del siglo pasado el científico Williams K. Hartmann, un pequeño planeta al que se le ha llamado Theia (o Tea) colisionó contra la Tierra. Fue un impacto de refilón que destruyó Theia y desgajó un fragmento de la superficie incandescente de nuestro planeta. Este fragmento y los restos de Theia no pudieron escapar a la fuerza de atracción de la Tierra y se quedaron girando a su alrededor mientras se iban fusionando entre sí y enfriándose hasta constituir la Luna. Este satélite de gran tamaño ejerce una función estabilizadora del movimiento de nuestro planeta. Sin su influencia, la Tierra se bambolearía como una peonza con graves consecuencias para el clima, las mareas y la estructura geológica del planeta. El influjo gravitatorio estabilizador de la Luna hace que la Tierra gire a la velocidad justa y con el ángulo más adecuado (23°), y añade nuevas condiciones favorables para el desarrollo de la vida.

En los primeros millones de años tras su formación, la atmósfera de la Tierra era una mezcla de gases y rocas vaporizadas sacudida por tormentas inimaginables y vientos de varios cientos de kilómetros por hora. El planeta tenía solo un tercio de su tamaño actual y su rotación era muy rápida a causa de la aceleración del golpe tangencial de Theia. Los días y las noches eran más breves que en la actualidad; apenas de seis horas de duración. En esa

peonza semilíquida e incandescente, los materiales más pesados, como el hierro y otros metales, se fueron hundiendo en el magma hasta el núcleo y los elementos más ligeros quedaron flotando en la superficie.

Por esta causa nuestro planeta desarrolló otra propiedad extraordinaria sin la cual tampoco habría prosperado la vida: su composición interna. Se supone (nadie hasta ahora lo ha podido verificar directamente) que el interior de la Tierra está formado por un núcleo metálico sobre el que se desliza un núcleo exterior líquido, compuesto de metales fundidos a elevadísimas temperaturas. Por fuera de estos se encuentra el manto, una gruesa capa de rocas calientes, y más al exterior, la corteza rocosa sobre la que vivimos. Parece ser que el giro de la parte fluida del núcleo crea el campo magnético terrestre. Este campo magnético tiene un papel esencial en relación con la vida en el planeta, ya que nos protege de las peligrosas radiaciones cósmicas, desviándolas e impidiendo que nos atraviesen y destrocen nuestras moléculas. Este efecto protector se puede observar a simple vista en las maravillosas auroras boreales o australes.

En aquellos momentos iniciales, el sistema solar estaba lleno de planetoides y asteroides que orbitaban el Sol a grandes velocidades. Muchos de ellos impactaron contra la Tierra. Algunos de los cometas y meteoritos que bombardeaban el joven planeta en los primeros momentos traían en su composición inmensas cantidades de una molécula muy especial, sin la cual no hubiera sido posible la vida: el agua. Tal acumulación a lo largo de millones de años y la especial fuerza gravitatoria de la Tierra permitieron retener el agua que, al acumularse, dio origen a la formación de los mares que ocupan la mayor parte de la superficie terrestre. El agua y los agentes erosivos de nuestra atmósfera han borrado las huellas de los miles de impactos que recibió la joven Tierra, sin embargo, cicatrices similares han persistido para siempre en la superficie de la Luna y de otros planetas, como Mercurio, Venus y Marte.

La Luna ocupaba casi por completo todo el horizonte terrestre, ya que se encontraba muy próxima a la Tierra, a menos de 25.000 kilómetros en los primeros millones de años. Desde entonces se ha ido alejando a un ritmo de unos 3,8 centímetros por año. En la actualidad está a 384.000 kilómetros de distancia. La fuerza gravitatoria de aquella Luna tan próxima ocasionaba mareas gigantescas, de más de trescientos metros de altura, que provocaban

olas que inundaban amplias extensiones de tierra firme a gran velocidad. Al retroceder, las aguas arrastraban a los océanos gran cantidad de material que se disolvía en ellos, enriqueciéndolos en compuestos químicos inorgánicos. Estas mareas gigantescas contribuyeron a frenar la elevada velocidad de rotación de la Tierra mediante un mecanismo que aún hoy sigue operando y que se denomina «fricción mareomotriz».

Hace unos cuatro mil millones de años aparecieron las primeras costras sólidas y originaron la primera corteza continental. Ya veremos que quedan vestigios de rocas con esta antigüedad. Esta superficie casi sólida y viscosa estaba plagada de surtidores de gases y lava procedentes del magma interior. Estos gases se descomponían por la acción de la energía del Sol. La gravedad los retenía alrededor de la Tierra para constituir la primitiva atmósfera tóxica y turbia por las nubes sulfurosas de los volcanes y el polvo de los continuos impactos de meteoritos. Terribles descargas eléctricas cruzaban constantemente esa masa de gases. El vapor de agua era abundante y, al perder temperatura, se condensaba en lluvias torrenciales y constantes que contribuían al enfriamiento de la superficie del magma, a la creación de los primeros continentes y a los esbozos de los mares. Estos pequeños continentes que flotaban en el magma fundido eran efímeros, chocaban entre sí agitados por una extraordinaria actividad volcánica, y sometidos a la erosión por el agua y por los ácidos de la atmósfera. La corteza terrestre estaba sometida a un proceso rápido de destrucción y reconstrucción constante. Poco a poco, los minicontinentes se fueron enlazando y formaron placas mayores y más estables. Durante millones de años, las lluvias torrenciales caían de manera constante, enfriaban la superficie del planeta y se convertían de nuevo en vapor de agua, que volvía a caer en precipitaciones que lavaban muchos de los gases tóxicos de la atmósfera, hasta disolverlos en los mares en formación.

Poco a poco, millón a millón de años, se fue haciendo la calma en nuestro planeta. Los ecos del Big Bang se fueron apaciguando. La Tierra se fue enfriando. Cada vez había más agua líquida por la sucesiva caída de cometas de hielo y de otros astros. Las lluvias eran constantes y torrenciales por toda la superficie del planeta, pero cada vez el agua era menos caliente. El contenido de vapor de agua y de gases fue disminuyendo en la atmósfera. Toda el agua líquida fue ocupando las depresiones y oquedades de las arrugas de la

corteza solidificada y dando lugar a los océanos. Se estaban preparando las condiciones para que tuviera lugar ese acontecimiento extraordinario que supuso la aparición de la vida.

## LA ENERGÍA DEL SOL

Una ínfima parte de la energía del Big Bang quedó atrapada en el Sol. El gradiente energético entre el astro rey y el espacio que lo rodea permite el flujo de energía necesaria para crear en la Tierra el orden y la complejidad de la vida.

Nuestra estrella tiene una composición gaseosa formada por hidrógeno y helio. En su seno se producen continuas reacciones termonucleares de fusión en las que los átomos de hidrógeno se combinan para formar átomos de helio. En el proceso se genera una gran cantidad de energía. La locura de los seres humanos ha permitido reproducir artificialmente ese proceso solar en un arma terrible, que es la llamada bomba de hidrógeno o de fusión.

Parte de la energía generada en la estrella constituye la radiación solar, que se aleja por el espacio en todas direcciones. El Sol emite su energía electromagnética en forma de paquetes de fotones. En su trayectoria, una fracción pequeña de tales ondas se encuentra con nuestro planeta. Los fotones que constituyen la energía solar no son partículas-ondas homogéneas, sino que cubren un amplio espectro de longitudes de onda y de energía que se agrupan en siete tipos: ondas de radio, microondas, ondas de luz infrarroja, ondas de luz visible, ondas de luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Todas estas radiaciones electromagnéticas están vehiculadas por los fotones. Son partículas elementales que carecen de masa, son pura energía, presentan un comportamiento dual, como onda o como corpúsculo, según las circunstancias, y se mueven a la velocidad de la luz. Existen fotones de cualquier energía casi desde cero electronvoltios hasta muchos millones. Cuanto mayor es la longitud de onda, menos energía tienen los fotones. Un fotón de luz verde tiene una energía de 2.3 eV; la de los fotones infrarrojos (los responsables del calor) es un poco menor, y las señales de radio más comunes constan de fotones de una energía millones de veces menor. Pero la

radiación ultravioleta tiene fotones de energía millones de veces mayores, por eso son tan peligrosos para nuestra salud: pueden quemar nuestra piel, dejarnos ciegos o producirnos un melanoma.

## LOS FOTONES PERMITEN LA VIDA Y DIRIGEN SU EVOLUCIÓN

Gran parte de los fotones solares quedan retenidos en las diferentes capas de gases que rodean la Tierra, pero una fracción llega hasta sus habitantes. Algunos fotones interactúan con la estructura de los átomos que componen las moléculas de los organismos y dan lugar a la vida. Los seres vivos, tanto animales como plantas, son realmente «comedores» de fotones. Es indudable, por tanto, que los fotones solares son la principal forma de energía que llega a la Tierra, la que permite el fenómeno de la vida. También han sido la fuerza principal que ha dirigido la evolución biológica, y no hay duda de que nosotros estamos aquí gracias a ellos.

La energía del Sol llega con cada amanecer a la superficie de la Tierra. Algunos seres vivos, como las plantas, utilizan directamente los fotones, que ceden su energía a la molécula de la clorofila (pigmento que le proporciona el color verde). Con energía,  $\text{CO}_2$  y agua, la planta sintetiza y almacena sus propias moléculas (fotosíntesis), que constituyen sus hojas, raíces y tallos. La energía del Sol se transforma, de esta manera, en energía química de las plantas. Estas son ingeridas por los animales herbívoros, que transforman la energía de las moléculas de las plantas en la propia energía química que sustenta su metabolismo y que construye su cuerpo. De esta forma, una vaca incorpora indirectamente la energía de los fotones del Sol a sus propias estructuras corporales, a través de los vegetales que ingiere. Cuando nosotros comemos un bistec de ternera con lechuga incorporamos a nuestro organismo unos nutrientes que nos aportan indirectamente los fotones de la energía solar, que utilizamos para construir nuestras propias moléculas, que sustentan nuestro metabolismo y que nos permiten estar vivos. Además, la energía del Sol que acumularon las plantas hace millones de años se transformó en el carbón, en el gas y en el petróleo que hoy proporcionan la energía para que funcione nuestra

sociedad desarrollada. Sepa que cada vez que pone en marcha su automóvil lo hace gracias a la energía que proporciona lo que podíamos denominar (con cierta liberalidad, por supuesto) «fotones solares fósiles».

Insistimos una vez más. Todo lo que somos, todas nuestras funciones, incluida la de leer estas líneas, toda la energía que empleamos en nuestro día a día son consecuencia de las sucesivas transformaciones de una energía que nos llega del Sol en forma de paquetes de fotones y, en primera instancia, de la energía primigenia que generó el universo en el que habitamos. En toda esta cadena, como ya vimos, la energía se va transformando en otras formas de energía y, en cada salto, una parte de ella se dispersa en el universo en forma de calor.

#### LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

Una mínima fracción de la energía inicial de la Gran Explosión se almacena como batería calórica en el magma incandescente que ocupa el centro del planeta, con importantes repercusiones para el mantenimiento de la vida sobre la Tierra. Esta energía no se manifiesta de manera continua como la del Sol, sino esporádicamente y con cierta violencia a través de terremotos, volcanes, fumarolas y géiseres, entre otras manifestaciones telúricas. Como veremos, esta energía tuvo gran importancia en los comienzos de la vida sobre el planeta, pero en la actualidad solo una pequeña fracción de los organismos vive utilizando esta forma de energía.

#### LA ENERGÍA GRAVITACIONAL

A lo largo de la historia de la Tierra, la vida ha evolucionado para sobrevivir ante variaciones en las condiciones del medio ambiente, como cambios de la radiación solar, el clima o los accidentes geotérmicos (erupciones volcánicas, terremotos, maremotos, etc.). El único factor que se ha mantenido constante, con pequeñas variaciones, es la fuerza de la gravedad. Como consecuencia, todas las formas de vida en el planeta se han adaptado a la presencia de esta fuerza misteriosa y constante. Para ello, todos los seres vivos, unicelulares y

pluricelulares, plantas y animales han desarrollado mecanismos para detectar la gravedad. Los animales poseen áreas cerebrales para procesar esa información con fines de orientación en el espacio, de mantenimiento del equilibrio y de control de la postura y el movimiento.

Hay muchos ejemplos. Citaré algunos que nos permitan tener una idea de la influencia de la gravedad sobre los seres vivos, como es el caso de los tropismos de las plantas durante su crecimiento. Las raíces crecen hacia la atracción de la gravedad, lejos de la luz solar, y ello les permite profundizar en la tierra en busca de sustento. Las ramas y tallos crecen en contra de la fuerza de la gravedad y hacia la luz del Sol, para así captar mejor su energía.

La gravedad ha tenido también un efecto en el desarrollo de la vida desde la aparición de los primeros organismos unicelulares, pues, por ejemplo, a estos les permitía saber si nadaban hacia la superficie del mar o hacia el fondo. Cuando los primeros animales se aventuraron fuera del agua, sus cuerpos estuvieron sometidos a la fuerza de la gravedad sin el contrapunto de la flotabilidad acuática. La evolución tuvo que desarrollar los caparazones, el esqueleto y el armazón vertebral, así como los sistemas de locomoción para oponerse a la fuerza gravitatoria. Y, por supuesto, las alas que permiten volar a ciertos animales.

Una aplicación práctica de esta influencia de la gravedad es la acumulación de calcio en los huesos, cuya alteración ocasiona algunas enfermedades, como es la osteoporosis. La evolución ha proporcionado dureza y flexibilidad a los esqueletos de los animales terrestres para permitirles un eficaz movimiento en seco. Y esa dureza la proporcionan los átomos de calcio, fósforo y magnesio (sus sales) que se depositan sobre la matriz de colágeno del hueso. La fuerza de la gravedad y el golpeteo de nuestras extremidades contra el suelo (saltos, carreras, deambulación) son los principales estímulos para la acumulación de calcio en el hueso. Nadar muchas horas al día, permanecer encamado durante un largo tiempo o vivir unos meses en la ingravidez de una estación espacial son circunstancias que ocasionan una gran descalcificación del hueso. Una aplicación práctica: las mujeres por encima de los cincuenta y cinco años de edad no deberían practicar la natación como única actividad deportiva, ya que incrementa su tendencia natural a la osteoporosis.

## LOS RITMOS ASTRONÓMICOS Y ATMOSFÉRICOS

Todos los seres vivos, incluidos nosotros, somos capaces de detectar las variaciones más importantes que suceden en nuestro entorno planetario; fundamentalmente, los cambios del tiempo atmosférico y los movimientos del Sol y de la Luna. Los aficionados a la astrología quizás incluyan algunas influencias más lejanas. Es seguro que nuestros organismos reciben las influencias gravitacionales de todos los astros del universo, sobre todo de los que están más cercanos, pero hasta la fecha no conozco ningún estudio científico que demuestre alguna influencia significativa en nuestra salud y en nuestra felicidad por esta causa. Las únicas publicaciones a este respecto son los horóscopos de los periódicos.

Todos los seres vivos, en mayor o menor medida, prevemos con suficiente antelación la llegada de cambios en las condiciones atmosféricas que pueden afectar nuestras condiciones de vida. Hay numerosos ejemplos que hemos observado en diversas ocasiones, como el de las hormigas que comienzan a proteger las entradas de los hormigueros dos o tres días antes de que lleguen las lluvias, el reagrupamiento de las aves para emigrar cuando se acerca un cambio de estación y muchos otros.

El tiempo atmosférico y, sobre todo, sus cambios bruscos, nos afectan física o, al menos, psíquicamente. Sentir una sensación de agobio y de malestar, cierto estado de depresión, dolores de cabeza y de huesos en circunstancias de alteraciones atmosféricas es bastante común. La cuestión llega hasta el punto que la legislación de determinados países rebaja la responsabilidad penal de los delitos cometidos bajo determinadas condiciones atmosféricas. No se conoce bien cuáles son los cambios del tiempo que más nos afectan (velocidad del viento, presión, temperatura, humedad, etc.), pero estudios recientes sugieren que predominan las variaciones en la carga iónica de la atmósfera, repartida entre iones positivos y negativos, desencadenadas por los diferentes fenómenos atmosféricos.

Ya hemos avanzado que somos seres eléctricos y por eso nos afectan tanto los cambios electromagnéticos de la atmósfera. Muchos hemos experimentado cómo los pelos de nuestra cabeza, incluso el vello del cuerpo, se erizan y chisporrotean al contacto con el peine o con determinadas ropas en



situaciones de tormenta cargada de electricidad. Es un hecho demostrado que la electricidad atmosférica constituye un elemento fundamental de la «biometeorología humana», a la que tanto la Organización Mundial de la Salud como la Organización Meteorológica Mundial prestan atención. Estos organismos fomentan el estudio de la influencia de los distintos parámetros de la electricidad ambiental en el comportamiento y la salud de las personas.

Nuestro organismo y el del resto de los seres vivos están capacitados para determinar las modificaciones cíclicas en la luz del Sol, los cambios estacionales y también las variaciones en la fuerza gravitatoria de los astros más cercanos. Dado que estas últimas son rítmicas, a la ciencia que estudia estos sucesos se la llama cronobiología. Es una disciplina de la fisiología que hoy goza de gran reputación y es objeto de intensa investigación. El premio Nobel de Fisiología (Medicina) se concedió en 2017 a tres investigadores por sus estudios sobre los mecanismos de la cronobiología. Los animales poseemos en el cerebro un sistema central capaz de detectar la luz y la oscuridad. Este dispositivo libera la hormona melatonina y algunos neurotransmisores, activan sistemas secundarios, modulan la secreción de hormonas y modifican la actividad cerebral según la fase del día en la que nos encontremos (ritmos circadianos). Por ejemplo, la cantidad de cortisol en sangre está muy elevada al amanecer y va disminuyendo a lo largo del día, hasta alcanzar su valor más bajo al anochecer. La presión arterial y el nivel de glucosa en sangre suelen estar más elevados por la mañana que por la noche. Esto ocasiona que prácticamente todas las funciones fisiológicas y metabólicas se vean afectadas por el momento del día en el que estemos: desde el número de linfocitos en sangre hasta la capacidad de engordar al comer ciertos alimentos (cronodieta). Pero también todos los animales tenemos dispositivos que pueden captar otros cambios cíclicos más amplios (ritmos ultradianos), como la disminución progresiva de la luz diurna en el otoño o su aumento en la primavera. Esto tiene gran importancia en los animales en condiciones de vida salvaje para regular los ciclos de reproducción en las mejores condiciones posibles. Las ovejas se preñan en otoño para que sus crías nazcan en primavera, cuando la hierba abundante garantiza su alimentación.

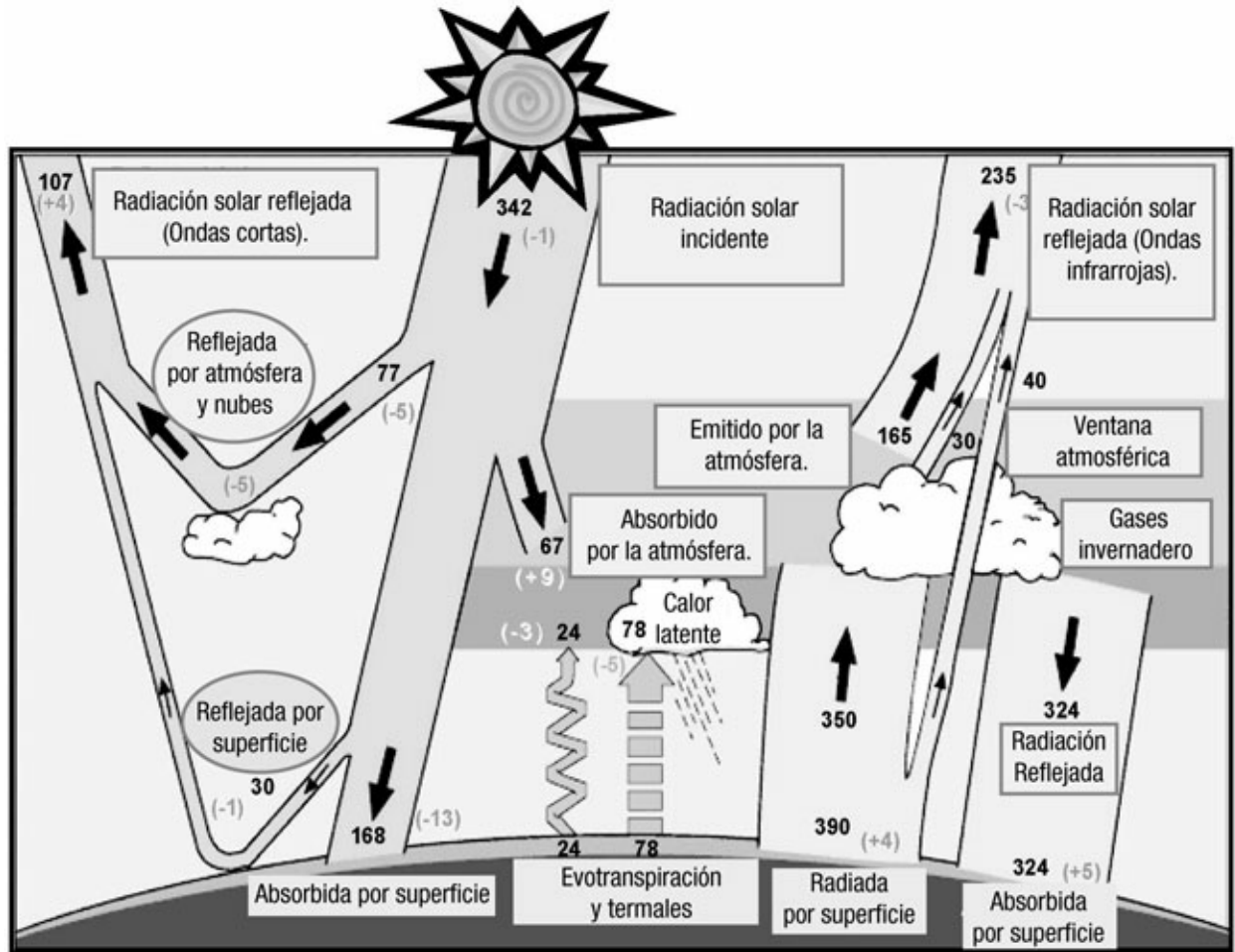


Figura 3.1. Representación de los flujos de energía ( $W/m^2$ ) entre el espacio, la atmósfera y el suelo publicada por la NASA. Los datos se basan en las mediciones del programa SORCE realizadas en 2006. Las cantidades entre paréntesis indican la variación de los valores respecto a 1996.

## NUESTRA MADRE GAIA

De la misma forma que nuestra madre nos alimenta y cuida cuando somos pequeños e incapaces de valernos por nosotros mismos, la Tierra nos proporciona todo lo que necesita la vida para existir y prosperar a través de la evolución. En 1969, el científico inglés James Lovelock formuló su hipótesis de que el planeta Tierra se comporta como un ser vivo capaz de controlar su propio orden, su estructura y su complejidad. En referencia a la diosa griega

que representa a la Tierra, denominó a su teoría «la hipótesis Gaia». De Gaia nacimos, gracias a Gaia vivimos y, si no cuidamos de nuestra madre, cuando muera Gaia todos moriremos.

Según esta hipótesis, Gaia también controla (con dificultad en los tiempos que corren) el equilibrio de energía del planeta para que salga de la Tierra hacia el espacio la misma cantidad de energía que penetra procedente del Sol. Si todo funciona bien, este equilibrio se debería reflejar en una temperatura media de la atmósfera relativamente estable. Como se muestra en el esquema de la NASA, recibimos alrededor de  $342 \text{ W/m}^2$  de radiación solar de pequeña longitud de onda. De ellos, unos  $107 \text{ W/m}^2$  rebotan directamente de nuevo hacia el espacio por el efecto albedo: la energía es reflejada por las nubes y por la superficie terrestre, sobre todo por el hielo de los casquetes polares. El resto de energía que nos manda el Sol,  $168 \text{ W/m}^2$ , la absorben el suelo y el agua. Apenas un 0,5 por ciento de la energía solar es consumida por los seres vivos.

La totalidad de esta energía absorbida se transforma en calor, radiación infrarroja que se vuelve a reflejar hacia el espacio o se utiliza en procesos de evaporación. Gran parte de la energía calorífica que sale de la tierra y del agua hacia el espacio es interceptada por diversos componentes de la atmósfera (vapor de agua,  $\text{CO}_2$ , otros gases, polvo) y reflejada de nuevo hacia el suelo, provocando el efecto invernadero. El resto se disipa al espacio exterior. La cantidad de calor que aporta la actividad humana y la biológica es muy pequeña, pero su mayor influencia se debe a la emisión de gases con efecto invernadero que retienen parte de la energía solar reflejada y aumenta la temperatura global (calentamiento antropogénico).

Mediante estos delicados mecanismos, Gaia regula la cantidad de energía disponible para los seres vivos en la biosfera, ajustándola para que se produzca el flujo de energía más conveniente para la vida y en las mejores condiciones de presión, temperatura y radiación. Si todo funcionara como debiera, el equilibrio de energía estaría garantizado y la temperatura en la Tierra permanecería constante.

A lo largo de sus cuatro mil quinientos millones de años de historia, la Tierra ha sufrido cambios profundos en el clima que han ocasionado variaciones, a veces drásticas, en la dispensación de energía y de materia a los seres vivos. En uno de los extremos está la llamada glaciación «Bola de Nieve», que hace ochocientos millones de años cubrió todo el planeta, hasta el ecuador, de una espesa capa de hielo. En el otro extremo está el calentamiento global del Pérmico, que abrasó la Tierra hace doscientos cincuenta millones de años. En medio se constatan numerosos sucesos climáticos de mayor o menor entidad y duración. Todas estas alteraciones del clima, y sus correspondientes oscilaciones en el aporte de energía, llevaron a la vida al borde de la extinción; pero la mayoría de las veces también aportaron la fuerza necesaria para mover la máquina de la evolución biológica en la dirección más conveniente.

Todo lo que sabemos de las variaciones del clima a lo largo de la historia de la Tierra se lo debemos a la paleoclimatología. Estos cambios han dejado numerosas huellas que los científicos son capaces de interpretar mediante una serie de herramientas que, combinadas, nos pueden dar una idea bastante precisa del clima que reinaba en cualquier época de la historia planetaria. Conviene conocer, aunque sea por encima, las técnicas paleoclimáticas fundamentales para adquirir una idea clara de cómo se obtienen los datos que vamos a manejar a menudo en este libro.

1. Los geoindicadores. Son medidas de la magnitud, frecuencia, proporción y tendencias de los procesos geológicos que ocurren en el planeta. Los geoindicadores se usan para determinar la magnitud de cambios de los sistemas fluviales, las costas, los desiertos, las montañas, etc.

2. Los testigos de hielo de Groenlandia y de la Antártida. El hielo de las regiones polares se ha acumulado capa sobre capa a lo largo de cientos de miles de años. Los paleoclimatólogos lo perforan en profundidad y obtienen largos cilindros en los que se aprecian franjas que se corresponden con el hielo acumulado cada año, y que contienen polvo, burbujas de aire o isótopos de oxígeno, gases, impurezas químicas de origen terrestre y marino, isótopos del espacio exterior y aerosoles de origen volcánico, humano y de los desiertos. La determinación de la composición de estas burbujas milenarias proporciona datos muy exactos del clima en el año correspondiente.

3. Los fósiles. El estudio de los restos de seres vivos en un determinado estrato geológico proporciona indicaciones del clima que reinaba en aquella época y en ese lugar. Como herramientas para tal fin se utiliza el plancton, sobre todo los foraminíferos, pero también se estudian los corales y, en menor grado, los moluscos. Respecto a la fauna continental, se estudian los reptiles y los mamíferos. De la flora se analizan los granos de polen, las esporas y los anillos de crecimiento en los troncos de árboles fósiles.

4. Los sedimentos. Durante millones de años se van acumulando sedimentos sobre los lechos de los lagos y en el fondo de los océanos. Los paleoclimatólogos perforan el suelo de estas cuencas para obtener núcleos o testigos de los sedimentos. En ellos se preservan microfósiles, compuestos químicos y gases, que son usados para interpretar el paleoclima. Aquellos sedimentos que se depositaron en determinadas condiciones de clima formaron rocas, tales como carbonatos, evaporitas, capas rojas y carbones, que también son usadas como elementos para la reconstrucción del clima del pasado.

Yo no soy un experto en paleoclimatología. Para obtener los datos que figuran a lo largo de este libro he recurrido a numerosas publicaciones especializadas. Pero en especial me ha sido de gran ayuda la excelente *Historia del clima de la Tierra*, un libro lleno de datos científicos e ilustraciones didácticas escrito por Antón Uriarte Cantolla, profesor de la Universidad del País Vasco.

## ¿Qué es la vida?

La vida es, sin lugar a dudas, el fenómeno más complejo de todo el universo conocido. La única forma de definirla desde un punto de vista científico es recurrir a aquellas cualidades o propiedades que diferencian a la materia viva de la inerte. Estos atributos vitales básicos son cuatro: el orden, la información, la cognición y el movimiento.

¿Qué es la vida? Esta es la gran pregunta que nos llevamos formulando casi desde el momento que aprendimos a hacernos preguntas. Se la ha intentado definir desde todos los ángulos posibles: desde la religión, desde la filosofía, desde la superstición, desde la ética, desde el arte, desde la ciencia. La vida y sus manifestaciones alcanzan tal grado de diversidad morfológica y funcional que resulta difícil encerrar el fenómeno vida en una sarta de palabras o en vagos conceptos especulativos. Es posible que cada lector tenga su propia definición y sería una actividad interesante que cada cual meditara durante unos minutos y escribiera en el margen inferior de esta página su propia definición de vida. Hágalo a lápiz, por si tiene que modificar algo tras leer este libro.

La mejor aproximación para definir la vida, quizá la única posible, sea el recurrir a sus atributos fundamentales, a aquellas cualidades o propiedades que diferencian sin excusa a la materia viva de la inerte; lo que nos permite distinguir, por ejemplo, una rana de una piedra. Estos atributos vitales básicos son cuatro: el orden, la información, la cognición y el movimiento.

La vida es un dispositivo capaz de crear orden y mantenerlo a base de consumir grandes cantidades de energía, en particular la que proporciona el flujo de fotones que proceden del Sol. En palabras del físico y premio Nobel Erwin Schrödinger, en su libro *¿Qué es la vida?*, publicado en 1944, define a los seres vivos como aquellos sistemas caracterizados por ser estructuras altamente ordenadas, que sobreviven mediante la extracción continua de «neguentropía» (*negentropy*, o entropía negativa) de su entorno y alimentándose de ella. Los organismos son «máquinas antientrópicas» que necesitan procesar continuamente grandes cantidades de energía que captan del entorno (alimentación, respiración, luz solar) y con ello son capaces de acumular orden en medio de un universo que se desliza hacia el desorden; son capaces de remontar la escalera termodinámica de bajada de la entropía. Esta capacidad, que parece oponerse tenazmente al destino global del universo impuesto por la segunda ley de la termodinámica, que es el desorden y la tendencia a la disipación de la energía, es lo que hace de la vida el fenómeno extraordinario que es.

Podemos concluir que la vida puede considerarse un sistema complejo regido por la energía y sus transformaciones y que de manera continua se opone a la segunda ley de la termodinámica, ya que crea orden e información a partir del desorden y el caos. No existe ninguna piedra que sea capaz de tal proeza.

## LA INFORMACIÓN

La vida es también información. Los organismos, desde una bacteria hasta el ser humano, son entidades dotadas de orden y de complejidad. La información necesaria para establecer y mantener una estructura ordenada como un ser vivo no solo se refiere a cómo construir y hacer funcionar las células que forman el organismo o a la estructura y el funcionamiento de sus tejidos y órganos, también incluye las relaciones que mantienen los seres vivos entre sí y con el medio ambiente. La cantidad de información que se requiere depende del grado de complejidad: cuanto más complejo es un organismo, más información contiene.

La información es en sí misma una entidad ordenada. Por eso existe una estrecha relación entre energía, información y entropía. Esta idea se introdujo en 1948 de la mano y la mente del matemático Claude E. Shannon en su famoso artículo «Una teoría matemática de la comunicación» («*A mathematical theory of communication*»). Veamos un ejemplo. Si esparcimos por el suelo las letras de plástico de un juego infantil, allí sobre la alfombra tienen un elevado grado de desorden, es decir, mucha entropía, y no son capaces de transmitir ninguna información de interés. Si ahora nos ponemos a jugar con el niño intentando construir una frase con todas las letras, comenzamos a aplicar la energía que requiere la tarea: la que consume nuestro cerebro y la que gastan nuestros músculos al mantener la postura en el suelo y mover los brazos. Ese gasto energético se transforma en orden cuando logramos agrupar esas letras en una información coherente, como es una frase inteligible. El sistema ha ganado orden, ha perdido entropía y ha requerido un aporte de energía. Ahora contiene una información capaz de almacenarse y transmitirse. Un ser complejo que contenga mucha información será altamente no-entrópico u ordenado. Cuanto más orden y complejidad, más información será necesaria para establecer dicho orden y, por lo tanto, más energía se precisará.

La información en los seres vivos se almacena en numerosos dispositivos: genes, proteínas, membranas, sistema nervioso y estructuras extracelulares, como el tejido conectivo. Los organismos no solo albergan en sus genes y demás estructuras la información necesaria para mantener su orden, sino que son capaces de transmitir esa información (reproducción) para crear estructuras tan ordenadas y complejas como ellos mismos. Los seres vivos necesitan gastar mucha energía para mantener esa información y transmitirla. Veamos otro ejemplo de la relación entre orden, información y energía.

Nosotros venimos de la fusión de dos células: el óvulo de nuestra madre y el espermatozoide de nuestro padre. Estos gametos son ya estructuras muy ordenadas y contienen toda la información necesaria para construir nuestro organismo y hacerlo funcionar. La célula embrión formada comienza inmediatamente a dividirse, primero en dos células, luego en cuatro y así sucesivamente hasta formar los miles de millones de células que integran



nuestro cuerpo. Esas células van adoptando una distribución altamente ordenada y compleja, colocándose en posiciones específicas para construir los diferentes tejidos y órganos: la piel, los riñones, el cerebro, el corazón, el hígado, los pulmones, etc. Además, cada una de ellas lleva en su material genético la información necesaria para desempeñar la función que tiene asignada.

Todo este proceso de creación de una estructura extremadamente compleja y ordenada (de muy baja entropía) a partir de una sola célula y que alberga una enorme cantidad de información se opone al diseño general del universo y a las leyes fundamentales de la termodinámica. Esta proeza requiere un gran aporte de energía que proporciona la sangre materna, que llega al embrión a través de la placenta, o del calor que la gallina proporciona al huevo al incubarlo.

Este proceso de organización y aumento de la complejidad de nuestra estructura y función corporal continúa tras el nacimiento. Durante unos meses la energía necesaria para invertir la entropía la sigue proporcionando nuestra madre, a través de la lactancia. Tras el destete y durante el resto de nuestra vida vamos a mantener el orden y la complejidad gracias a la energía de los alimentos que ingerimos y al oxígeno que respiramos, que procesan nuestras moléculas y células, como luego explicaremos.

## LA COGNICIÓN

Para disponer de una adecuada información, todos los seres vivos necesitan detectar las variaciones físicas y químicas que suceden tanto en el mundo exterior en el que habitan como en su propio mundo interior. Procesan esa información y elaboran las respuestas que les proporcionan más ventajas de supervivencia y de reproducción.

Una planta capta los fotones de la luz solar y orienta el crecimiento de sus ramas y de sus hojas en la dirección que les permita obtener más energía. Una gacela percibe mediante el olfato las sustancias volátiles que emanan de una leona, procesa la información en su cerebro y elabora una respuesta adecuada, que es la de salir corriendo. Usted puede que haga unas horas que comió y su estómago vacío comienza a contraerse. Esta información llega a su

cerebro, que la percibe como sensación de hambre y elabora la respuesta adecuada, que es levantarse del sillón e ir a la cocina a buscar algo que picar. Pero existen interacciones cognitivas más complejas. Cuando regresa a su asiento, en la radio emiten una canción que le trae gratos recuerdos de su juventud. Esos sonidos llegan al cerebro, se procesan, se conectan con recónditas áreas cerebrales y desencadenan en usted una reacción emocional y la liberación de ciertas hormonas que llenan su organismo de una sensación de placentera nostalgia. Los esquemas básicos de todos estos procesos, desde los más simples a los más complejos, ya surgieron hace miles de millones de años con las primeras células: las bacterias.

A todo ese conjunto de procesos los vamos a denominar «cognición» por su semejanza al término que se utiliza en la literatura científica en inglés, *cognition*. Cognición, según el diccionario de la RAE, significa «conocimiento», y según la biología es el conjunto de mecanismos por los cuales los seres vivos adquieren, procesan, almacenan y actúan sobre la información recibida del entorno o de su propio interior. Esto incluye percepción, aprendizaje, memoria y toma de las decisiones más adecuadas en relación siempre con la supervivencia y reproducción del individuo. Según quién lo diga y en qué contexto, a estos procesos también se los denomina conocimiento, inteligencia, actividad mental, instintos e incluso consciencia.

La información respecto a las señales cognitivas se transmiten mediante cuatro sistemas que están interconectados y funcionan de manera coordinada: el citoesqueleto, el tejido conjuntivo, el sistema endocrino y el sistema nervioso.

El citoesqueleto forma el armazón interno de las células mediante un sistema complejo de proteínas que, por su aspecto, se denominan microtúbulos y microfilamentos. En cada célula, estas estructuras constituyen un sistema de generación y de transmisión de información. En los organismos unicelulares, como es el caso de las bacterias, funciona como una especie de sistema nervioso intracelular. Cada una de nuestras células, en especial las nerviosas, contienen este complejo sistema tubular que cumple funciones de información. Hay científicos que sugieren que en el sistema de microtúbulos de las neuronas reside esa función tan especial de los seres humanos como es la consciencia, e incluso el alma.

En los organismos pluricelulares, las células que forman sus diferentes tejidos y órganos están agrupadas y sostenidas por una especie de armazón fibroso, compuesto por grandes moléculas de proteínas y carbohidratos complejos, que se denomina tejido conectivo o conjuntivo. Estas estructuras moleculares rodean las células, las agrupan, las sostienen y las conectan unas con otras. Su sistema de transmisión de información es aún poco conocido, pero podría ser el responsable de numerosas enfermedades de las que no sabemos la causa, como es el caso de la fibromialgia y de algunas técnicas curativas de las que tampoco entendemos cómo actúan, como es el caso de la acupuntura.

El sistema endocrino es un mecanismo de transmisión de información que utiliza unos mensajeros denominados hormonas, que viajan por líquidos corporales como la sangre y los fluidos extracelulares llevando la información a donde se requiera. Incluso cada célula contiene en su interior su propio sistema de mensajería, por ejemplo, algunos iones como el calcio o unas moléculas denominadas nucleótidos cíclicos, que interconectan las diferentes partes de ese mundo complejo que es una célula para dotarla de un funcionamiento coordinado.

El sistema nervioso es el sistema de información más moderno en la evolución y exclusivo de los animales. Fue diseñado por la selección natural para permitir enviar señales a largas distancias y a gran velocidad. Consta de una central de procesamiento de información que es el cerebro, más o menos desarrollado según las necesidades de las diferentes especies, y una red de cableado (los nervios) capaz de conducir el impulso nervioso hasta donde se necesite.

## EL MOVIMIENTO FINALISTA

La vida es movimiento. Todos los componentes subatómicos, atómicos y moleculares de los seres vivos vibran y se mueven. Pero, además, todos los organismos están dotados de la capacidad de desplazarse a través del espacio. Todo se mueve dentro de cualquier ser vivo, ya se trate de una simple célula o de una persona. Si miramos en el microscopio el interior de una ameba, vemos que sus orgánulos están en continuo movimiento, lo mismo que el protoplasma

que llena su interior y sus microtúbulos. En un organismo pluricelular se mueven cada una de los billones de células que lo forman y también órganos como el corazón, los pulmones o los intestinos. El cerebro funciona gracias al movimiento de las corrientes eléctricas (los potenciales de acción o impulsos nerviosos) que son conducidas a través de las fibras nerviosas. Los músculos se contraen gracias al movimiento de sus proteínas contráctiles, que se activan también por diferencias de potenciales eléctricos.

El movimiento de los seres vivos no es un desplazamiento puramente físico, como pueden ser las mareas o las órbitas de los astros en el universo o el movimiento caótico (browniano) de las partículas pequeñas suspendidas en el agua. El movimiento en los seres vivos tiene una finalidad que confiere una ventaja de supervivencia, de defensa o de reproducción.

El movimiento es fácil de apreciar en algunas formas de vida, como un pez, una gacela o un protozoo (este último con la ayuda de un microscopio). Otros organismos como las plantas dan la impresión de que no se mueven mucho. Pero no confundamos el movimiento con los saltos o las carreras. Un árbol se mueve buscando alimento a través del crecimiento de sus ramas y de sus raíces. Si metemos una planta en un cajón cerrado excepto por un pequeño agujero, al cabo de unos días comprobaremos que todas sus ramas han crecido en la dirección de la luz y han acabado saliendo fuera de la caja. También hay flores que se cierran cuando empieza a oscurecer y se abren cuando sale el Sol (o lo contrario). Las plantas se mueven para reproducirse mediante los ingeniosos sistemas desarrollados para transmitir la información que disemina su polen, incluso a largas distancias. Se mueven para defenderse de sus principales enemigos, como son la sequía o las oscilaciones térmicas, mediante el movimiento de su savia. Incluso hay plantas carnívoras que activan ingeniosas trampas para capturar a sus presas.

El movimiento de los seres vivos requiere el aporte de energía y unos dispositivos que lo permitan. En el caso de los animales, estos dispositivos son unas proteínas capaces de contraerse y generar tensión. En los animales pluricelulares estas proteínas contráctiles suelen estar agrupadas en unas estructuras que denominamos músculos.

Vemos que la acción de moverse es un elemento esencial de la vida. Ya lo dijo Albert Einstein: todo en la vida es vibración (y movimiento). Los seres humanos estamos diseñados por la evolución para movernos continuamente. Esta es la razón por la que el ejercicio físico ajusta nuestro diseño natural y nos proporciona salud. Por el contrario, su ausencia, el sedentarismo, se opone a nuestro diseño natural y es la causa de numerosas enfermedades. Todo este asunto del movimiento y la salud lo traté con amenidad y detalle en el libro *Razones para correr*, de Ediciones B. Su título anima a que nos pongamos en paz con nuestro diseño y nos ejercitemos con salud caminando o trotando, según nuestras preferencias.

## El origen de la vida

Desde el primer ser vivo, el ancestro común a todos los seres vivos o LUCA, las formas de vida que han poblado y pueblan el planeta han tenido que cumplir con cuatro obligaciones ineludibles, las que denominaremos, con mayúsculas, las Fuerzas de la Vida: nutrirse, reproducirse, defenderse y agruparse. Estas fuerzas han impulsado toda la evolución biológica de los seres vivos y nuestra propia evolución biológica y cultural. Incluso han determinado nuestra historia.

No sabemos cómo surgió la vida en la Tierra. Desconocemos por completo los mecanismos que permitieron que la vida se desarrollara a partir de la materia no viva. Pero sí conocemos cuándo ocurrió tal proeza. Existen pruebas concretas de la precoz presencia de los primeros seres vivos en nuestro planeta.

En los primeros millones de años tras su formación (es lo que se denomina eón hádico), las condiciones de vida en la Tierra no debieron de ser muy agradables. La corteza se iba enfriando y solidificando, pero el magma incandescente, aún muy superficial, originaba continuos fenómenos volcánicos de extraordinaria intensidad que lanzaban grandes cantidades de material incandescente. Hace cuatro mil millones de años la atmósfera estaba compuesta de gases como metano, sulfídrico, anhídrido carbónico y amoníaco, entre otros. La ausencia de la capa de protección de ozono no frenaba la peligrosa radiación ultravioleta. Las aguas que iban llenando el globo estaban calientes y disolvían gran parte de los gases que lanzaban los volcanes. Por todas partes surgían manifestaciones termales en las que el agua hirviendo brotaba a través de numerosas grietas, la mayor parte de ellas, en el fondo del mar.

Diversas pruebas geológicas demuestran que la vida surgió muy pronto, hace tres mil ochocientos millones de años, y en las peores condiciones fisicoquímicas imaginables. Este nacimiento difícil otorgó a la vida su fuerza y su extraordinaria capacidad para superar todas las dificultades que se le fueron presentando a lo largo de más de tres mil millones de años de evolución hasta nuestros días. Todos los datos, por tanto, sugieren que no tuvo que esperar a que la Tierra se convirtiera en un planeta de cuento de hadas y condiciones edénicas. La vida se abrió paso en cuanto pudo entre magmas incandescentes y gases venenosos.

En el oeste de Groenlandia se han encontrado rocas sedimentarias datadas alrededor de tres mil ochocientos millones de años de antigüedad. Estos sedimentos estaban depositados en aguas profundas, muy por debajo de la zona a la que podía llegar la luz del sol. Contienen capas fangosas ricas en carbono y mediante análisis isotópicos muestran características similares a los lodos ricos en materia orgánica de los océanos modernos. La única posibilidad es que esas acumulaciones procedieran de células fotosintéticas que prosperaron en la superficie del océano primordial y al morir se fueron depositando en el fondo del océano. Estos datos nos obligan a aceptar un origen muy precoz de algunas formas organizadas de vida, como es el caso de las células fotosintéticas: hace tres mil novecientos millones de años, apenas unos quinientos millones de años después de la formación incandescente de la Tierra. También existen datos geológicos de células que prosperaron hace entre tres mil doscientos y tres mil quinientos millones de años en aguas someras.

### ¿CÓMO SURGIÓ LA VIDA?

A pesar de los enormes avances científicos y tecnológicos que se han producido en los últimos años, seguimos sin saber cuáles fueron los mecanismos que permitieron que apareciera en nuestro planeta el primer ser vivo completo, del que derivaron todo el resto de los organismos que viven o han vivido sobre la Tierra. La clave, aún no resuelta, consistiría en dilucidar cuáles fueron los mecanismos que permitieron que surgiera la vida ordenada y orgánica a partir de un entorno desordenado e inorgánico. Cualquier hipótesis

debería poder explicar cómo ese primer ser vivo logró dotarse de mecanismos para captar la energía, fundamentalmente de los fotones solares, y desarrollar los atributos que caracterizan cualquier forma de vida, hasta la más elemental: orden, información, cognición y movimiento finalista.

Aunque desconocemos por completo cómo se pudo formar la primera célula con vida autónoma, podemos asegurar que para que eso ocurriera se necesitaron cuatro requisitos indispensables: una membrana que separara su interior ordenado del desorden del ambiente externo, una fuente de energía capaz de proporcionar el orden e información necesarios, unos sistemas que le permitieran captar, almacenar, procesar y transmitir información, y los mecanismos para generar un movimiento finalista.

## LA INTIMIDAD BIOLÓGICA

Para que pueda existir un sistema ordenado en medio de un entorno desordenado es indispensable una delimitación, una separación entre ambos mundos. Todas las membranas de las células poseen un armazón básico formado por una doble capa de lípidos complejos (principalmente fosfolípidos y colesterol). Su formación espontánea no plantea ningún problema desde el punto de vista físico, ya que estas moléculas grasas tienden a agruparse cuando se las pone en un medio acuoso. Forman vesículas esféricas en las que su cola o parte hidrofóbica (no soluble en agua) queda en el interior y sus cabezas o partes hidrófilas están en contacto con el agua, en el exterior. Usted mismo en casa puede formar estas estructuras poniendo un poco de aceite en un frasco con agua y una gota de jabón líquido. Tras agitarlo verá la formación de las esferas de grasa. Esto se debe a una propiedad física que es la tensión superficial (es lo que hace que el jabón limpie la grasa). Debido a estas cualidades físicas, una doble capa de fosfolípidos puede formar una barrera estable entre dos compartimentos: el interior y el exterior celular.

La ventaja de este sistema es que lleva asociado la clave de la división celular, que es el mecanismo básico de la reproducción. Cuando la célula crece, aumentan los lípidos en su membrana hasta que llega un momento en que



se supera la relación óptima que debe existir entre superficie y volumen y se altera la tensión superficial, lo que conduce a que esa burbuja grande se divida en dos más pequeñas.

El problema para dilucidar cómo se formó la primera membrana celular es químico, ya que se requiere un entorno que contenga estos lípidos en una elevada concentración y cualquier científico sabe que para fabricar estas moléculas a partir de sus componentes básicos se requieren complejas reacciones que deben suceder en una determinada secuencia y bajo unas condiciones muy precisas de presión y de temperatura. ¿Cómo pudieron formarse espontáneamente estos fosfolípidos en la Tierra primitiva y en elevadas concentraciones? Ni idea, pero algunos sugieren que pudo ocurrir en fumarolas y chimeneas hidrotermales en el fondo del océano. En presencia de calor algunos minerales como los sulfuros pudieron catalizar la formación de ácidos grasos de diversa longitud a partir de moléculas más sencillas, que luego se liberarían al agua que rodeaba estas estructuras termales. Los fotones de elevada energía (luz ultravioleta) que alcanzaban la superficie del planeta recién nacido pudieron catalizar la formación de enlaces para sintetizar las moléculas grasas elementales. En la actualidad siguen funcionando mecanismos similares. Por ejemplo, el que utilizan los fotones de luz ultravioleta (del Sol o de una cabina de un centro de estética) para sintetizar la vitamina D (una grasa) en nuestra piel o para estimular la melanina y ponernos morenos.

## LA VIDA ES ELECTRICIDAD ORGANIZADA

La aparición del primer ser vivo exigió esta separación entre el medio interno, todo lo que constituye la intimidad de ese ser vivo, y el medio externo, todo el resto del universo. Y esto originó una situación que es la clave de todo el fenómeno al que llamamos vida: la creación de la diferencia de potencial eléctrico que existe entre el exterior y el interior de todas las células. Desde una simple bacteria hasta una neurona de nuestro cerebro, tienen un interior eléctricamente negativo con respecto al exterior; todas las células son minibaterías eléctricas. En nuestras neuronas esto origina una diferencia de potencial de  $-90$  milivoltios. Esta fuerza eléctrica es la clave de la vida. En

todas las membranas celulares existen unas sustancias especiales, las proteínas canales, que permiten el paso, hacia dentro o hacia fuera de la célula, de determinados iones positivos (les faltan electrones), como el sodio, el potasio o el calcio, y negativos (les sobran electrones), como el cloro. La inundación repentina de las células por iones positivos, fundamentalmente sodio, ocasiona un cambio de polaridad de la célula (despolarización): el interior se hace más positivo (o menos negativo) y esta es la señal universal de emergencia celular. Este mecanismo es el que hace funcionar todas las células y en especial los llamados tejidos excitables: el músculo y el sistema nervioso. Esta diferencia de potencial celular es una de las claves de la vida.

Usted está ahora leyendo e interpretando estas palabras gracias a que los fotones de longitudes de ondas entre cuatrocientos y setecientos nanómetros que emite la página del libro, cuando interaccionan con los receptores de las células de la retina originan en estas un cambio en la polaridad eléctrica de los conos y bastones, las células retinianas. Se genera una corriente eléctrica, un impulso nervioso, que viaja por ese cable que es el nervio óptico y llega a las neuronas de su lóbulo occipital. Millones de neuronas se despolarizan y mandan sus señales coordinadamente para crear en su cerebro esa capacidad de comprender el sentido que encierran unas simples marcas de color negro sobre un fondo blanco.

Pero seguimos en las mismas. No se dispone del menor atisbo de cómo estas moléculas de proteínas canales se incrustaron en las membranas de los primeros esbozos de seres vivos y permitieron que esa primera célula se convirtiera en un dipolo eléctrico.

## EL PROCESAMIENTO DE LA ENERGÍA

Cualquier intento de analizar el origen de ese proceso único que es la vida sin reconocer y tener en cuenta sus características termodinámicas es un grave error.

Cualquier ser vivo necesita procesar gran cantidad de materia y de energía. Esa enorme tarea se logra mediante la actuación de unas moléculas de proteínas que se denominan enzimas. Hasta la bacteria más simple contiene cientos de moléculas diferentes de proteínas, cada una de las cuales está

formada por la unión de varios cientos de unidades de otras moléculas más sencillas denominadas aminoácidos, que forman largas cadenas, como hemos visto en el ejemplo de la insulina. Todas las proteínas que existen están formadas por mezclas diversas de los mismos veinte aminoácidos. Estos se tienen que ensamblar en esas cadenas siguiendo un orden preciso, exacto. Un solo error y la proteína ya no ejercería su función. Una vez formada la proteína, se pliega por efecto de los enlaces y atracciones electrostáticas entre varios átomos de su propia cadena y es entonces cuando adquiere todas sus propiedades funcionales.

Este es otro de los principales escollos para explicar el origen de la vida. Hasta el momento de escribir estas líneas nadie ha logrado demostrar mediante qué mecanismo pudo formarse espontáneamente una proteína funcional. El bioquímico ruso A. Oparin propuso en 1930 su hipótesis de la sopa química. Decía que hace miles de millones de años reinaban unas condiciones extremas de temperatura y presión y que las aguas calientes de las lagunas costeras contenían una elevada concentración de algunas moléculas elementales como anhídrido carbónico, metano, amoníaco, sulfuros, cianuros y otros compuestos que se podían formar por la actividad geotérmica y también aportarse desde el espacio. Tras millones de años de ensayos a ciegas, en esta sopa molecular pudieron formarse, de manera espontánea, las primeras moléculas esenciales para la vida. También pudieron darse estas condiciones favorables en los entornos hidrotermales (en las fumarolas) del fondo de los océanos. Estas biomoléculas primitivas se moverían de forma natural debido al efecto browniano acelerado por la alta temperatura, chocarían azarosamente entre sí, recibirían el ataque de la elevada energía de los fotones ultravioleta y se formarían nuevos enlaces entre átomos. Y así, a lo largo de millones de intentos durante cientos de millones de años, se irían produciendo estructuras cada vez más complejas.

En 1953 un joven bioquímico, Stanley Miller, intentó reproducir estas condiciones en su laboratorio haciendo circular durante horas una mezcla de moléculas orgánicas elementales, como las que debían de existir en la atmósfera y en las aguas primitivas, a las que sometió a continuas descargas eléctricas para simular rayos. Obtuvo algunas moléculas de una cierta complejidad, incluido algún aminoácido; pero nada que ver con la formación

de una proteína completa. La realidad es que no existe ninguna prueba concluyente, ningún experimento, que demuestre que por este mecanismo se pudieran formar espontáneamente moléculas tan complejas como las proteínas sin el concurso de un ser vivo; Stanley Miller lo era. El bioquímico N. Lane escribe que los aminoácidos contenidos en un caldo concentrado nunca se unirán espontáneamente en el orden adecuado para formar una proteína. Los aminoácidos son muy poco reactivos y en las células vivas hay que activarlos mediante la actuación de las enzimas o de los ácidos ribonucleicos.

En un entorno abiótico, una proteína funcional de quinientos aminoácidos solo se podría lograr si suponemos que existe un mecanismo imaginario capaz de reunir esos quinientos aminoácidos, uno a uno, insertándolos en una secuencia correcta. Si en medio del proceso se introduce alguna molécula extraña o la larga cadena se rompe al colocar el aminoácido 499, hay que comenzar de nuevo desde el principio. Hoy día la ciencia no dispone de explicación de cómo pudo ocurrir un proceso tan complejo sin la presencia de un ser vivo y sin el aporte sistemático de energía.

Los matemáticos han calculado la probabilidad de que los aminoácidos presentes en una solución acuosa se enlacen de manera espontánea para formar una sola proteína funcional, y es del orden de uno entre  $10^{167.636}$ . Esta probabilidad es tan pequeña que prácticamente es imposible que ocurra en un tiempo finito, aunque este fuera muy largo. Claro que cualquier aficionado a la lotería puede señalar que le puede tocar el premio gordo si aumentan mucho el número de intentos (comprar millones de boletos) durante el tiempo suficiente (juega durante miles de años). Pero en el caso del origen de la vida, el tiempo es sorprendentemente breve. Ya hemos avanzado que los estudios geológicos señalan, sin lugar a dudas, que las primeras formas de vida ya estaban presentes, en cantidad suficiente para acumularse y ser detectadas en sedimentos, algunos cientos de millones de años tras la formación de la Tierra. Por ello, dada la premura con la que surgieron las primeras formas de vida en el planeta, los científicos no encuentran el mecanismo que pudo formar por azar las primeras proteínas en un tiempo tan breve.

También se ha propuesto que estas moléculas esenciales para la vida (o incluso formas completas de vida primitiva) pudieron tener un origen extraterrestre y que llegaron a la Tierra transportadas por cometas o

asteroides; claro que esta hipótesis solo traslada el mismo problema a otros mundos. También se ha propuesto que la vida podría haber surgido a gran profundidad en el interior del planeta. Son solo especulaciones. En realidad, por el momento no sabemos nada en absoluto del origen de las moléculas complejas que caracterizan la vida, ni por supuesto del origen del primer ser vivo autónomo.

### ¿ADÓNDE IBA LA CACA?

La hipótesis de los pocillos de caldo prebiótico de Oparin en los que surgirían aleatoriamente los primeros esbozos de seres vivos tiene un problema. Como apunta N. Lane, la gente se olvida de los desechos. Un ser vivo no puede existir si no ocurren en su interior complejas reacciones. Pero las reacciones metabólicas son equilibrios que solo pueden proseguir en la dirección adecuada si se va retirando el producto final. En una célula, la velocidad a la que se forman, por ejemplo, nuevas proteínas o nuevos lípidos depende de la velocidad de entrada de los precursores necesarios (aminoácidos, ácidos grasos) y de la velocidad de eliminación de los residuos (metano, CO<sub>2</sub>, agua, etanol) y de los productos de la reacción, las proteínas. Si estos productos no se eliminan y se acumulan, las reacciones bioquímicas se interrumpen o incluso trascurren en sentido contrario. A la hora de explicar el origen de la vida, los defensores de la sopa química no han resuelto el problema que ocasionaría la acumulación de los residuos junto con los precursores en ese caldo caliente primordial o en la chimenea hidrotermal. Incluso Miller en sus experimentos de laboratorio tuvo buen cuidado de colocar un dispositivo con un pequeño grifo por el que iba retirando las moléculas que se iban formando para que no se acumulasen en el circuito.

### EL ALMACENAMIENTO Y TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN

La vida es información además de orden. En el espacio de una milésima de milímetro, cada célula almacena en forma de ácidos nucleicos tanta información como la de toda la Enciclopedia Británica. Una cucharadita

pequeña de ADN (ácido desoxirribonucleico) podría almacenar la información contenida en todos los libros publicados por la humanidad. El origen de la vida es el origen de la información. Diversos experimentos sugieren que las primeras moléculas sintetizadas fueron ácidos nucleicos y que quizá las primeras formas de vida eran meros sacos lipídicos que almacenaban en su interior agua, sales minerales, algunas moléculas sencillas y algunas moléculas de ARN (ácido ribonucleico). Es difícil entender cómo podrían haberse construido las primeras proteínas sin disponer de las instrucciones genéticas pertinentes. Hoy día todas las proteínas de todos los seres vivos se fabrican bajo la supervisión de un estricto código genético que está inscrito en la secuencia de las moléculas que forman los ácidos nucleicos. Este código es universal. Una bacteria, una lombriz de tierra, un elefante o una persona utilizan el mismo idioma para almacenar y transmitir su información genética. Esto, entre otras cuestiones, señala ineludiblemente el origen común de todos los seres vivos.

Una de las características que debería poseer una molécula primordial es su capacidad de autorreplicarse, de fabricar una copia de sí misma siguiendo su propio patrón. Si no fuera así, una vez formada de manera aleatoria la primera protocélula, desaparecería sin descendencia. Una molécula con estas características es el ya mencionado ácido ribonucleico, que es capaz de catalizar numerosas reacciones químicas incluidas las involucradas en la síntesis de proteínas y en la fabricación de una copia idéntica de sí mismo. Por eso, muchos piensan que los elementos clave del origen de la vida fueron estas moléculas catalíticas y autorreplicantes que predominaron durante un primer período de la evolución de la vida. Es lo que se denomina «el mundo del ARN».

Pero una molécula de ARN es de gran complejidad, ya que está formada por el enlace de una secuencia específica de cuatro (o cinco) tipos de moléculas complejas, que son los nucleótidos o bases nitrogenadas (adenina, timina, guanina, citosina y uracilo). ¿Cómo se formaron los nucleótidos en concentración suficiente en un mismo lugar? ¿Cómo se unieron en cadenas con una secuencia precisa para crear un ARN autorreplicante y con capacidad para almacenar información válida para generar y mantener la vida? ¿Cómo esos replicantes se metieron dentro de una gota lipídica para comenzar a

multiplicarse en su confortable interior? No lo sabemos. De nuevo se plantea el misterio de cómo se pudo sintetizar una sola molécula de ARN funcionalmente útil sin el concurso de las enzimas y los orgánulos celulares correspondientes, como los ribosomas.

Si volviéramos a preguntar al matemático sobre las posibilidades de que se formara por azar un ácido nucleico sencillo en algún pocillo de aguas termales hace miles de millones de años y que fuera capaz de meterse dentro de una burbuja formada por una doble capa lipídica, nos indicaría una improbabilidad semejante a la descrita para la formación espontánea de las proteínas. Lo miremos desde el ángulo que queramos, la vida es un fenómeno altamente improbable; es prácticamente imposible en términos de probabilidad matemática y sobre los datos que disponemos en la actualidad. Pero aquí estamos.

#### LA COGNICIÓN Y EL MOVIMIENTO FINALISTA

Estas dos propiedades de los seres vivos están relacionadas tanto desde el punto de vista estructural como funcional. Surgieron ya cuando existían algunas protocélulas dotadas de sistemas elementales de procesamiento de energía y almacenamiento de información. Esto también ocurrió muy pronto. Según propuso hace años Lynn Margulis, la clave para ambas funciones está en el desarrollo de las estructuras de los citoesqueletos. Ya sabemos que están formados por una proteína llamada tubulina que se enrolla para formar unas estructuras en forma de cilindros, que son los llamados microtúbulos. Los seres unicelulares primitivos, como muchos de los que existen en la actualidad, se valían de este citoesqueleto para mantener su estructura y para procesar sensaciones, información y locomoción. En resumen, el citoesqueleto organiza la conducta inteligente en los organismos más sencillos. Incluso Margullis sugiere que estas estructuras permitirían un nivel elemental de consciencia en estos primeros organismos unicelulares.

En la parte exterior de la membrana celular, estos túbulos dieron lugar a los elementos motores básicos, los cilios y los flagelos, que permitieron la motilidad intencional a las primeras bacterias. Para ello los microtúbulos

adquirieron propiedades contráctiles. El aporte de energía producía el acortamiento y elongación de estas estructuras en la superficie celular y permitía el movimiento de la célula.

Más tarde algunas de estas proteínas tubulares se adaptaron para realizar funciones sensoriales básicas como el quimiotaxismo. Es el movimiento dirigido de una o más células hacia determinadas condiciones externas al organismo, lo que les permite encontrar mejores condiciones de supervivencia, defensa o reproducción. El flagelo es uno de los grandes inventos de la ingeniería biológica. Se trata de un dispositivo compuesto de proteínas contráctiles tubulares, además de ser un captador de energía. Cuando esta le llega, el rotor del flagelo se activa, gira y la célula se mueve en la dirección correcta: se acerca a la fuente energética o se aleja del tóxico.

Ya veremos que a lo largo de la evolución el sistema de microtúbulos y microfilamentos permitió el desarrollo del sistema nervioso en los seres vivos pluricelulares. Muchos de los receptores sensoriales de los vertebrados que vivimos en la actualidad son realmente cilios modificados (olfato, audición, visión, etc.).

## LA EVA UNICELULAR

Es posible que se hicieran millones de ensayos a lo largo de millones de años, la mayor parte de los cuales fracasaron. Pero un linaje logró encontrar el modo de prosperar en las condiciones que reinaban en el joven planeta Tierra. Y nosotros somos descendientes de aquella única célula primitiva que sobrevivió y a la que se denomina LUCA, por el acrónimo de *Last Universal Common Ancestor* (Antepasado más antiguo común a todos los seres vivos actuales). Este fue el primer organismo del que todos (bacterias, plantas y animales) procedemos y existen pruebas de que ya estaba vivo en la Tierra hace más de tres mil quinientos millones de años.

Esto es lo único demostrable: que todos los seres vivos que poblamos en la actualidad el planeta procedemos de una única célula. Todos los organismos, desde las bacterias hasta los humanos, estamos compuestos de las mismas moléculas: glúcidos, lípidos, proteínas y nucleótidos, con estructuras muy parecidas, cuando no idénticas. La biología molecular ha revelado,



además, que las moléculas, al igual que lo hacen las estructuras corporales, evolucionan a lo largo del tiempo. De esta manera, al comparar las secuencias de aminoácidos de algunas proteínas en distintas especies, las mayores diferencias se dan entre aquellas que están evolutivamente más alejadas, mientras que las estructuras son muy parecidas o idénticas en las especies más próximas. Las proteínas de un huevo de gallina o de la leche de vaca son más parecidas a las proteínas humanas que las de un garbanzo o una lechuga.

Otro argumento es el metabólico. Una bacteria metaboliza la glucosa para obtener energía de manera exacta a como lo hacen las células de nuestro hígado. Finalmente, un dato de gran importancia que apoya la evolución de todos los organismos a partir de un antecesor común es que el código genético es el mismo para todos los seres vivos sin excepción. Es decir, el mensaje cifrado en forma de secuencia de bases nitrogenadas que contiene el ADN se interpreta de la misma manera en cualquier ser vivo, sea una bacteria, un alga, un hongo, un hipopótamo o un señor de Cáceres. Como ya se dijo, el código genético es universal y está escrito en el mismo idioma para todas las formas de vida. Hay numerosos ejemplos. Se puede insertar el trozo del ADN de un alga fosforescente en el embrión de un ratón y nacerá un ratón fosforescente. Ese ADN, de una especie tan alejada a un mamífero, es perfectamente interpretable por el sistema de lectura genética del ratón.

Lo único cierto es que nuestra primera madre bacteriana (LUCA) solo pudo sobrevivir, prosperar y generar descendencia si el azar de las interacciones moleculares que le dieron origen le permitió desarrollar progresivamente los atributos que caracterizan la vida: orden, información, cognición y movimiento. Pero para prosperar y generar descendencia válida, además, tuvo que desarrollar unas facultades fisiológicas indispensables: las Fuerzas de la Vida, las capacidades fisiológicas necesarias para desarrollar y mantener tales atributos. Son la nutrición, la reproducción, la defensa frente a cualquier peligro y la socialización o agrupamiento. Estas poderosas fuerzas rigen desde entonces la vida y las manifestaciones de todos los seres vivos que han existido, existen y existirán, incluidos nosotros mismos. Ya veremos con numerosos ejemplos que no hay ninguna acción que pueda realizar un organismo, ya sea bacteria, planta, animal o ser humano, que no esté inspirada y motivada por el cumplimiento eficaz de las Fuerzas de la Vida.

## LA NUTRICIÓN

La primera Fuerza de la Vida obliga a todos los seres vivos a captar energía y materia de su entorno, a eliminar en ese mismo entorno los desechos materiales y a disipar la energía en forma de calor. Por ello, todo organismo debe poseer un sistema que le permita realizar esta captación de nutrientes con la que acrecentar su propio orden y sustentar la complejidad que le da el atributo de la vida.

La nutrición consiste en extraer parte de la energía que contienen determinadas sustancias a las que denominamos alimentos. O, en el caso de las plantas, captar directamente la energía de los fotones del Sol y el agua y los minerales del suelo. Mediante ella cualquier ser vivo, a través de la membrana celular (bacterias y células), de las raíces y las hojas (las plantas) o de estructuras especializadas, como el aparato digestivo, los pulmones y las branquias (los animales), puede intercambiar energía y materia con el entorno para permitir el desarrollo de sus atributos vitales. Además, la nutrición implica la necesidad de eliminar aquellos productos de desecho metabólico que no sean beneficiosos o que puedan ser perjudiciales.

## LA REPRODUCCIÓN

Los seres vivos deben disponer de un sistema eficaz de información y de un soporte capaz de almacenarla, usarla y transmitirla a otros individuos. Esta es la misión de la segunda Fuerza de la Vida, que es la reproducción.

La función que desempeñan los seres vivos es muy compleja; no resulta nada fácil eso de oponerse al destino global del universo. Para administrar los grandes flujos de energía que se precisan para crear orden y organizar los sistemas de relación con el medio ambiente (cognición), los seres vivos requieren el funcionamiento coordinado y preciso de mecanismos muy intrincados. Toda esa maquinaria requiere un manual de instrucciones que permita su construcción y la haga funcionar con las mayores garantías de fiabilidad.

El genoma es el complicado *software* molecular que alberga la mayor parte de esa información. Hoy día conocemos bastante bien cómo se almacena la información en un código de cuatro letras (nucleótidos) sobre la molécula del ácido desoxirribonucleico (ADN), cómo se utiliza esa información para sintetizar todas las proteínas que construyen un ser vivo y lo hacen funcionar, y también cómo esa información se transmite a otros organismos mediante la reproducción. Pero ya vimos que no tenemos ni idea de cómo pudieron surgir estas unidades moleculares de almacenamiento en las primeras formas de vida. Cada ser vivo debe poseer la capacidad de producir réplicas aproximadas de la información que alberga y así dar lugar a la multiplicación y dispersión de copias de sí mismo, tan ordenadas y complejas como el modelo. Todo aquello que puede utilizar los recursos energéticos del mundo para lograr reproducciones de sí mismo, está vivo.

Las primeras células se reprodujeron de manera automática, probablemente porque tras unas pocas horas de vida aumentaban de tamaño. Esto ocasionaba una incompatibilidad física de la estructura lipídica de su membrana, que se rompía en un punto y, de inmediato, volvía a unir sus fragmentos dando lugar a dos células hijas. Puede que al principio el contenido de la célula madre se repartiera de manera arbitraria entre las dos células hijas. Pero con el tiempo se desarrollaron mecanismos que permitieron que se duplicara la información genética de la célula madre antes de la escisión para que así las dos células hijas recibieran un juego completo de genes y el mismo nivel de información.

De este modo nació el mecanismo de reproducción asexual, que ha persistido con éxito hasta nuestros días a lo largo de, al menos, tres mil millones de años de evolución. Numerosos seres vivos que viven en la actualidad se reproducen por este sistema. Las bacterias y los protozoos se dividen por simple partición celular. Muchos habrán observado con un microscopio una gota de agua de charco. Habrán seguido las rápidas evoluciones de un paramecio buscando comida y habrán visto cómo, de repente, algo sucede y ¡zas!, la célula se convierte en dos y cada célula hija sale corriendo por su lado.

El crecimiento de una población bacteriana es exponencial, ya que duplica su tamaño en cada generación. N. Lane recalca que la fuerza de este mecanismo tan simple es de tal magnitud que si, por ejemplo, no existiera ninguna restricción, una única bacteria de *E. coli* que se duplica cada treinta minutos produciría una colonia del tamaño de todo el planeta en solo tres días.

## LA DEFENSA

Cualquier ser vivo debe disponer de las capacidades necesarias para defenderse de los peligros que le acechan. Es la tercera Fuerza de la Vida.

Desde sus inicios, la vida ha estado expuesta a una enorme variedad de peligros químicos, físicos o biológicos. Por ello la evolución ha ido diseñando mecanismos de defensa para proteger a cada organismo de los riesgos que podrían afectar su supervivencia y su capacidad de reproducción. Las primeras formas de vida tuvieron que disponer de sistemas elementales que les permitieran soslayar alguna situación peligrosa para su integridad. Posiblemente lo primero fue el movimiento físico, azaroso y sin finalidad, como el browniano, que posee cualquier partícula sólida suspendida en un medio líquido. Así, los primeros esbozos de seres vivos se movían al azar de las sacudidas brownianas, que unas veces los llevaban inexorablemente hacia la muerte (aproximación a una fuente tóxica) y otras hacia la vida (desplazamiento hacia zonas más nutritivas). Esta lotería dinámica determinaba su supervivencia o su destrucción.

A lo largo de los miles de millones de años de evolución los organismos que poblaban los mares cálidos se vieron amenazados por los peligros que podemos sufrir cualquier ser vivo y que han persistido, con mayor o menor intensidad, desde los primeros momentos de la vida hasta la actualidad. Las amenazas biológicas, a consecuencia de la depredación por parte de otros seres vivos. Las amenazas químicas, por sustancias tóxicas que pueden destruir o inactivar nuestras moléculas y que pueden proceder tanto del mundo inorgánico como de los propios seres vivos (venenos). Las amenazas físicas como las variaciones de la temperatura y el efecto de las radiaciones. Las amenazas geológicas, como las erupciones volcánicas y los seísmos. Las amenazas climáticas, como las inundaciones, las sequías o los huracanes.

A lo largo de los millones de años de evolución de las formas unicelulares de vida, los microorganismos procariotas (sin núcleo) y eucariotas (con núcleo) que iban surgiendo desarrollaron formas muy elaboradas de defensa contra las posibles agresiones, basadas fundamentalmente en el movimiento, que es la manera más universal y eficaz de evitar una situación de riesgo. Con el tiempo, esta movilidad dejó de ser azarosa y adquirió finalidad y direccionalidad. Algunos microorganismos desarrollaron la capacidad de deformar su membrana y moverse emitiendo prolongaciones, como dedos (pseudópodos o falsos pies), que hoy persisten en las amebas de las charcas o en los leucocitos de nuestra sangre. Otros se dotaron de unas prolongaciones en sus membranas (cilios) que al moverse los impulsaban en el medio líquido, como podemos ver en los paramecios. Otros desarrollaron un apéndice o flagelo que al agitarlo a modo de cola los impulsaba hacia delante: este invento fue tan eficaz que ha persistido en la actualidad en numerosas células, desde algunas bacterias hasta los espermatozoides.

Algunos microorganismos que no necesitaban desplazarse para conseguir alimento desdeñaron el movimiento y desarrollaron defensas eficaces para protegerse, como es el caso de los fósiles calcáreos de las cianobacterias primitivas. Estas se agrupaban en grandes conglomerados llamados estromatolitos, unas formaciones rocosas construidas por la acumulación de carbonato cálcico como producto de desecho de la actividad de las colonias de cianobacterias. Son como piedras que no llaman la atención, grises y sin brillo ninguno; sin embargo, los científicos encontraron en la costa australiana (en la bahía Shark) unos estromatolitos vivos y pudieron demostrar que estos fósiles vivientes poseían actividad fotosintética. Se ha podido confirmar que los estromatolitos fósiles australianos están formados por cianobacterias gracias a la determinación de biomarcadores, unas moléculas características de las membranas de este tipo de bacterias. Cuando fosilizan adecuadamente generan unas formaciones microscópicas que son tan eficaces para su identificación como las huellas digitales lo son para las personas. Los estromatolitos fósiles más antiguos, datados en Australia y en Sudáfrica, tienen

tres mil quinientos millones de años de antigüedad. Es el registro fósil más antiguo que existe y confirma la precocidad de la aparición de la vida en la Tierra.

## EL AGRUPAMIENTO Y LA SOCIALIZACIÓN

Todos los seres vivos de una misma especie (y a veces de especies diferentes) tienden a agruparse de una manera más o menos permanente. Acabamos de ver cómo las cianobacterias, posiblemente los primeros seres vivos, aprendieron a agruparse formando colonias calcáreas. A lo largo de la evolución veremos cómo cada ser vivo (animal, vegetal o bacteria) ha desarrollado una forma eficaz de agruparse (rebaño, colmena, bosque, formación calcárea, ciudad) para nutrirse, defenderse y reproducirse con eficacia.

Veremos que el máximo nivel de agrupamiento se produce mediante la socialización, que implica un mayor grado de interacción y relaciones complejas entre los individuos que se agrupan. La socialización alcanzó un mayor índice de desarrollo evolutivo entre algunos insectos (hormigas, abejas) y en los animales mamíferos, y dentro de ellos, en los primates. Hoy se piensa que la evolución de la capacidad de formar agrupaciones socializadas de los primates fue una de las bases de nuestra propia evolución. El ser humano es el ser vivo con una mayor y más compleja capacidad de socialización.

## El imperio de las bacterias

Los únicos habitantes que poblaron la Tierra durante los primeros dos mil quinientos millones de años de existencia de la vida fueron los organismos unicelulares. Poblaron el único entorno confortable que existía en aquellos tiempos: las aguas de los océanos. La vida necesitó toda esa enormidad de tiempo para dar sus primeros e inseguros pasos y asentarse con fuerza.

Ya desde sus comienzos la vida estuvo expuesta a peligros que pudieron ocasionar su extinción. Una de esas situaciones críticas tuvo su origen muy pronto, precisamente con la aparición de las primeras formas de vida que en su actividad metabólica producían un desecho muy tóxico: el oxígeno.

Los primeros seres vivos prosperaron en una atmósfera carente de oxígeno. Este potente y tóxico elemento apenas existía en la atmósfera de la Tierra y, en consecuencia, toda la vida se desarrolló y se adaptó a prosperar en su ausencia. Pero las primeras bacterias comenzaron a producirlo como un residuo de su actividad metabólica. El oxígeno resultaba mortal para todos los seres vivos (los oxidaba), incluidas las propias bacterias productoras. Se ocasionó una gran extinción que debió de eliminar la mayor parte de las formas de vida existentes, en lo que se ha denominado el «holocausto del oxígeno». Fue posiblemente la primera de las grandes extinciones que han padecido los seres vivos. Pero la vida encontró la manera de sacar provecho de este desorden y se desarrollaron microorganismos que aprendieron a utilizar el oxígeno para conseguir la energía que precisaban para acumular orden y desarrollar todos los atributos vitales. Además, el oxígeno se fue

acumulando en estratos superiores de la atmósfera y creó la capa de ozono, que proporcionaba una indispensable protección contra los más energéticos y peligrosos fotones solares.

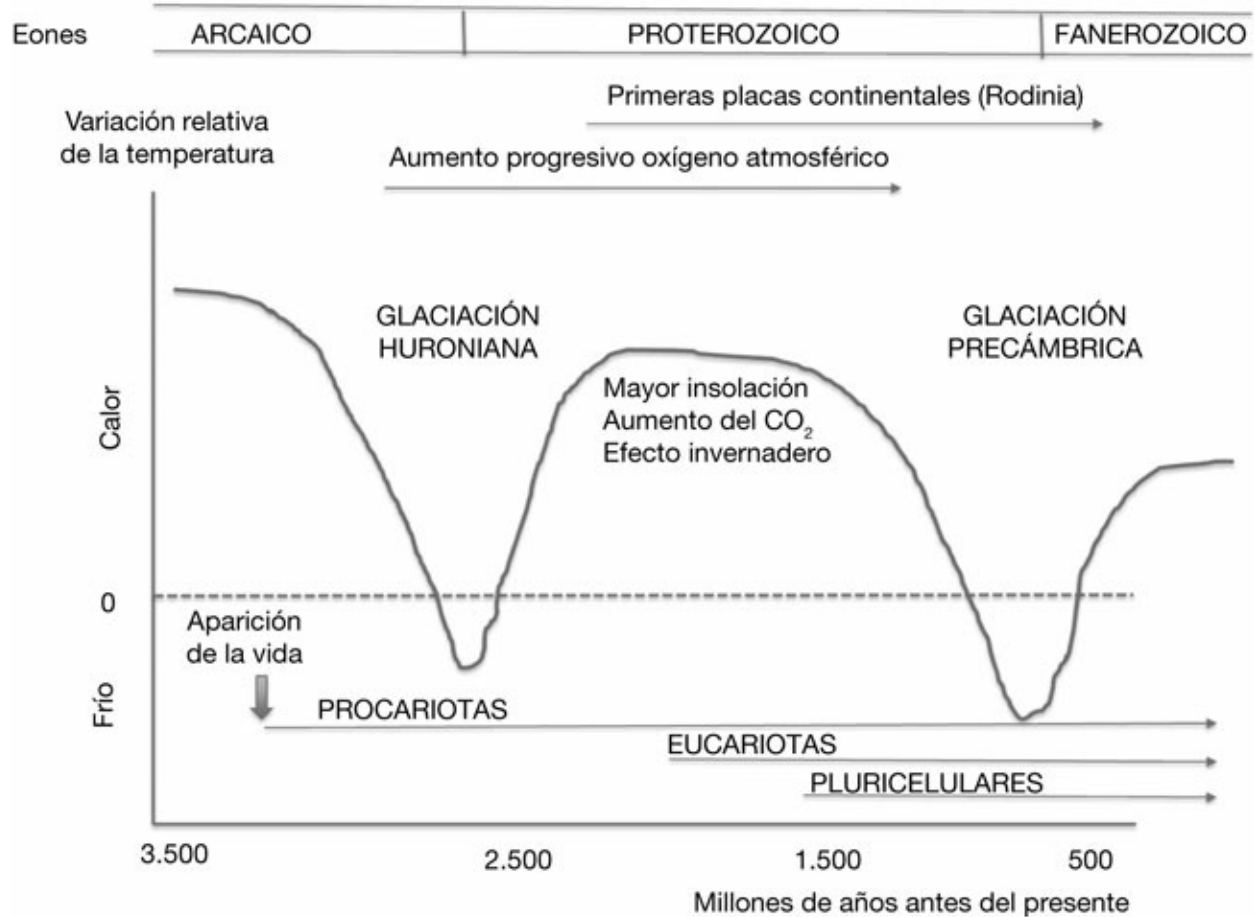


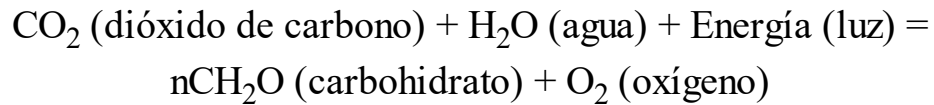
Figura 6.1. Representación de las temperaturas relativas de la Tierra, con respecto a la temperatura actual (0) durante los primeros tres mil millones de años de la existencia de la vida. Dos cambios climáticos globales, la glaciación huroniana y la glaciación precámbrica o «Bola de Nieve», estuvieron a punto de eliminar la incipiente vida en el planeta.

## LAS INGENIOSAS SOLUCIONES NUTRICIONALES

Las primeras bacterias conseguían obtener la energía y materia que precisaban mediante el mecanismo de fotosíntesis. La reacción global de la fotosíntesis sucede en dos etapas. En primer lugar, la bacteria captura fotones del espectro visible de la luz solar y utiliza su energía para fabricar dos moléculas: el ATP, que es un almacén y transportador universal de energía, y el NADPH, que es



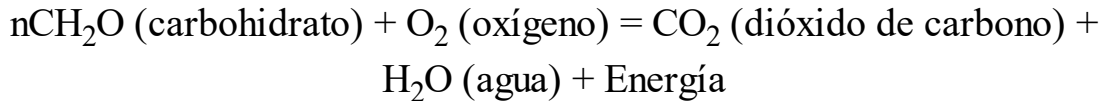
un dador de protones (átomos de hidrógeno, H<sup>+</sup>). Durante la segunda parte de la reacción, la energía acumulada en el ATP se utiliza con el agua y el NADPH para reducir al CO<sub>2</sub> y sintetizar una molécula de hidrato de carbono. El proceso global se puede escribir así:



En la reacción de fotosíntesis se desprende oxígeno. A lo largo de la historia de la Tierra, las cianobacterias y microorganismos similares han sido los principales organismos creadores del oxígeno gaseoso que existe hoy en la atmósfera de nuestro planeta y que nos permite la vida.

En las bacterias primitivas, las proteínas capaces de atrapar la energía de los fotones solares están embebidas en la membrana celular. En las plantas y algas actuales se encuentran en la membrana de unos orgánulos que se llaman cloroplastos. En la mayoría de las plantas, estas proteínas no son capaces de absorber la energía de los fotones de un espectro energético correspondiente a la luz verde, que son reflejados, y por eso vemos las hojas de ese color. Pero a lo largo de la evolución se desarrollaron otros pigmentos capaces de atrapar otros fotones con otras longitudes de ondas y de ahí la variedad de los colores de las plantas.

El aumento progresivo del oxígeno en la atmósfera y las aguas permitió la evolución de otros seres vivos que sacaban ventaja nutricional de esta circunstancia. Así apareció el otro mecanismo básico para obtener energía, la de utilizar el oxígeno para oxidar otras moléculas: son las reacciones de oxidación y reducción que constituyen lo que se denomina la respiración celular o fosforilación oxidativa. La célula utiliza una cadena enzimática para oxidar algunas moléculas de nutrientes y producir la energía que se almacena en las moléculas de ATP, la moneda universal de intercambio de la energía en todos los seres vivos (otra prueba más de nuestro origen común). En muchas células este proceso ocurre en la membrana de un orgánulo denominado mitocondria. La reacción global de la respiración es, en cierta medida, la reacción inversa de la fotosíntesis:



Los azúcares que ingerimos los oxidamos con el oxígeno que respiramos y con ello generamos energía y eliminamos al exterior  $\text{CO}_2$  y agua. Todos los procesos de combustión, ya sea una madera al arder o nuestros músculos al obtener energía para contraerse producen  $\text{CO}_2$  como subproducto. El mecanismo básico de la respiración es la transferencia de electrones de unas moléculas a otras. Toda molécula que pierde electrones se oxida. Un ejemplo visible a simple vista es el hierro que cede electrones al oxígeno de la atmósfera y los pierde, por lo tanto se oxida y se transforma en herrumbre. La molécula que recibe los electrones (el oxígeno) se reduce y forma agua.

En la reacción de la respiración celular el donante de electrones es una molécula compleja (carbohidrato, proteína o grasa), que se oxida, y el aceptor de esos electrones es el oxígeno, que se reduce. El átomo de oxígeno no está feliz con las dos cargas negativas de más que le proporcionan los dos electrones extras, así que para solucionar el problema capta dos protones positivos (dos núcleos del átomo de hidrógeno,  $\text{H}^+$ ), se transforma en una molécula de agua y libera energía.

Existen pruebas sólidas de que hace tres mil millones de años ya existían seres vivos unicelulares en los que operaban estos dos mecanismos fundamentales de obtención de energía: la fotosíntesis y la respiración. Ambos sistemas, solo con ligeras variaciones, son los que continúan proporcionando gran parte de la energía que consumimos los seres vivos en la actualidad.

## CÓMO DEFENDERSE Y AGRUPARSE

Las bacterias pronto tuvieron la necesidad de defenderse de los innumerables peligros que las acechaban en tan penosas condiciones de vida como las que se daban en la Tierra hace tres mil millones de años.

Así, debieron de desarrollar de manera precoz mecanismos que les permitieran detectar los cambios físicos, químicos y biológicos en su entorno. Estos fueron sistemas sensoriales moleculares incrustados en la membrana,

capaces de activarse por diversos estímulos, que conectaban con los sistemas metabólicos, genéticos y motiles, lo que permitía a la bacteria modificar su metabolismo y su movimiento según las circunstancias. Por ejemplo, en la membrana de una bacteria *E. coli* existen más de diez mil receptores por célula. Están conectados con varios dispositivos moleculares intracelulares, como el sistema molecular que gobierna el funcionamiento de su flagelo, y así se controla el movimiento de la célula en forma de desplazamientos, giros o volteretas, según las necesidades.

Numerosos estudios recientes demuestran que las bacterias tienen mecanismos para almacenar información y evaluar los múltiples estímulos que les llegan por sus numerosos receptores. Son sistemas que permiten la evaluación de la información recibida para gestionar una respuesta adecuada. Hay quien asegura que se trata de una forma elemental de inteligencia o consciencia bacteriana.

Una de las formas básicas de defensa que comenzaron a desarrollar las primitivas bacterias es el agrupamiento mediante la construcción de refugios calcáreos inexpugnables, de los que ya vimos que existen fósiles abundantes. En el mundo primitivo bacteriano surgieron las bases de los mecanismos de comunicación y sociabilidad tan importantes para la defensa como para el ejercicio eficaz de las otras Fuerzas de la Vida. La sociabilidad requiere cooperación y coordinación, no meramente actuar juntos de manera automática. Estudios experimentales han demostrado que la vida social bacteriana puede ser bastante cosmopolita, con mezcla de poblaciones y división de tareas. Los genes que controlan el comportamiento bacteriano en relación con determinados estímulos podrían determinar que aquellas bacterias que inviertan energía para un beneficio compartido sobrevivan y se reproduzcan mejor que las que utilizan los recursos energéticos de manera más egoísta.

## LA GLACIACIÓN HURONIANA

Con la mejoría de las condiciones y composición de la atmósfera terrestre el mundo se iba abarrotando de diversos tipos de bacterias que poblaban ya todas las aguas del planeta. Pero esta situación idílica iba a sufrir el primer

golpe climático catastrófico, que casi logró hacer desaparecer aquella vida incipiente. El clima comenzaba a tomar las riendas del proceso evolutivo.

El primer «borrón y cuenta nueva» climático de la evolución se produjo muy pronto, al comienzo del eón proterozoico, hace unos dos mil quinientos millones de años, cuando sobrevino la primera gran glaciación. Esta sirvió para eliminar gran parte de los ensayos poco eficaces y permitir que prosperaran unas pocas formas de vida, las más aptas para enfrentarse a todo lo que estaba por llegar, las que habían desarrollado los métodos más efectivos para nutrirse, reproducirse, defenderse y asociarse; es decir, las que disponían de medios para gestionar las Fuerzas de la Vida de manera más eficaz y en las peores condiciones. Sin esta primera glaciación probablemente el planeta Tierra sería un mundo habitado por miles de millones de colonias de bacterias fotosintéticas agrupadas en gigantescas y caprichosas formaciones calcáreas, que cubrirían todo el planeta. Y, por supuesto, nosotros no estaríamos aquí.

No se conocen bien las causas que desencadenaron esta primera gran glaciación. Pero, entre el final del eón arcaico y comienzos del proterozoico, el clima se enfrió por la conjunción de varias circunstancias, según nos informan los paleoclimatólogos.

En primer lugar, el incremento del oxígeno en la atmósfera producido por las enormes masas de cianobacterias y de algas unicelulares que abarrotaban los océanos calientes. Este está bien datado geológicamente por el aumento de los óxidos de hierro en los suelos fósiles y en los lechos sedimentarios de tal antigüedad. Este oxígeno atacaba químicamente varios gases de efecto invernadero como el metano, al que transformaba en anhídrido carbónico y agua.

En segundo lugar se produjo, por la misma causa, una reducción de otro de los más potentes gases de efecto invernadero: el anhídrido carbónico. Esto ocurrió porque las cianobacterias captaban  $\text{CO}_2$  de la atmósfera para realizar la fotosíntesis y gran parte de este gas quedaba secuestrado en forma de carbonato cálcico en la estructura calcárea de los estromatolitos. Otra cantidad de  $\text{CO}_2$  se fijaba a las células fotosintéticas del fitoplancton marino

quedándose atrapado en forma de materia orgánica. Y una tercera porción se hundía con las células muertas y sedimentaba en el fondo de los océanos, lo que contribuyó a reducir el dióxido de carbono del aire.

Las evidencias que tenemos de esta primera glaciación aparecen en estratos rocosos de la región del lago Hurón, en Canadá (de ahí su denominación). Los geólogos muestran que se han encontrado tillitas de aquella época, que son unas rocas sedimentarias que agrupan materiales de tamaño muy diferente y que proceden de la cementación de antiguas morrenas glaciales. En estratos geológicos huronianos han aparecido superficies rocosas con estrías provocadas por la abrasión de la enorme masa de hielo que se movía por encima.

Esta primera glaciación debió de hacer desaparecer la mayor parte de los modelos de vida bacteriana que se habían ido creando a lo largo de los millones de años precedentes y permitió a las bacterias supervivientes evolucionar a formas más complejas de vida: las células eucarióticas.

## LOS NUEVOS ORGANISMOS

Tras la glaciación huroniana el clima comenzó de nuevo a calentarse. No existen pruebas geológicas ni biológicas (fósiles) que permitan conocer los factores que contribuyeron a este calentamiento que duró hasta hace seiscientos cincuenta millones de años. Durante esos casi dos mil millones de años de bonanza climática y una progresiva calma planetaria, la vida se abrió camino desarrollando mayores niveles de complejidad, hasta llegar a los primeros seres multicelulares.

Posiblemente, contribuyeron varios factores como una mayor radiación solar y el aumento de los gases invernadero en la atmósfera, sobre todo el aumento del CO<sub>2</sub>, a causa de la desaparición durante la glaciación de la mayor parte de las cianobacterias y otras células fotosintéticas. Lo cierto es que existen numerosas pruebas paleoclimáticas de este calentamiento.

En esta época suceden interesantes fenómenos geológicos. Aparecen las primeras masas continentales estables, aunque por doquier ocurrían constantemente grandes erupciones volcánicas que llenaban toda la superficie de la Tierra de flujos basálticos. Estos fenómenos de formación de rocas se

acompañaban de intensos procesos de erosión y depósito de sedimentos a causa de las gigantescas mareas, la lluvia constante y los vientos huracanados. Hace mil millones de años, los movimientos tectónicos reunieron todas las masas continentales en un solo supercontinente, al que se ha dado el nombre de Rodinia.

Durante un largo intervalo de casi mil quinientos millones de años, es decir, desde hace dos mil trescientos millones hasta hace setecientos cincuenta millones de años, el clima cálido permitió la explosión proterozoica de vida unicelular. Fundamentalmente, células procariotas (sin núcleo) y eucariotas (con núcleo) que habitaban los entornos acuáticos someros y la superficie de los océanos. También comenzaron a aparecer unos seres pluricelulares muy elementales.

#### EL ARTE DE COMERSE AL PRÓJIMO

Desde los primeros momentos la vida fomentó aquellas soluciones que permitían obtener el máximo de beneficio energético con el mínimo esfuerzo. Captar moléculas nutritivas del entorno resultó cada vez más difícil, al aumentar la competencia de otros organismos. Con este planteamiento, no tardaron muchos millones de años en aparecer microorganismos que habían desarrollado una habilidad extraordinaria para alimentarse. Eran capaces de acercarse a otro ser vivo, normalmente de menor tamaño, hacer contacto con su membrana, deformarse hasta englobar por completo al incauto e introducirlo en su interior hasta rodearlo con una membrana aislante llamada vacuola. Allí, en un rudimentario aparato digestivo y mediante unos sistemas enzimáticos especializados, obtendrían la energía almacenada en las moléculas de la bacteria fagocitada para fabricar sus propias moléculas. Eran las proteobacterias.

#### LAS CÉLULAS EUCARIÓTICAS

La aparición de las células eucarióticas constituye otro gran misterio científico. En esta época, es decir, hace unos dos mil millones de años, algunas bacterias evolucionaron hasta dar lugar a unas células un poco más complejas, más ordenadas y que requerían una mayor cantidad de información. Estas células guardaban celosamente todo su material genético en un orgánulo intracelular dotado de su propia membrana y que se denomina núcleo. Además, el interior celular mostraba un elevado grado de complejidad y organización con diversos orgánulos, cada cual con sus funciones coordinadas para el bien de la célula. Con el nacimiento de las células eucariotas se dio un paso de gigante en la historia de la vida. Según sugiere N. Lane, todos los seres vivos eucariotas compartimos un antepasado común que surgió solo una vez en toda la historia de la vida sobre la Tierra. Fue nuestro antecesor; el LECA (*Last Eukaryotic Common Ancestor*), nuestro más lejano antepasado eucariota común. Por primera vez se producía la división de los seres vivos en procariotas (las bacterias) y eucariotas (el resto).

Algunos de los fósiles más antiguos de células eucarióticas son los acritarcos, muy abundantes en el registro fósil de dos mil millones de años. De hecho, son los fósiles más abundantes de este período. Algunos podrían ser dinoflagelados, que son los componentes más abundantes de las algas del plancton hoy día. El gran tamaño, entre sesenta y doscientas micras, de estos fósiles primitivos sugiere que eran células eucarióticas.

Este desarrollo y la avidez por devorar al vecino permitieron otro paso esencial en el arte de proveerse de energía: hablamos de la llamada endosimbiosis. Básicamente consistió en que algunas células fueron englobadas, pero no digeridas, por las grandes células eucariotas. Se quedaron a vivir en su interior compartiendo beneficios mutuos (simbiosis).

Según las hipótesis planteadas desde hace muchos años y que formuló definitivamente Lynn Margulis, dos orgánulos de las células eucarióticas proceden de las bacterias endosimbiontes: las mitocondrias que derivan de las proteobacterias y los cloroplastos de las cianobacterias. Primero se produjo la adquisición de las mitocondrias y mucho más tarde la de los cloroplastos. Estos solo se encuentran en las plantas, no en los animales, así que no pudieron formar parte de esa hipotética primera célula eucariótica común, el LECA.

Una gran célula eucariótica englobó una pequeña célula oxidativa. No la digirió y se quedó a vivir y a reproducirse de acuerdo con la célula hospedadora, proporcionándose un beneficio mutuo. Esta célula huésped, que hoy denominaríamos mitocondria, proporcionaba a la gran célula eucariótica el eficiente mecanismo de oxidación para la obtención de la energía, lo que también le daba una ventaja sobre las otras células. Este sistema fue adoptado por aquellos seres vivos que incluimos en el llamado reino animal. Todas nuestras células poseen mitocondrias (evolucionadas de antiguas bacterias oxidativas) dotadas de su propia información genética y de su propio ciclo reproductor. De esa célula primitiva derivamos todos los animales.

Por otra parte, alguna gran célula eucariótica, que ya portaba la ventaja de poseer capacidad oxidativa por contener mitocondrias, en su afán por comerse a otras células, englobó a una pequeña célula fotosintética, que se quedó a vivir y a reproducirse en común acuerdo con su hospedadora. Esta protegía a la pequeña célula fotosintética (que hoy llamamos cloroplasto) como ya lo venía haciendo con las pequeñas células oxidativas (mitocondrias) y a cambio el cloroplasto le proporcionaba la capacidad de obtener energía directamente del Sol. Esto dotaba de una gran ventaja nutricional a esta célula eucariótica sobre las otras, ya que al disponer de los dos sistemas para captar energía podía usar la fotosíntesis de día y las oxidaciones de noche. De esta asociación surgirían posteriormente todos aquellos seres vivos que englobamos en el llamado reino vegetal. Debido a esta circunstancia, es sano tener plantas en casa, ya que de día funcionan mediante la fotosíntesis de sus cloroplastos, captan la luz del Sol y liberan oxígeno al ambiente (nuestro domicilio). Pero no debemos ponerlas en un dormitorio cerrado, ya que de noche funcionan solo mediante la respiración de sus mitocondrias, consumen gran cantidad de oxígeno para oxidar los carbohidratos y liberan CO<sub>2</sub>, que es un gas tóxico a altas concentraciones.

La confirmación de esta hipótesis de la endosimbiosis recae en el hecho de que el material genético de los cloroplastos y de las mitocondrias es diferente al de las células hospedadoras, como era de esperar al ser dos organismos vivos diferentes, aunque asociados. Los estudios filogenéticos de comparación de las secuencias genéticas de mitocondrias, cloroplastos y bacterias arcaicas, como las cianobacterias, apoyan esta hipótesis. Además,



cada una de estas estructuras dispone de su propia membrana y sus tamaños y formas recuerdan a los de las bacterias. Se dividen por fisión simple. No obstante, ya no se las puede considerar como bacterias, ni pueden tener vida independiente; la mayoría de sus genes, unos mil quinientos, se encuentran en el núcleo de la célula, a donde se transfirieron pronto. Solo un pequeño grupo de genes, los que codifican las proteínas respiratorias, quedaron formando parte del genoma de estos orgánulos.

Para L. Margulis, las células eucariotas primitivas fueron completando su arsenal de artilugios de supervivencia (cilios, flagelos, receptores, etc.) mediante sucesivas endosimbiosis de bacterias portadoras de tales dispositivos. Es lo que se denomina la «endosimbiosis seriada». Hubo más de mil millones de años para ensayar las diferentes posibilidades y que prosperara la mejor, la más eficaz.

## SEXO Y SEXUALIDAD

La característica fundamental y común a todos los eucariotas es que tenían la información genética dentro del núcleo celular, almacenada en largas moléculas de ADN densamente plegadas formando unas estructuras llamadas cromosomas. Además, todos los eucariotas, incluidos usted y yo, poseemos dos copias de cada gen; somos diploides.

Muchas células eucariotas individuales se dividen por bipartición en un proceso algo más complejo que el que presentan las bacterias. Su vida se caracteriza por un ciclo celular con dos fases principales: la interfase y la división celular. Durante la interfase, la célula absorbe los nutrientes, crece y duplica su material genético, sus cromosomas. Durante la fase de la división celular, el núcleo se divide en un proceso llamado mitosis y a continuación, los núcleos divididos se establecen en células separadas en un proceso llamado citocinesis. Al final del proceso, la célula se separa en dos células hijas, cada cual con una dotación completa de cromosomas en sus núcleos.

Pero estos nuevos tipos de seres vivos muy pronto desarrollaron una nueva manera de transmitir la información genética: nació la reproducción sexual. Los primeros con esta capacidad fueron los protistas, eucariotas

unicelulares parecidos a los actuales paramecios o a algunas algas, entre otros, que intercambiaban material genético entre diferentes individuos mediante diversos mecanismos.

Conviene aclarar que sexo y reproducción son dos procesos relacionados, pero diferentes. La reproducción se refiere a la creación de nuevos individuos. Sexo es el mecanismo que permite el intercambio de genes procedentes de dos individuos diferentes. La reproducción sin sexo es característica de organismos que se reproducen por fisión de la célula madre, como una bacteria o una ameba. El sexo sin reproducción también se da en los organismos unicelulares, como los protistas. Por ejemplo, un paramecio se reproduce por fisión, pero puede intercambiar material genético con otro individuo (practicar sexo) por conjugación. Cuando dos paramecios que están en el mismo charco se juntan, unen sus aparatos bucales, se forma una conexión entre sus citoplasmas por la que intercambian diverso material, incluido el genético. Es una auténtica cópula. Luego, cuando se separen, cada cual se reproducirá por su cuenta dividiéndose en dos células hijas.

## LOS MECANISMOS DE DEFENSA EN LOS EUCARIOTAS

Los eucariotas desarrollaron mecanismos de detección del peligro y sistemas de defensa mucho más complejos que los de una bacteria. Muchos de esos sistemas los podemos observar hoy día en cualquier gota de charco, donde encontraremos abundantes paramecios, amebas, euglenas, etc.

Poseen sistemas de detección de variaciones físicas, químicas o biológicas en el entorno. Incluso algunos desarrollaron orgánulos sensibles a los fotones solares de espectro energético correspondiente a la luz visible. Otros receptores de las membranas permitían percibir vibraciones en el agua que los rodeaba o captar la temperatura del ambiente o la intensidad del campo magnético local. Estos receptores estaban formados por proteínas ancladas en la membrana y conectadas con canales moleculares que se abren o cierran según las diferencias de voltaje celular y permitían o no el paso de ciertos iones. Las modificaciones de la polaridad celular activaban

microtúbulos y microfilamentos conectados con los sistemas motiles: cilios, flagelos o contracciones de la membrana celular. Así, la célula reaccionaba al estímulo mediante la respuesta de movimiento más adecuada.

Algunos eucariotas desarrollaron mecanismos intracelulares complejos para procesar y transmitir la información. La ameba *Physarum polycephalum*, cuando se la deja crecer sobre placas de agar, muestra capacidades de aprendizaje, memoria, anticipación y resolución de problemas, además de otros aspectos de lo que podíamos denominar «inteligencia unicelular».

Algunos científicos creen que los eucariotas desarrollaron algún tipo de consciencia unicelular. Lynn Margulis decía que solo hay que asomarse por el microscopio y contemplar lo que sucede en una gota de un charco. Allí hay cientos de seres vivos unicelulares interactuando, muriendo, matando, alimentándose, excretando y provocándose sexualmente unos a otros. Es decir, en esa muestra de agua se puede asistir a una representación teatral de todas las actividades que la mayor parte de la gente cree que son específicamente humanas.

Todos estos mecanismos perfeccionados a lo largo de cientos de millones de años permitieron la evolución de los eucariotas y, después, de los seres pluricelulares. Y de ahí, a nosotros.

## OXÍGENO, OXIDACIONES Y ENVEJECIMIENTO

El oxígeno, desde que apareció en la atmósfera hace miles de millones de años, sigue siendo muy tóxico para los seres vivos. La mayor parte de los animales y nosotros mismos solo lo toleramos porque está diluido al veinte por ciento en la atmósfera y porque cada vez que respiramos lo diluimos aún más, al mezclarlo con el aire cargado de CO<sub>2</sub> que queda dentro de nuestros pulmones tras cada espiración. Respirar oxígeno puro nos mataría en pocas horas.

La toxicidad del oxígeno reside en su poder oxidante, que es el conjunto de reacciones de los diferentes compuestos químicos que entran en contacto con él. Y la oxidación envejece. Todo en el planeta Tierra envejece porque se oxida, ya sea una roca, una bicicleta o una persona.

En el caso de los seres vivos, el propio proceso de utilización metabólica del oxígeno (que nos permite vivir) acarrea la producción de unos subproductos con un elevado poder oxidante, que son los llamados radicales libres de oxígeno. Estos agentes oxidantes son capaces de destruir numerosas moléculas y, por tanto, las células que las contienen. Cuando su producción es excesiva pueden ocasionar graves enfermedades y hasta la muerte. Pero los seres vivos, a la vez que aprendían a utilizar provechosamente el oxígeno, también aprendieron a neutralizar sus efectos perniciosos. Esto lo lograron mediante una serie de sustancias y de enzimas con elevada capacidad antioxidante. Los antioxidantes no enzimáticos suelen ser nutrientes que penetran en el organismo con los alimentos, como las vitaminas C y E, el betacaroteno, el selenio, los polifenoles, etc. Estas sustancias neutralizan dentro del organismo a los radicales libres de oxígeno y nos protegen de sus efectos dañinos. Su eficacia no es total y poco a poco nos vamos oxidando con el paso del tiempo y, como consecuencia, envejeciendo. Hoy existe una sobreoferta de productos (cremas, cápsulas, bebidas) cargados de agentes antioxidantes que pretenden contrarrestar el efecto del oxígeno y retrasar el inevitable proceso de envejecer. Pero consumir antioxidantes en exceso puede ser perjudicial para nuestra salud. Nuestro organismo precisa de una cierta producción de radicales libres, que cumplen también una importante función fisiológica.

## LA DURACIÓN DE LA VIDA

Las células bacterianas son teóricamente inmortales. Pero con la aparición de las células eucarióticas, nucleadas y sus descendientes, los seres pluricelulares, apareció la muerte. Desde entonces, la evolución dotó a cada ser vivo de una duración determinada, la más adecuada para la supervivencia, la reproducción y la evolución de la especie a la que pertenece. Un insecto vive como máximo unos pocos días; una rata, cuatro años; un caballo, cuarenta, y una gran tortuga puede llegar a vivir más de cien. La duración máxima de la vida humana se estima en ciento veinte años. Mientras corrijo

estas páginas el señor Marchena, un paisano de Bienvenida, un pueblo de Extremadura, acaba de cumplir ciento trece años (es en la actualidad el varón más longevo del mundo) y lo ha celebrado comiendo un trozo de tarta.

Pero ¿cómo sabe un ser vivo cuándo se tiene que morir? La evolución ha dotado a las células de un dispositivo capaz de evaluar la duración. Es como esa leyenda urbana (¿o no?) que asegura que los fabricantes introducen en el motor de la lavadora o en la intimidad de un teléfono móvil un mecanismo llamado «de obsolescencia», que hace que ese aparato deje de funcionar al cabo de un tiempo estipulado por el fabricante. La naturaleza ha procedido de la misma manera que esos fabricantes tramposos y ha colocado unos dispositivos de obsolescencia en los extremos de los cromosomas que se denominan telómeros. Cada vez que se divide una célula de nuestro organismo, este telómero se va acortando. Así, llega un momento que el tamaño de los extremos de los cromosomas es de tan escasa magnitud que la célula no puede reproducirse más y se muere. Cuanto más avanza nuestra edad, más células van muriendo o sufriendo alteraciones que desencadenan un mal funcionamiento, una incapacidad para mantener el flujo de energía y materia, además de una baja entropía. Con la edad aumentan el grado de desorden de nuestro organismo. Las enfermedades se ceban con un cuerpo ya parcialmente desorganizado con numerosas células muertas: cuando no es capaz de reparar tal grado de desorden o de restaurar el normal flujo energético, la vida ya no es posible y sobreviene la muerte.

## LOS PORTABACTERIAS

Desde su aparición, las bacterias han colonizado cada rincón del planeta y lo han remodelado a lo largo de miles de millones de años depositando rocas y minerales a una escala geológica colosal, transformando los océanos, la atmósfera y los continentes. Alteraron el clima de la Tierra, llenaron el aire de oxígeno reactivo y oxidaron el mundo. Como apunta N. Lane, a lo largo de todo este inmenso proceso, las bacterias no se convirtieron en otra cosa. Permanecieron tozudamente con la misma estructura y un modo de vida similar, por lo que apenas han cambiado en tres mil millones de años de evolución. No se afectaron por ningún cambio en el planeta, ni por los hielos,

ni por los volcanes o por las rocas inmensas caídas del cielo. Las bacterias siempre permanecieron bacterianas, nunca evolucionaron a seres vivos complejos, excepto una sola vez, cuando dieron origen al primer ser vivo eucariota. Pero desde el comienzo de la vida aprendieron a introducirse en el interior de otros organismos más complejos (endosimbiosis), para quedarse ahí mientras obtenían y proporcionaban un beneficio mutuo. Hoy lo siguen haciendo; cualquiera de nosotros no es ni más ni menos que una sofisticada colonia bacteriana andante.

Por eso no es correcto decir que las bacterias dominaron la vida en el planeta durante tres mil quinientos millones de años. La realidad es que las bacterias siempre han estado aquí como la forma de vida dominante. Hoy, más del ochenta por ciento de la vida es unicelular. Y el restante veinte por ciento, las plantas y los animales, son en realidad ecosistemas especializados para el asiento y florecimiento de millones de poblaciones bacterianas.

En efecto, su afán de supervivencia llevó a las bacterias a diversificar sus estrategias vitales y a colonizar todos los nichos ecológicos posibles, incluido el interior de otros seres vivos. Ya hemos visto cómo en cuanto aparecieron las primeras criaturas que no eran bacterias, como las células eucarióticas, estas se introdujeron en su interior y allí se quedaron. Proporcionaban un indudable beneficio para las células hospedadoras, pero también era provechoso para ellas, puesto que pasaban a vivir en un sitio confortable y protegido. Desde entonces, cada célula de las plantas y de los animales alberga cientos de estas bacterias modificadas (mitocondrias y cloroplastos) en su interior. Pero esta colonización bacteriana prosiguió en todo el resto de las formas de vida pluricelular hasta hoy. Resulta interesante considerar las consecuencias de este hecho para la salud y la felicidad de la especie humana.

Cada uno de nosotros somos en un noventa por ciento bacterias. Albergamos tantos microorganismos en nuestro cuerpo que tenemos diez veces más bacterias que células propias. Además, solo poseemos unos doscientos tipos de células diferentes (hepáticas, epiteliales, musculares, sanguíneas, etc.), pero albergamos más de cuatrocientas clases diferentes de bacterias. Realmente quien ahora está leyendo este libro (y el que lo escribe) es una especie de superorganismo compuesto de una gran variedad de células y

bacterias. Estos acompañantes microscópicos se asientan desde la boca hasta el ano, en nuestro intestino, en los órganos genitales y urinarios, por todo el aparato respiratorio, en la piel y las cavidades, como el oído externo, las fosas nasales o la superficie de los ojos. La cantidad y el tipo de bacterias que albergamos dependen mucho de cada persona, de su estilo de vida y de su alimentación, de la zona en la que vive, del ambiente y del clima, entre otros factores. Resulta interesante considerar que el recién nacido adquiere sus primeras bacterias de la madre, cuando se frota con las paredes de la vagina en el parto. Se crea así un gran vínculo microbiológico que luego se acrecienta con la lactancia. También las personas que viven juntas, los miembros de las familias, comparten las mismas bacterias. En nuestros gestos habituales vamos esparciendo nuestras bacterias, que acaban en el organismo de cualquiera de nuestros familiares. Esto incluye las fecales, ya que tendríamos que lavarnos con el nivel de un cirujano para eliminar todo resto bacteriano de nuestras manos tras defecar. Y, por supuesto, aquellos que tienen mascotas en casa, sobre todo perros, comparten las bacterias fecales que sus animales dispersan por toda la casa mediante diversos mecanismos.

Hasta ahora resultaba muy difícil estudiar la influencia de estas bacterias en nuestra salud y felicidad a causa de su enorme diversidad. Son tantas y tan variadas que era muy complicado identificarlas por los procedimientos microbiológicos tradicionales. Pero el desarrollo de la genética permite que hoy se estudien determinando sus genes específicos. En la actualidad se están realizando numerosos estudios en todo el mundo y se está descubriendo que estas bacterias, además de controlar la digestión, producen otros efectos metabólicos (obesidad, diabetes), inmunológicos (infecciones, alergias, asma, intolerancias) y nerviosos (estado de ánimo, depresión, enfermedades degenerativas cerebrales).

Las bacterias han evolucionado dentro de los animales a la vez que estos. Por tanto, debemos procurar mantener nuestras bacterias en buen estado, ya que nos proporcionan un gran beneficio. Por ejemplo, el mayor almacén de microorganismos, que es nuestro intestino, se puede ver afectado por la ingestión inadecuada de antibióticos, que no solo atacan a las bacterias malas, sino también a las buenas. Las bacterias se mantienen en buen estado con una alimentación saludable. Esta debe contener prebióticos, que son los

componentes de los alimentos que nosotros no digerimos, pero que las bacterias fermentan y de los que obtienen energía y nutrientes. También deben contener probióticos, que son microorganismos vivos que reponen las pérdidas de nuestra flora intestinal. En esto se basa el negocio de los yogures enriquecidos con algunas bacterias.

Un efecto sorprendente se ha descubierto a raíz del tratamiento de una bacteria patógena, muy agresiva, que es el *Clostridium difficile*. Es una bacteria oportunista que prospera en el intestino de aquellos que padecen alguna enfermedad grave, por eso se da con frecuencia en pacientes hospitalizados. Es muy difícil de tratar con antibióticos, pero se cura sin ellos en más de un noventa por ciento de los casos si se le introduce al paciente dentro de su intestino bacterias procedentes de las heces de un pariente o familiar. El trasplante de heces (mediante cápsulas o sondas intraduodenales) es hoy una terapéutica en auge. Me temo que llegaremos a ver esta idea incorporada a los yogures; ya imagino la publicidad en los supermercados.

## LA BOLA DE NIEVE

Hacia el final del período proterozoico, hace unos ochocientos millones de años, las aguas del planeta estaba plagadas de bacterias, seres unicelulares eucarióticos y unos pocos y elementales seres pluricelulares. Todo parecía ir sobre ruedas, evolutivamente hablando: buen clima, atmósfera cada vez más limpia, abundancia de luz solar y de oxígeno, reducción de los impactos de objetos extraterrestres y de los fenómenos volcánicos. Pero lo bueno nunca dura. Estaba a punto de desencadenarse una de las catástrofes climáticas más graves de las que haya podido sufrir el planeta y que, una vez más, estuvo a punto de acabar con todas las formas de vida. Es la glaciación precámbrica, que se produjo al comienzo del eón fanerozoico (en el que aún estamos), denominada también «Bola de Nieve» (Snow Ball), por la apariencia que tendría la Tierra vista desde el espacio.

La totalidad de los continentes y océanos de la Tierra quedaron cubiertos por una gruesa capa de hielo y alcanzaron temperaturas medias de 50° C bajo cero; los hielos llegaron hasta el ecuador. Esto se ha sabido a causa de las llamadas «piedras erráticas». Los geólogos a veces encuentran rocas que están



donde no debieran estar, muy lejos de las formaciones geológicas de donde proceden. Y la única explicación para ello es que fueron transportadas a lomos de algún glaciar. Por ejemplo, se han hallado rocas erráticas en el valle de la Muerte (Estados Unidos) de las que se ha logrado determinar su antigüedad y su ubicación primitiva mediante sus señales magnéticas. Este evento tuvo una duración de más de diez millones de años. Su impacto sobre la biosfera fue tal que la vida estuvo cerca de desaparecer por completo.

Los paleoclimatólogos creen que el desencadenante principal pudo ser un descenso en la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero, como el  $\text{CO}_2$  y el metano ( $\text{CH}_4$ ). En cualquier caso, todos los modelos verifican un efecto albedo descontrolado, en el que el hielo aumentó la proporción de luz solar reflejada y devuelta al espacio, la Tierra conservó menos energía solar y se enfrió aún más. Hace setecientos cincuenta millones de años había una temperatura de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  bajo cero en el ecuador y de  $80\text{ }^\circ\text{C}$  bajo cero en los polos, y el planeta azul se había transformado en una inmensa bola blanca.

¿Cómo salió el planeta de este círculo vicioso? Todo indica que fueron los volcanes los que lo lograron. Es decir, el calor necesario para fundir las masas de agua helada vino desde el centro de la Tierra. Se produjeron gigantescas erupciones que atravesaron la gruesa capa de hielo, de varios kilómetros de espesor. A través de esos gigantescos agujeros lanzaron gases, lava y agua hirviendo. A lo largo de un millón de años los volcanes fueron fundiendo el hielo y el planeta volvió a calentarse. El efecto invernadero de los gases volcánicos hizo subir la temperatura hasta conseguir que el mar se descongelase.

¿Cómo sobrevivió la vida? En esta época estaba constituida en su totalidad por microorganismos acuáticos. Algunas especies pudieron resistir porque el agua, al congelarse con lentitud, se transforma en hielo muy transparente. Esto habría permitido que una escasa cantidad de luz lograra atravesar la enorme capa de hielo sobre el mar, suficiente para mantener el primer eslabón de la cadena alimenticia. Otra posibilidad más plausible es que las cianobacterias pudiesen sobrevivir en las numerosas fumarolas del

fondo marino, sin necesidad de la luz solar y del oxígeno, alimentándose de carbonatos y de CO<sub>2</sub>. Sea como sea, el hecho incuestionable es que sobrevivieron: la prueba es que aquí estamos nosotros.

## La vida pluricelular

Poco a poco, millón a millón de años, se fueron asociando grupos de células, lo que aumentaba la eficacia del cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Luego, se fueron creando asociaciones pluricelulares más intrincadas, incluso con la especialización de algunas de sus células en determinadas misiones. La vida pluricelular compleja iniciaba así sus primeros pasos.

Tras la glaciación precámbrica Bola de Nieve, que finalizó hace más de setecientos millones de años, la superficie terrestre volvió a calentarse y los seres vivos supervivientes comenzaron a proliferar gracias a las elevadas temperaturas y al aumento de oxígeno, al que ya se habían adaptado. Para entonces, los mares y lagos que cubrían la Tierra estaban llenos de seres unicelulares y de prototipos diversos de organismos pluricelulares. Predominaban los organismos vegetales acuáticos (algas unicelulares y pluricelulares) que obtenían su energía de una fuente inagotable como era el Sol. La vida quedaba reducida a los océanos. Las tierras emergidas eran aún páramos estériles, sin poblar.

Hace quinientos millones de años se produjo un incremento en la aparición de nuevos organismos a un ritmo como no se ha vuelto a dar en toda la historia del planeta: «la explosión cámbrica de vida». No se sabe qué fue lo que desencadenó esta gran proliferación de formas diferentes de seres vivos complejos. Se han aducido numerosos motivos. Pero la clave de esta extraordinaria proliferación de tal cantidad y variedad de tipos de organismos, cada vez más sofisticados y más eficaces, resulta aún un misterio.

Una posibilidad es que las condiciones climáticas permitieran la emergencia de algún factor que acelerara las tasas de mutación genética y de adaptación. Y, por supuesto, tuvo una gran influencia el desarrollo de dispositivos cada vez más eficaces para transmitir la información de forma precisa y a gran velocidad; aparecieron los primeros seres vivos dotados de sistema endocrino y de sistema nervioso. Estos dispositivos tomaron las riendas de la evolución animal y la dirigieron hasta llegar a nosotros.

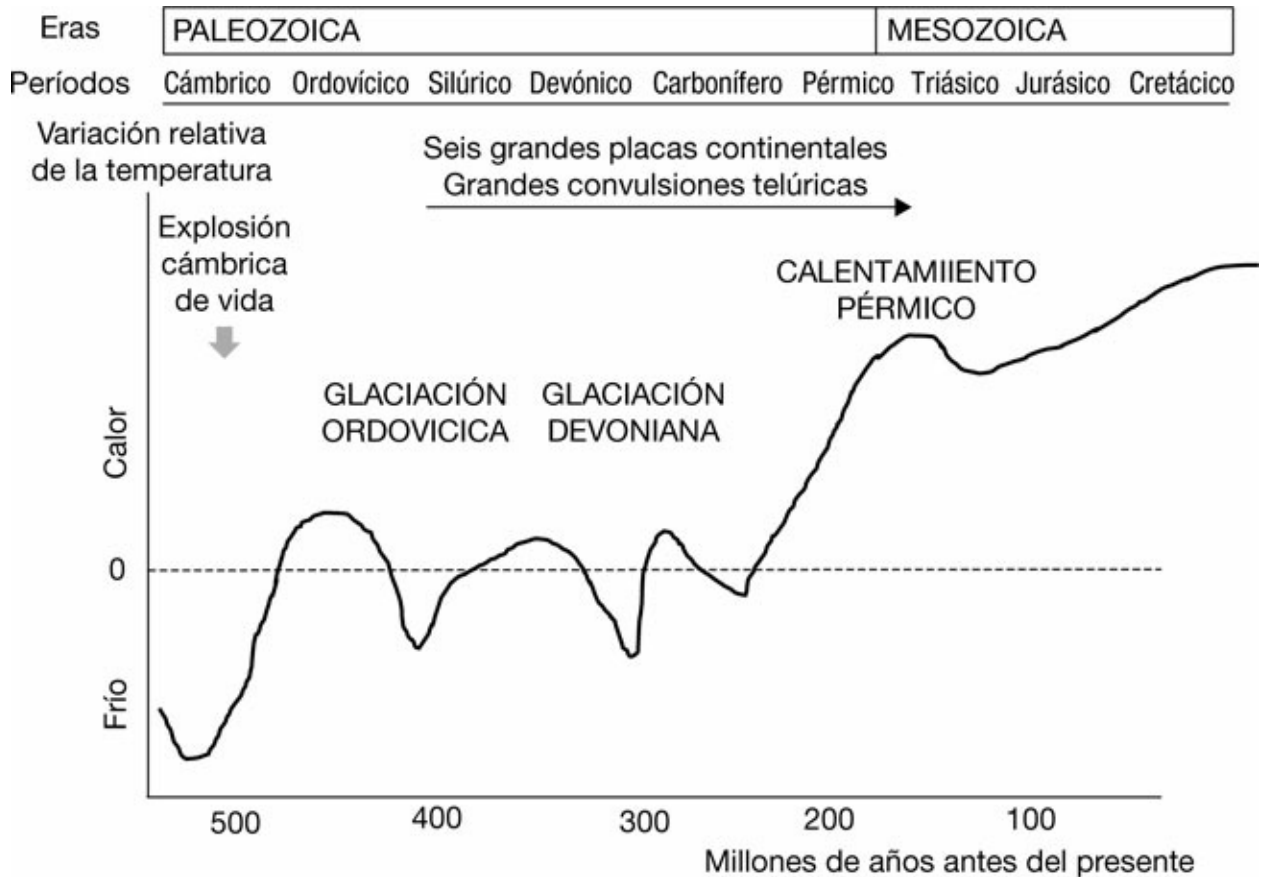


Figura 7.1. Tras la glaciación Bola de Nieve la temperatura aumentó y favoreció la rápida expansión de la vida durante el Cámbrico. Pero aún la vida se veía sometida a cuatro pruebas que la llevarían al borde de la extinción: las glaciaciones de los períodos Ordovícico y Devónico y los calentamientos globales de finales del Pérmico y del Triásico.

## LOS PRIMEROS ANIMALES

Los fósiles de los primeros organismos pluricelulares animales, lo que se conoce con el nombre de «fauna de Ediacara», se encontraron en las colinas de Ediacara, al sur de Australia, cubiertos por estratos de arenisca roja en lo que un día fue el fondo marino. Hace seiscientos millones de años, Ediacara era una playa a la cual iban a recalar «bichos» muy diferentes, pero con unas características comunes: no tenían columna vertebral, ni esqueleto, ni caparazón. Esos fósiles pertenecen a animales compuestos solo por partes blandas y con formas variadas y extrañas. Unos tienen un cuerpo como un disco, otros parecen una cinta larga. Alguno medía más de un metro. Son tan diferentes a los animales que pueblan hoy el planeta como podría serlo una criatura de Marte. Se han descubierto fósiles pluricelulares parecidos en todos los continentes, lo que demuestra que animales semejantes a los de Ediacara poblaron todos los océanos de la Tierra hace seiscientos millones de años. Los primeros fósiles de seres pluricelulares dotados de un caparazón o esqueleto externo se han encontrado en China y en la península ibérica. Estos últimos, hallados en la provincia de Badajoz (donde vivo), son los únicos de Europa y los mejor preservados del mundo.

Durante algún tiempo, se creyó que todas estas eran líneas evolutivas muertas. Hoy se considera que los descendientes de los animales de Ediacara son los gusanos y los moluscos. Primero aparecieron los gusanos planos, los platelmintos, ya dotados de un esbozo de sistema nervioso con unos ganglios o agrupaciones de unas cuantas neuronas. Más tarde aparecieron los gusanos segmentados con ganglios nerviosos en un extremo (la cabeza) de los que salían nervios que atravesaban todo el cuerpo y se interconectaban a varios niveles, y estaban dotados de gran variedad de órganos táctiles, quimiorreceptores, fotorreceptores. Luego surgieron los moluscos, esponjas, corales, medusas, anémonas, hidras, gasterópodos (caracoles) y crustáceos.

## EL AFIANZAMIENTO DEL SISTEMA NERVIOSO

Unos doscientos millones de años después, en el período Ordovícico, surgieron en el mar los primeros seres dotados de un armazón rígido a modo de incipiente columna vertebral. Los animales vertebrados desarrollaron un armazón óseo interno que no solo les sirvió de sostén de su estructura

corporal, sino que también sirvió para proteger el sistema nervioso, el cerebro y la médula espinal, que estaban experimentando un gran auge evolutivo. En alguno de los primeros peces se desarrolló un método ingenioso para envolver esos cables eléctricos que son los nervios (axones) con un material aislante que es la mielina. En estos primeros vertebrados ya se conforma la organización del cerebro y sus divisiones fundamentales, que se mantendrían en el resto de los vertebrados.

Pero esta «alegría vital» no duraría demasiado y de nuevo el clima volvió a intervenir catastróficamente para controlar la evolución de la incipiente vida pluricelular. Hace cuatrocientos cuarenta millones de años se produjo la primera de las grandes extinciones de animales pluricelulares. Se trata de la glaciación del período Ordovícico, que eliminó un 85 por ciento de las especies existentes en el planeta. ¡Por suerte nuestro antecesor sobrevivió!

#### LA VIDA EN LA TIERRA FIRME

Hace unos cuatrocientos millones de años la temperatura del planeta volvió a aumentar y este impulso de bonanza climática lo aprovecharon las plantas para salir del agua e iniciar la colonización de la tierra firme. Poco tiempo después, las siguieron las primeras criaturas que abandonaron el medio acuático como tetrápodos, unos peces con apéndices a modo de patas. Los primeros anfibios, lejanos antecesores de los mamíferos y de las aves, salieron del agua arrastrándose por el barro hace trescientos setenta millones de años. Su pasado acuático lo han conservado hasta nuestros días. Todos sabemos que las ranas desovan en el agua, en cuyo medio viven los renacuajos hasta que sufren la metamorfosis. Surgen también en este período los primeros insectos, que al principio no volaban, solo se arrastraban por el suelo. Estos ya disponían de un diminuto cerebro formado por la unión de tres ganglios y unas fibras nerviosas que inervaban todo el organismo. Comenzaron a desarrollar órganos de los sentidos, como los ojos compuestos, receptores olfativos en las antenas, mecanorreceptores pilosos que detectaban vibraciones del agua y del aire, termorreceptores, etc.

Las plantas terrestres aparecieron en el Silúrico, hace cuatrocientos treinta y cinco millones de años. Prosperaron en ese medio una vez que lograron desarrollar sus propias partes duras, la madera, su esqueleto, que les permite sostenerse en tierra firme y oponerse a la fuerza de la gravedad sin la flotabilidad que proporciona el agua.

Los primeros reptiles aparecieron unos setenta millones de años después de los anfibios. Su innovación y su ventaja fue la capacidad para poner los huevos en tierra. Los embriones crecían en su propio medio acuático, que les proporcionaba el líquido encerrado dentro de la membrana amniótica del huevo. Fueron los primeros animales que dejaron de depender del agua cercana, pues eran capaces de aventurarse tierra adentro para alimentarse de plantas y de succulentos insectos. Con el tiempo, se dividieron en tres ramas: los diápsidos, que originarían los dinosaurios, los reptiles y las aves; los anápsidos, de los que derivarían las tortugas, y los sinápsidos, de los que evolucionarían los mamíferos, incluidos nosotros.

Una vez más esta vida pujante y llena de fuerza se vio sometida a otra catástrofe climática. Una nueva glaciación que ocurrió en el período Devónico hace trescientos sesenta y cinco millones de años borró del planeta al 85 por ciento de las especies.

Pero la fuerza del planeta y su capacidad para autorregenerarse volvió a restablecer las condiciones climáticas ideales, que incluso alcanzaron cotas paradisiacas. Hace trescientos millones de años las condiciones de calor y humedad permitieron que toda la superficie de la Tierra se cubriera de inmensos bosques de plantas gigantescas, coníferas, helechos y otras plantas sin flores. Estos vegetales acumularon en sus estructuras, mediante la fotosíntesis, ingentes cantidades de energía del Sol.

Las gigantescas masas vegetales fueron luego enterradas por los numerosos cataclismos que ocurrían con frecuencia, y así permanecieron bajo presiones enormes durante millones de años. A lo largo de este tiempo, la energía solar que habían acumulado mientras estaban vivos se fue transformando en los combustibles fósiles que derrochamos en la actualidad: carbón, petróleo y gas.

Hace doscientos millones de años ya existían sobre la Tierra todos los modelos de animales y de plantas de los que derivaron los que existen en la actualidad. Los vegetales terrestres alcanzaron gran auge, lo cual constituye uno de los hechos biológicos más característicos de este período. En el Cretácico surgieron las primeras plantas con flores.

Los peces óseos aparecieron al principio de la era, mientras que los anfibios primitivos fueron sustituidos por los actuales batracios (ranas, sapos) y salamandras. Los reptiles se desarrollaron tanto en número como en tamaño. De todos estos reptiles solo los cocodrilos, las tortugas, los lagartos y las serpientes han llegado hasta nuestros días. Al final de la era aparecieron las primeras aves y los mamíferos primitivos, que tenían gran semejanza con los reptiles, de los cuales evolucionaron. Las primeras aves tenían dientes, garras, alas y una larga cola, y eran más bien planeadoras que voladoras.

#### EL PREMIO DEL PLACER

Los nuevos seres vivos que surgieron en estos millones de años de evolución, que ya poseían esas herramientas poderosas de comunicación que son las hormonas y el sistema nervioso, desarrollaron nuevas estrategias para ser más eficaces en la ejecución de las Fuerzas de la Vida. En los primeros esbozos del cerebro primitivo, cuando solo era una especie de ganglio formado por unos cientos de neuronas, ya estaban presentes los sistemas de recompensa que tenían por misión proporcionar una sensación grata, placentera, cuando el animal se alimentaba, se reproducía, gozaba de seguridad o se relacionaba con otros.

El gusano *C. Elegans*, que se utiliza con frecuencia en investigación, es muy pequeño, mide poco más de un milímetro y su cerebro lo forma un único ganglio compuesto de 302 neuronas, pero ya dispone de un rudimentario y eficaz circuito de recompensa. El neurotransmisor encargado de transmitir las señales placenteras es la dopamina. Estos gusanos se alimentan de bacterias y las localizan por el olor. Sin embargo, cuando se destruye un grupo específico compuesto de solo ocho neuronas dopaminérgicas los gusanos se vuelven indiferentes hacia su fuente favorita de comida, aunque pueden seguir detectando los olores; ya no les resulta placentero cumplir con el deber de la



nutrición y pierden su interés por comer bacterias. Tanto en el *C. Elegans* como en el resto de los animales, incluidos los seres humanos, la gran protagonista de los circuitos encargados de recompensar con una sensación de placer cuando se cumple con los dictámenes de las Fuerzas de la Vida es la dopamina.

A lo largo de la evolución, al incrementarse la complejidad neuronal en los animales fue aumentando también la complejidad del circuito de recompensa. En los pequeños cerebros de los primeros reptiles, aves, peces y roedores el circuito de recompensa se fue integrando en una serie de núcleos (agrupaciones de neuronas especializadas), al mismo tiempo que se establecían conexiones con otros núcleos y centros del cerebro implicados en la toma de decisiones, en la planificación, la memoria y las emociones. Esto ya permitía que los animales, cuando experimentaban una experiencia placentera (por ejemplo, comer un succulento insecto), asociaran esa sensación con señales externas, como olores, sonidos, imágenes o sabores, que llegaban a sus cerebros a través de los sentidos. También las asociaban con signos internos, como el aumento en la sangre de la glucosa y del resto de los nutrientes, que también servían de señales de placer al actuar sobre determinados receptores internos. Y todo este cúmulo de información se guardaba en su pequeña memoria, lo que les proporcionaba un patrón de conducta por si se repetía esa circunstancia u otra similar. Esta es la base de los llamados reflejos condicionados: tras comer su primer insecto, en la memoria de la lagartija queda grabada una sensación placentera y ese recuerdo se activa cada vez que divisa otro insecto.

También el cerebro cuantifica el placer, lo que permite elegir entre diferentes experiencias satisfactorias y determinar cuánto esfuerzo está dispuesto ese animal a invertir para conseguirlas. Esto se puede comprobar de una manera muy sencilla si, como yo, usted tiene gallinas en casa. Cada vez que yo me acercaba con una vasija llena de maíz corrían a mi encuentro. Un día les llevé las sobras de una paella. Desde que probaron el arroz (e imagino que sintieron un enorme placer al picotearlo) cuando les ofrezco a las gallinas dos recipientes, uno con maíz y otro con arroz, ¿cuál creen que prefieren?

Resulta interesante considerar que los sistemas de recompensa nutricional en los animales no son detectores gastronómicos; las preferencias por un determinado tipo de alimento dependen de la cantidad y concentración de nutrientes que les proporciona. Otro ejemplo es la enorme satisfacción que experimentan los cerdos al comer los higos pasos que llenan el suelo en torno a la higuera. Esto solo se debe a la inundación de su sangre por una gran cantidad de glucosa (combustible súper), que activa sistemas de recompensa placentera. ¿Por qué creen que encontramos tan irresistible comer un dulce?

## LOS MODELOS NUTRICIONALES

Digestión y metabolismo son métodos desarrollados por la evolución para extraer la energía contenida en la materia que forma los alimentos. Con el desarrollo de las formas de vida pluricelulares más complejas se establecieron los modelos de obtención de energía que existen en la actualidad. Son, básicamente, la sofisticación de los primitivos modelos bacterianos.

El más abundante es el llamado modelo autotrófico, característico del reino vegetal. Es el que se basa en obtener la energía directamente del Sol mediante el mecanismo de la fotosíntesis. La planta capta el agua, el CO<sub>2</sub> y los minerales que precisa del aire o del suelo. A él pertenecen todos los organismos verdes, como las plantas, las algas y algunas bacterias. El modelo heterótrofo, el que utilizan los animales, se basa en la obtención de la energía que han almacenado previamente otros organismos. Algunas moléculas que introducen en su cuerpo son demasiado complejas para poder extraer directamente la energía de ellas y tienen que someterlas a un proceso de desmenuzamiento previo que se denomina digestión y que sucede en un dispositivo especial que se llama aparato digestivo.

Hay cinco grupos fundamentales:

1. Los herbívoros, que se alimentan de la energía contenida en las plantas, como una vaca, una tortuga o un caracol.
2. Los carnívoros, que se alimentan de la energía contenida en otros animales. Por ejemplo, el tigre o el gato.

3. Los omnívoros, que pueden alimentarse tanto de animales como de vegetales. El oso y el cerdo.

4. Los saprofitas, que se alimentan de materia muerta, descompuesta, que no requiere digestión para poder ser aprovechada. Son los hongos y las bacterias.

5. Los parásitos, que se nutren de fluidos y componentes básicos de otros organismos, que por tanto no requieren de digestión, como las lombrices intestinales o las garrapatas.

## LA REPRODUCCIÓN SEXUAL

Tras numerosos ensayos comenzó a prosperar en los seres vivos pluricelulares un mecanismo que permitía transferir la información genética y crear nuevos individuos de una manera más eficaz: la reproducción sexual, que hoy día, es la forma más extendida tanto en el reino vegetal como animal. Esta manera de transmitir los genes es más costosa energéticamente, más peligrosa para el individuo y, en apariencia, más ineficiente que la reproducción asexual. Una de las claves de su éxito, sin embargo, viene determinada por su propia ineficacia al permitir muchos fallos en la transmisión de la información y eso trae como consecuencia la creación de una mayor variabilidad genética. Esta última puede conducir a fracasos inviables entre algunos descendientes, pero también a una mayor capacidad de adaptación a situaciones cambiantes.

Al introducir variación en la descendencia, la reproducción sexual permite que los organismos evolucionen. La mezcla y la recombinación de genes amortiguan el efecto de cambios excesivamente rápidos en respuesta a las variaciones del medio. Por ejemplo, en las poblaciones de una determinada especie que viviera en climas templados no sería ventajoso el desarrollar adaptaciones tropicales en respuesta a dos o tres veranos tórridos. Otra de las ventajas que confiere la variabilidad genética es la protección contra los agentes infecciosos. Un grupo de animales que fueran genéticamente idénticos, al ser atacados por un virus, se afectarían todos por igual, con las mismas consecuencias patológicas, y podría desaparecer toda la población. La variabilidad genética explica por qué ante una epidemia motivada por algún agente muy virulento mucha gente muere, pero siempre hay quien sobrevive.

La reproducción sexual permite la existencia de un mecanismo de barrera para preservar la pureza del material genético y evitar que se mezclen genes procedentes de especies diferentes. Esto impide crear especies mixtas, ya que, de ser así, tras millones de años de evolución se produciría una homogeneidad genética y solo existirían unas pocas especies en todo el planeta. Y por supuesto no es probable que entre ellas estuviera la especie humana.

Son innumerables los mecanismos que utilizan los animales para lograr que se fusionen los gametos de dos individuos diferentes. Hay sistemas sadomasoquistas sumamente peligrosos, al menos para el macho, como es el apareamiento de la mantis. Hay métodos despreocupados, como el de los salmones: las hembras sueltan los óvulos en medio del río, los machos eyaculan también en plena corriente y sus espermatozoides los fecundan en medio de las turbulentas y frías aguas de montaña. Pero en la mayor parte de los animales el macho inyecta sus espermatozoides dentro de la confortable intimidad de la hembra mediante un ingenioso artilugio desarrollado por la evolución: el pene.

La fuerza vital necesaria para que se transmita la información a nuevos seres vivos está dotada de poderosos alicientes para cumplir su mandato, aunque la reproducción implique numerosos peligros, incluso la muerte: es el placer sexual. Todos los seres pluricelulares de reproducción sexual se caracterizan por poseer ese mecanismo, localizado en algunos núcleos cerebrales, que es el deseo sexual y que impele, normalmente al macho, a buscar de manera desesperada a una hembra con la que mezclar sus genes, aun arriesgando su vida. Las hembras, en la mayor parte de las especies, tienen un rol más pasivo a este respecto, pero siempre son ellas las que eligen con qué macho van a mezclar sus genes. En casi todas las especies, incluida la humana, el macho busca y la hembra elige.

## LOS MECANISMOS DE DEFENSA

La aparición de los organismos pluricelulares y el desarrollo del sistema nervioso proporcionaron a los seres vivos nuevas opciones defensivas y nuevos mecanismos eficaces. En primer lugar, se amplió el catálogo de amenazas. Además de todos los peligros exteriores, compartidos con los seres

unicelulares, había que tener en cuenta los peligros que podían provenir del interior del propio organismo pluricelular. Estos pertenecen a tres categorías. Amenazas biológicas provocadas por agentes que invaden la intimidad del organismo pluricelular, como bacterias, hongos, protozoos o gusanos diversos. Amenazas químicas causadas por tóxicos que pueden penetrar en el organismo pluricelular con el aire respirado, los alimentos o los venenos de otros animales. Amenazas físicas, como variaciones de la temperatura corporal, de la acidez del medio interno o la deshidratación.

Pero la respuesta frente a cualquier amenaza externa o interna siguió el mismo patrón que había demostrado su eficacia a lo largo de millones de años de evolución: la detección del peligro, la transmisión de la señal y la respuesta defensiva mediante el movimiento.

El movimiento celular, en cualquiera de sus modalidades, implica necesariamente la actuación de unas proteínas especializadas capaces de contraerse y alargarse en respuesta a determinados estímulos. Estas proteínas contráctiles son las que, mediante el consumo de energía, activan los dispositivos responsables del movimiento. La mejor respuesta defensiva sigue residiendo en la actividad de estas proteínas contráctiles. Algunos de los sistemas desarrollados por los organismos unicelulares perviven en algunas células de los seres pluricelulares, como ya adelantamos (macrófagos, espermatozoides). Pero en lo que respecta al desplazamiento, los sistemas unicelulares no resultaban eficaces para los organismos pluricelulares voluminosos. La evolución resolvió esta deficiencia creando el tejido muscular, un ingenioso artificio dotado de unas proteínas contráctiles capaces de estirarse o encogerse para así aumentar o disminuir la tensión y generar fuerza. Estas células se agruparon en estructuras complejas que denominamos músculos. Los mecanismos mediante los cuales estos órganos generan tensión y movimiento en los animales son muy variados, y pueden ir desde las contracciones del cuerpo de una lombriz hasta los sistemas de inserción muscular en huesos que permitieron diseñar artilugios tan ingeniosos como las aletas, las patas o las alas.

En los animales la contracción muscular es, por lo tanto, el principal mecanismo de defensa frente a una agresión. Esta protección se ejecuta mediante tres modalidades: huir, luchar o hacerse el muerto. En las dos

primeras, la contracción muscular permite el desplazamiento horizontal o vertical; en la tercera opción, favorece la inmovilidad salvadora mediante una contractura muscular que permite al animal encogerse para pasar desapercibido y sobrevivir.

Millones de años de evolución perfilando y combinando estos diseños han dado como resultado la amplia gama de recursos defensivos que exhiben los animales que viven en la actualidad. Los principales mecanismos de defensa con que la evolución ha dotado a los animales pueden dividirse en las siguientes categorías:

1. Atacar. Muchos animales disponen de elementos de ataque que van desde los colmillos de un tigre hasta los dientes afilados de una comadreja, el veneno de una cobra o de un escorpión, la cornamenta de un ciervo o las garras de un águila. También emiten sonidos amenazantes, como el cascabel de las serpientes, los chillidos y los rugidos, o lanzan líquidos repelentes o venenosos.

2. Huir. Muchos animales han desarrollado sistemas musculares que les permiten desplazarse por la tierra, el agua o el aire a gran velocidad para alejarse y esconderse de sus predadores.

3. Acorazarse. Algunos animales desarrollaron caparazones, corazas, pieles con pinchos, murallas calcáreas...

4. Ocultarse y mimetizarse. Muchos animales se defienden haciéndose el muerto, incluso la escena la hacen más creíble exhalando un olor putrefacto. Otros se camuflan o mimetizan con el entorno hasta hacerse casi invisibles. Algunos imitan ramitas de una planta o han desarrollado colores y figuras que hacen parecer lo que no es.

5. Agruparse. Varias especies mantienen diversas formas de agrupamiento que permiten una división del trabajo y una interdependencia entre los individuos que, entre otras funciones, mejoran la defensa contra predadores. Se establecen en ocasiones jerarquías y a veces existe cooperación en materia de defensa. Hay numerosas modalidades, que van desde las comunidades intensamente socializadas como las de algunos insectos (hormigas, abejas) y las de los primates, que luego estudiaremos, hasta las meras agrupaciones gregarias. Estas son las que adoptan la mayoría

de los herbívoros, que forman grandes rebaños, a veces compuestos de miles de miembros. En ellos, el mejor sistema de defensa es, precisamente, el enorme número de individuos que componen las manadas.

## EL DOLOR, EL MIEDO Y EL BIENESTAR

Como ocurrió con el resto de Fuerzas de la Vida, también fue conveniente dotar a los seres vivos de una señal que les recordara continuamente la necesidad de preservar su integridad física y evitar la muerte. Este mecanismo universal es el dolor.

Imaginemos un paramecio que nada feliz en una charca llena de hojas y desechos orgánicos. Alguien vierte ácido en la charca y el tóxico se expande por el agua. Cuando la membrana del paramecio detecta el tóxico se activan unos receptores que desencadenan una señal intracelular (es una especie de dolor bioquímico), la cual activa la producción de energía y el movimiento de sus pestañas vibrátiles (o flagelos en otros tipos de células), que hace que huya del peligro. ¿Cómo sabe hacia dónde tiene que ir? Simplemente nada en contra del gradiente de concentración del ácido, es decir, sus receptores de membrana le van indicando por dónde hay menos peligro.

En los animales, la piel y todos los órganos del cuerpo están llenos de unos receptores de dolor (nociceptores). Cuando se activan por un mordisco, un golpe o una quemadura mandan información mediante impulsos nerviosos que viajan por nervios de alta velocidad (fibras nociceptoras) hasta que el animal percibe los potenciales de acción que llegan a determinadas zonas de su cerebro como una sensación dolorosa. Esta señal desencadena una reacción de supervivencia y se almacena en la memoria la circunstancia que provocó el dolor, para tratar de evitarlo en el futuro.

El recuerdo del daño sufrido genera miedo, de la misma forma que el recuerdo de un alimento delicioso genera deseos de consumirlo. También existe un temor innato, genético, que no precisa un contacto previo con la circunstancia que causa dolor. El miedo es una emoción primaria, un sentimiento muy desagradable. Esta respuesta pone al organismo en alerta a través de la activación de dos poderosos sistemas: por un lado, el sistema nervioso autónomo, con sus neurotransmisores y hormonas, adrenalina y

noradrenalina; y, por otro, el sistema endocrino, que activa varias hormonas encargadas de preparar al organismo para superar la crisis, como el cortisol. Frente a una amenaza que pueda causar dolor se produce en el animal una activación general que se denomina estrés. Este tiene por misión evitar el dolor (y la posible muerte) poniendo en marcha cualquiera de los mecanismos defensivos que antes hemos visto. Quien esté interesado en estos asuntos puede completarlos consultando mi libro *El mono estresado* (Crítica, 2012).

## LA COMUNICACIÓN Y LA SOLEDAD

Salvo excepciones muy concretas, todos los animales viven formando grupos más o menos complejos: bandada, rebaño, cardumen, tribu, etc. Los factores que determinan el tipo de organización social, el tamaño, la composición, la actividad y la relación que se establece entre los individuos que forman un grupo son diversos y todos están al servicio de las Fuerzas de la Vida. Es evidente que la ventaja defensiva frente a las agresiones de los predadores es un buen motivo para agruparse; también lo es el procurarse el alimento, acomodándose a las características del entorno. Pero sin lugar a dudas la principal razón que condiciona el agrupamiento de los animales está relacionada con la reproducción: el apareamiento, el cuidado de las crías y la vinculación sexual.

El mecanismo diseñado por la evolución para evitar que los animales se aislen es un sentimiento desagradable: la soledad. Esta impulsa a los individuos a buscar a sus congéneres cuando uno se pierde del resto del rebaño. Hoy está bien demostrado que la soledad en los animales se percibe como una forma de dolor, ya que es gestionada por los mismos centros cerebrales, utiliza los mismos transmisores moleculares y desencadena las mismas respuestas. Es decir, en el animal que se siente solo, que se ha perdido de su manada o rebaño, su cerebro activa una respuesta de estrés. Se ponen en marcha entonces las hormonas del estrés, en especial el cortisol, y se activan las respuestas del sistema nervioso autónomo, la adrenalina y la noradrenalina. Esta activación orgánica y mental impulsa al individuo perdido a correr en pos de sus congéneres. Para la inmensa mayoría de los animales que viven en condiciones naturales, la soledad es la muerte.



## LA GRAN EXTINCIÓN PÉRMICA

Hace doscientos cincuenta millones de años la Tierra era un edén cálido, de selvas abarrotadas de flores lujuriosas por donde revoloteaban numerosas especies de insectos y gigantescas libélulas. Por el suelo y los troncos de los árboles se arrastraban los primeros reptiles, correteaban unos pequeños antecesores de los mamíferos y revoloteaban algunas aves con garras en las patas y dientes en el pico. Pero la bonanza de esta selva que ocupaba la mayor parte de la tierra firme del planeta y el bienestar de sus habitantes tampoco duraría demasiado. Durante el llamado período Pérmico, hace doscientos cuarenta y cinco millones de años, ocurrió la tercera gran extinción, la más catastrófica de todas, ya que extinguió el 95 por ciento de las especies existentes, lo que llevó a la vida al borde de la desaparición total.

¿Qué causó esta gran hecatombe? Los paleoclimatólogos sugieren que sucedió un gran y rápido (como siempre en términos geológicos) calentamiento global. La señal que ha permanecido de este evento es un estrato de piedra roja que se extiende por todo el mundo. Al parecer, el origen de este calentamiento se debió al afloramiento de gran cantidad de magma incandescente del interior de la Tierra. En Siberia se encuentran los testimonios de este gran desastre, en las llamadas «trampas siberianas». Estas son formaciones basálticas que reflejan un vulcanismo extremo que persistió durante miles de años. Millones de metros cúbicos de magma abombaron la superficie de Siberia y su corteza reventó como una gigantesca ampolla, produciendo una gran inundación basáltica que cubrió una superficie de más de cinco millones de kilómetros cuadrados (diez veces la superficie de España) bajo un espesor de más de un kilómetro de lava.

Se lanzaron al aire grandes cantidades de compuestos, como ácido sulfhídrico y  $\text{CO}_2$ . El aumento de la temperatura del agua de los océanos evaporó las grandes gotas de metano helado que existen en los fondos marinos y el gas escapó a la atmósfera. El metano provoca un efecto invernadero muy superior al del  $\text{CO}_2$ . Todos estos gases contribuyeron a aumentar más la temperatura global.

El calor hizo disminuir el oxígeno disuelto en el agua, lo que ocasionó la proliferación de las bacterias rojas del azufre. Son bacterias que prosperan en aguas carentes de oxígeno y dejan como residuo metabólico ácido sulfhídrico, que envenena las aguas, les da un color rosa y acaba precipitando en forma de pirita, que es de color rojo. Al final del Pérmico, los océanos estaban casi sin vida y tenían un tono rosado.

Pero por si esto no fuera suficiente castigo, pocos millones de años después, cuando se alumbraba la esperanza de nuevas especies que se habían desarrollado a partir de los escasos supervivientes, una nueva extinción, la cuarta, ocurrió en el Triásico.

A finales de este período, hace doscientos ocho millones de años, el único continente que existía, Pangea, comenzó a fracturarse a lo largo de una línea de ruptura que comenzaba a separar América del Sur y África. Por la gigantesca brecha brotaron abundantes coladas de basaltos incandescentes y de gases. Se cree que los gases expulsados provocaron de nuevo intensos cambios químicos en la composición atmosférica y en el clima, con graves repercusiones para la vida. Estos episodios de fuerte vulcanismo afectaron al ochenta por ciento de las especies planetarias y, probablemente, facilitaron el advenimiento de los dinosaurios, que iban a dominar la Tierra durante los cien millones de años siguientes.

## La puerta hacia la humanidad

Hace sesenta y cinco millones de años sobrevino un acontecimiento catastrófico, de causa incierta, que modificó drásticamente las condiciones edénicas del clima precedente, provocó la total desaparición de los dinosaurios y extinguió numerosas especies de animales y de plantas. Si no hubiera sucedido esta gran extinción cretácica, ni usted ni yo existiríamos.

Según nos dicen los paleoclimatólogos, el clima global fue húmedo y cálido durante todo el Jurásico (desde hace doscientos ocho millones de años hasta hace ciento cuarenta y seis millones de años). El nivel del mar comenzó a ascender y el agua oceánica, al adentrarse en tierra, inundaba grandes regiones continentales y creaba nuevos mares. La extensión de las tierras sumergidas hizo disminuir el albedo planetario, aumentando la absorción de la energía solar. La mayor humedad del aire, por su efecto invernadero, hizo que el clima global fuese también más cálido. Las masas continentales estaban cubiertas de una espesa vegetación. Abundaban los dinosaurios y otros reptiles marinos, voladores y terrestres. Los mares estaban llenos de peces, moluscos y otros animales, mientras que en la tierra iniciaban su tímida andadura evolutiva los pequeños mamíferos. La abundancia de los espesos estratos de creta, roca caliza porosa formada por conchas calcáreas de los animales que proliferaron por todos los mares, da nombre a este período geológico. El clima en las latitudes elevadas era mucho más templado que el actual.

Una enorme diversidad de reptiles dominaba el planeta, desde los que apenas tenían el tamaño de un roedor actual hasta los gigantescos dinosaurios. Ocupaban todos los nichos ecológicos (tierra, mar y aire) y se alimentaban

tanto de plantas como de animales. Los dinosaurios, animales probablemente de sangre fría, más afines a los climas cálidos que a los más frescos, poblaban casi todas las regiones emergidas de la Tierra y se acercaban hasta los círculos polares. Se sugiere que el enorme tamaño de muchos de ellos era solo posible gracias a la existencia de una mayor abundancia de biomasa vegetal, favorecida por el calor, la humedad y la alta concentración de CO<sub>2</sub>. Por esa época, aparecieron ya los primeros mamíferos verdaderos, es decir nuestros antecesores, que convivieron con los dinosaurios durante más de cien millones de años.

## LA EXTINCIÓN DE LOS DINOSAURIOS

La catástrofe comenzó hace sesenta y cinco millones de años con un cataclismo que borró de la faz de la Tierra a todos los dinosaurios y a gran parte de las especies vegetales y animales: la gran extinción cretácica. En este evento, se marchitaron y desaparecieron la mayor parte de las plantas. Todos los dinosaurios fueron eliminados de la tierra, de los cielos y de los mares. El plancton y los microorganismos marinos se vieron muy afectados. Con la alteración de la cadena alimentaria marina desaparecieron numerosas familias de moluscos primitivos y esponjas de mar, así como los amonitas de concha dura, y se redujo la gran diversidad de tiburones. En resumen, se eliminó más de la mitad de las especies que poblaban el planeta. Pero algunas aves primitivas (dinosaurios aviarios), la mayoría de los pequeños mamíferos, las tortugas, los cocodrilos, las salamandras y las ranas sobrevivieron, al igual que las serpientes, los moluscos bivalvos, los erizos y las estrellas de mar. Incluso a algunas plantas muy resistentes, capaces de soportar climas extremos, no les fue tan mal.

¿Qué causó esta masiva extinción que marca el final del Cretácico y que permitió que nosotros estemos aquí? Los científicos suelen coincidir en torno a dos hipótesis: un impacto extraterrestre, por ejemplo, un asteroide o un cometa, o un período de gran actividad volcánica. Incluso es posible que coincidieran ambas, ya que un gran impacto pudo desencadenar una alteración de la corteza terrestre y enardecer la actividad volcánica. Cualquiera de los escenarios habría ahogado los cielos con materiales que privaron a la Tierra

de gran parte de la energía del Sol, impidieron la fotosíntesis y extendieron la destrucción arriba y abajo de la cadena alimentaria. Una vez que se asentó el polvo, los gases de efecto invernadero bloqueados en la atmósfera habrían provocado que se disparara la temperatura, un repentino calentamiento global que acabó con muchos de los seres vivos que lograron sobrevivir a la prolongada oscuridad previa.

Los que creen en una extinción rápida se decantan por la caída de un bólido extraterrestre frente a las costas de la península de Yucatán, en el sitio de Chicxulub. En lo que era entonces un tranquilo mar tropical de aguas someras, cayó un enorme asteroide, de unos diez kilómetros de diámetro, que formó un cráter de casi doscientos kilómetros de diámetro. Aún hoy puede detectarse enterrado bajo dos kilómetros de sedimentos. La trayectoria oblicua del bólido se produjo desde el sureste y los materiales eyectados arrasaron con particular fuerza la costa del sur de Estados Unidos, que presenta señales geológicas de haber sufrido olas gigantescas.

La teoría del impacto extraterrestre proviene del descubrimiento de un estrato de roca, que data precisamente de la época de la extinción, cuya composición es rica en iridio. Esta capa de iridio fue descubierta por el físico estadounidense Luis Alvarez y su hijo Walter, geólogo, en Gubbio (Italia) y se ha confirmado en diversos lugares del mundo. Se encuentra distribuida por todo el planeta, en la tierra y en los océanos, y se denomina «límite K/T», por las siglas de Kretácico y Terciario. El iridio es raro en la Tierra, pero abunda en los meteoritos. Esto condujo a los científicos a afirmar que este elemento químico metálico se esparció por el planeta cuando algún objeto espacial impactó en algún lugar de la superficie terrestre y a continuación se evaporó.

Pero el interior de la Tierra también es rico en iridio, y el núcleo es el origen del magma que algunos científicos afirman que vomitaron numerosos volcanes. Los torrentes de lava inundaron grandes extensiones del planeta. Por ejemplo, se apilaron en una capa de más de 2,4 kilómetros de espesor sobre una superficie de 2,6 millones de kilómetros cuadrados de la India (cinco veces la superficie de España), dando lugar a las formaciones que se denominan plataformas basálticas del Decán. Este período de intensas

erupciones también se ha calculado que ocurrió hace sesenta y cinco millones de años y habría extendido el iridio por todo el planeta, junto con el polvo que ocultaba la luz solar.

El velo que se formó en la atmósfera por las partículas en suspensión y los aerosoles sulfurosos de los volcanes enfrió la superficie del planeta. Los dinosaurios, de sangre fría, no soportaron estas condiciones climáticas. El  $\text{SO}_2$  se oxida lentamente a  $\text{SO}_3$ , que al combinarse con el vapor de agua atmosférico tiende a formar el corrosivo ácido sulfúrico,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que da lugar a gotitas de nubes amarillentas, sulfatadas, que reflejan al espacio la luz solar y enfrían las capas bajas. Si estas nubes se forman en la estratosfera, como ocurre cuando las erupciones son intensas y alcanzan gran altura, las gotitas y los cristalitos de hielo permanecen más tiempo en suspensión, ya que la lluvia no puede lavarlas, y su efecto de enfriamiento persiste durante más tiempo. Según esta teoría, pudo haber episodios con fuertes emisiones volcánicas de  $\text{SO}_2$  que velaron el cielo y redujeron la insolación. Sin embargo, dataciones modernas indican que el vulcanismo del Decán ocurrió unos cuantos cientos de miles de años antes de la gran extinción. Algunos combinan las dos teorías: primero, un cambio climático causado por los gases que emitieron aquellos volcanes debilitó la vida terrestre y, después, la decadencia se agudizó con la caída del asteroide.

Esta extinción, independientemente de su causa, marcó el final del reino de terror del tiranosaurio y abrió la puerta a que los mamíferos se diversificaran con rapidez y evolucionaran en los nichos ecológicos que ahora les eran accesibles con menor riesgo. La mayor parte de estos mamíferos primitivos sobrevivieron a la catástrofe cretácica. ¿Cómo podemos conocer este dato? Los paleontólogos localizan por todo el mundo el depósito de iridio del límite K/T, luego analizan los fósiles que hay por debajo (anteriores al evento) y por encima de este (posteriores al evento). Se observa la presencia de numerosos fósiles de pequeños roedores por encima del estrato, lo que indica que pertenecen a los supervivientes a la catástrofe.

El extraordinario auge de los mamíferos y de las aves solo fue posible gracias a esta gran catástrofe planetaria. De esta forma, los mamíferos evolucionaron sin trabas hasta dar lugar, hace apenas doscientos mil años (un par de minutos en términos geológicos) al *Homo sapiens sapiens*: nosotros.

## LOS MAMÍFEROS

Al parecer, los mamíferos fueron el resultado de una lenta evolución a lo largo de decenas de millones de años, a partir de unos reptiles raros llamados sinápsidos. Al principio eran de pequeño tamaño, de unos treinta gramos, como las musarañas actuales, vivían en madrigueras y poseían una estructura social simple. Desarrollaron algunas características que les permitieron cumplir eficazmente con las Fuerzas de la Vida y por eso sobrevivieron.

El proceso esencial de la evolución de los mamíferos, lo que les confirió una gran ventaja de supervivencia, fue el cambiar de un modelo de animal de sangre fría (poiquilotermos), como los reptiles, al modo de sangre caliente (homeotermos). Esta es una ventaja que también desarrollaron las aves y justifica la supervivencia de ambos a la catástrofe cretácica. Estos seres homeotermos eran los primeros en ser capaces de mantener constante su temperatura corporal al margen de la temperatura ambiental. Ello les permitió colonizar regiones geográficas donde las bajas temperaturas hacían imposible la supervivencia de los reptiles. Para ello desarrollaron mecanismos que compensaran el frío y les permitieran regular fácilmente su temperatura corporal, que se ajustó a los máximos que normalmente se alcanzan en el ambiente exterior (a la sombra, que diríamos hoy) entre 37 y 39 °C. Si la temperatura ambiente era excesiva o su organismo producía demasiado calor, por ejemplo por una intensa actividad física, su organismo activaba eficaces sistemas de refrigeración. Por el contrario, cuando bajaba la temperatura ambiente, se ponían en marcha los mecanismos que evitaban la pérdida de calor corporal. Una adaptación que tiene mucho que ver con la termorregulación fue el desarrollar una piel cubierta de pelo, que es una característica universal de todos los mamíferos terrestres, excepto del ser humano. Es curioso que nuestra especie perdiera el pelo corporal también por motivos de termorregulación, como veremos más adelante.

Esta ventaja fisiológica de regular la temperatura propia independientemente de la ambiental les permitió adaptarse a vivir en las horas más frías, cuando los reptiles se encontraban aletargados. Por eso todos los primeros mamíferos desarrollaron adaptaciones para la vida nocturna. Esto requirió, por ejemplo, especializar sus ojos con una mayor sensibilidad para

ver a bajas intensidades de luz. La mayor parte de los mamíferos desarrollaron una duplicación genética del pigmento de sus células retinianas (los conos), unos sensibles a los fotones de longitud de onda más corta (azul) y otros sensibles a los de onda más larga (rojo). Esto les proporcionó una visión rudimentaria del color. Hoy día todos los mamíferos poseen esta visión dicromática del color. Excepto los primates, que tenemos una visión tricromática. También desarrollaron una gran capacidad de discriminación auditiva y olfativa, facultades que les permitían desenvolverse en la oscuridad total.

## EL CEREBRO DE MAMÍFERO

Mantener la temperatura corporal constante es un proceso energéticamente costoso. Es lo mismo que sucede con nuestras viviendas: en invierno tenemos que consumir mucha energía (y euros) para mantenerla caliente y en verano gastamos gran cantidad de energía eléctrica (y más euros) para enfriarla. Un mamífero consume en reposo un diez por ciento más de energía que un reptil de su mismo peso. Por lo tanto, necesita introducir en su organismo más combustible y requiere una mayor cantidad diaria de comida. El conseguir alimento, como ejercer el resto de las Fuerzas de la Vida, es un proceso que requiere esfuerzo y habilidades, precisa el ser capaz de obtener mucha información del entorno, de procesarla adecuadamente y de tomar las decisiones más acertadas y rápidas para que sean eficaces. Todas esas cualidades se las proporcionó una herramienta desconocida hasta entonces: una poderosa corteza cerebral.

En los mamíferos, el cerebro alcanza su estructura completa con la incorporación de la neocorteza. Se trata de una lámina fina de células y fibras nerviosas compuesta por seis capas que recubre todo el techo del encéfalo como una funda. Este es un rasgo definitorio de los mamíferos, como lo son las glándulas mamarias o los huesecillos del oído medio. Permitió el almacenamiento y procesamiento de la información como no se había logrado hasta entonces en ningún otro ser vivo.



El volumen del cerebro en los vertebrados depende del tamaño corporal. El desarrollo de este órgano fue tan grande en los mamíferos que estos tienen cerebros diez veces mayores que otros vertebrados de su misma talla, por ejemplo, los reptiles. Pero la clave de la mayor inteligencia no es solo la consecuencia del mayor tamaño del cerebro, sino del desarrollo de la corteza cerebral.

Estas mejoras en el funcionamiento cerebral permitieron a los mamíferos primitivos desarrollar estrategias de refugio y de refrigeración más eficaces. Podían excavar túneles, construir diques o nidos. Desde entonces, el cerebro de estos animales homeotermos podía estar activo de manera continua, lo que les permitía dedicarse a numerosas actividades. El cerebro comenzó a dominar sobre el entorno. Cazaban y evitaban ser cazados. Se movían con rapidez. Podían desarrollar estrategias ingeniosas para conseguir la comida. Se desarrollaron funciones cerebrales que hasta entonces no existían: atención, moción, emoción y comunicación. Era un cerebro diseñado para buscar alimento y para iniciar un mayor nivel de socialización. El desarrollo de la corteza cerebral permitió a los mamíferos niveles de comunicación, de sentir emociones y de desarrollar cotas de consciencia como no se habían conocido en los seres vivos precedentes. Ya estaban sentadas las bases para nuestra aparición, que llegaría unos millones de años después.

También se modificó el aparato locomotor, se mejoró la ergonomía del movimiento para ahorrar energía, disminuyó la superficie corporal y se desarrolló un aparato digestivo más complejo y eficaz. Además, sufrieron modificaciones el aparato circulatorio y el respiratorio. Todas estas adaptaciones permitieron a los primeros mamíferos utilizar nichos ecológicos en los que no sufrían la competencia de los reptiles y así ir evolucionando a formas más complejas. Los mamíferos ya sin competidores importantes iniciaron su enorme diversificación evolutiva que les permitió desarrollar soluciones eficaces para cumplir con las Fuerzas de la Vida en los entornos y las condiciones climáticas en las que tuvieron que evolucionar.

LAS INNOVACIONES NUTRICIONALES

Vamos a comentar algunas de las características nutricionales de los mamíferos, ya que van a resultarnos útiles más adelante para entender la evolución de nuestra propia nutrición.

Lo que caracteriza a las diferentes formas de alimentación de los mamíferos son las herramientas que utilizan para procesar y desmenuzar las moléculas complejas (polisacáridos, grasas y proteínas) de los animales y las plantas hasta convertirlas en las unidades elementales que constituyen los nutrientes (monosacáridos, ácidos grasos y aminoácidos). Esas herramientas son, fundamentalmente, la dentadura y el aparato digestivo. La evolución desarrolló tres grandes modelos:

1. Los herbívoros, que poseen una dentadura con incisivos planos que les permiten cortar la hierba y abundantes muelas planas y fuertes para triturar los vegetales. Su aparato digestivo es muy grande a causa de que la materia vegetal requiere ser fermentada en su interior mediante la actuación de las bacterias que lo colonizan. Hay dos modalidades. Por un lado, los rumiantes, como las vacas o las gacelas, que tienen un gran estómago y la facultad de comer deprisa para luego regurgitar y masticar mejor (rumiar) lo que han comido cuando están en calma y en seguridad. Por otro, los no rumiantes, como los caballos o los gorilas, que fermentan los vegetales en un gran intestino grueso (colon). Este es otro ejemplo del poder de las bacterias. La nutrición de todos los animales herbívoros que existen depende del trabajo de las bacterias que llenan sus aparatos digestivos.

2. Los carnívoros se caracterizan por sus caninos muy desarrollados (colmillos), para atrapar y desgarrar a sus presas, y unas muelas carniceras de bordes cortantes, que seccionan los trozos de carne que ingieren sin masticar. Las características de su aparato digestivo es un largo intestino delgado, que es donde se digieren las proteínas y las grasas que abundan en la carne, y un intestino grueso (colon) muy corto, lo que impide que puedan digerir cualquier tipo de vegetal. En ellos podemos considerar dos categorías. Los carnívoros estrictos, que solo pueden consumir carne, como el tigre, el león o el gato, y los carnívoros facultativos, que también pueden consumir algunos pocos vegetales, como los cánidos y el ser humano.

3. Los omnívoros pueden alimentarse tanto de animales como de vegetales. Comparten características dentales y digestivas de los herbívoros y los carnívoros. No son rumiantes, tienen un largo intestino delgado donde digerir la carne y el pescado, pero también un largo intestino grueso (colon) donde digerir la hierba. Son, por ejemplo, el oso y el cerdo.

Muchos textos atribuyen al ser humano la característica de omnívoro. Pero no lo somos en sentido estricto. A un cerdo, si lo encerramos durante un mes en una carnicería bien abastecida vivirá tan a gusto y, al final, hasta habrá ganado peso. Si luego a ese mismo cerdo lo encerramos durante otro mes en una finca donde solo haya hierba y encinas, como hacen en nuestra tierra extremeña durante la montanera de los cerdos ibéricos, el animal también vivirá feliz y, al cabo del mes, habrá aumentado su peso y su grasa, y habrá fabricado maravillosos jamones. Claro, es omnívoro, su fisiología y su aparato digestivo le permiten poder comer de todo. A cualquiera de nosotros si nos encerraran un mes en una carnicería sobreviviríamos felices y hasta engordaríamos y aumentaría nuestro colesterol en sangre. Pero si nos encerraran un mes en una dehesa nos moriríamos de hambre. No seríamos capaces de cubrir todas nuestras necesidades nutricionales solo a base de hierba, raíces y bellotas. Claramente se ve que los seres humanos no somos omnívoros en el sentido estricto del término; tenemos un colon más corto que el de los omnívoros. Solo podemos alimentarnos de algunos vegetales especiales como las frutas, las verduras y las hortalizas, que suelen tener algunas cantidades de almidón y azúcares sencillos que podemos digerir y asimilar. Y ahí se acaban todas nuestras posibilidades de alimentación vegetal natural. Los cereales, las legumbres y las patatas no los podemos consumir a no ser que los hayamos sometidos al calor mediante alguna forma de cocinado (desde las palomitas de maíz hasta las *fabes*). Por este procedimiento modificamos la estructura molecular de los cereales y las legumbres, y neutralizamos algunos agentes tóxicos que contienen, y así permitimos que nuestro aparato digestivo pueda asimilarlos.

En los mamíferos se acrecentaron los mecanismos de penalización y recompensa por cumplir con la obligación de alimentarse. Los mecanismos de regulación del hambre y saciedad, y sus sensaciones de necesidad urgente de

comer o de plenitud placentera, se incrementaron en los mamíferos gracias al desarrollo de nuevos sistemas neuronales en su corteza cerebral que permitieron un nuevo elemento: la emoción.

## EL INYECTOR DE GENES

Los primeros mamíferos se reproducían mediante huevos, como los reptiles de los que procedían. Aún lo siguen haciendo algunos, como el ornitorrinco. Luego surgieron los mamíferos marsupiales, que desarrollaban sus fetos en la bolsa marsupial; algunas especies han sobrevivido en el aislamiento protector del continente australiano. Finalmente, aparecieron los mamíferos placentarios, que han dominado el mundo.

El procedimiento diseñado por la evolución para mezclar genes en los mamíferos consiste en que el macho, a través de una especie de sistema de inyección al que denominamos pene, introduce su carga de gametos (semen) dentro del organismo de la hembra. Los espermatozoides, impulsados por sus colas, avanzan por las paredes húmedas del aparato genital de la hembra hasta que uno de ellos tiene la fortuna de toparse con el óvulo y lo fecunda. Es en esa intimidad confortable y segura donde ocurre la mezcla del material genético.

Este es un proceso complejo, lleno de riesgos y metabólicamente costoso. El espermatozoide carece de reservas energéticas y posee un poderoso flagelo motor. En la mayor parte de los mamíferos apenas sobrevive unas horas tras abandonar los testículos donde se fabrican. Cuando se produce el acto sexual, el macho lanza millones de estos proyectiles de cabeza genética contra el o los óvulos.

La naturaleza también recompensa a aquellos que cumplen con esta Fuerza de la Vida con el placer sexual. Mediante estudios electromiográficos y neurofisiológicos se ha demostrado que en los animales, en unos más que otros, la cópula se acompaña de una sensación instintiva placentera. Es un proceso fisiológicamente muy complejo, ya que intervienen numerosos órganos, y que en su conjunto se denomina orgasmo. Este mecanismo de placer está más arraigado en los machos, ya que en ellos el orgasmo se asocia

siempre con la emisión del esperma mediante la eyaculación. En las hembras no es tan evidente, pues ellas no emiten sus óvulos durante el coito, sino al comienzo del celo.

La reproducción no se termina con la fecundación. Durante el cuidado de las crías es cuando empiezan los verdaderos problemas, que son mínimos en algunas especies y abrumadores en otras. Por eso el reino animal despliega un amplio abanico de estrategias con respecto a todo lo que tiene que ver con el desarrollo y el cuidado de los descendientes. En los mamíferos, el número de crías que una hembra puede conducir con éxito a través de la gestación y la lactancia es muy limitado. El macho, en la mayor parte de los casos, no interviene para nada en la nutrición y la atención a las crías, solo en la defensa del rebaño frente a los depredadores, y no en todas las especies. El número de crías que puede engendrar un macho es ilimitado.

## MECANISMOS DE DEFENSA

Una de las ventajas evolutivas que desarrollaron pronto los mamíferos fue una hábil y eficaz capacidad para defenderse frente a los innumerables enemigos que se podían encontrar en sus correrías en busca de comida o de pareja y para evitar los daños de las desatadas fuerzas de la naturaleza. Su potente cerebro, en especial su recubrimiento neuronal (el neocórtex), y el desarrollo de un sistema esquelético y locomotor eficaz jugaron un papel esencial. Desde los primeros tiempos, los mamíferos han tenido tres estrategias fundamentales de defensa:

1. La huida. Uno de los mecanismos más comunes y eficaces de defensa de los mamíferos es salir corriendo frente a cualquier amenaza. Los potentes órganos de los sentidos (olfato, vista, oído) detectan el peligro e informan al cerebro. En un instante, este evalúa la situación y da las órdenes necesarias a través de los sistemas de control hormonal y nervioso para poner en marcha aquellos órganos y procesos metabólicos indispensables para garantizar la supervivencia. Comienzan a vaciarse los depósitos de glucosa del hígado y los de grasa del tejido adiposo para que haya abundancia de combustibles metabólicos circulando por la sangre. Aumentan la glucemia, para mantener el cerebro alerta, y los ácidos grasos en sangre, para que los músculos se puedan

contraer con eficacia. Se acelera el ritmo del corazón, para permitir que la sangre circule más deprisa y llegue a los músculos y al cerebro, así como el de la respiración, para que entre más oxígeno y se elimine mejor el exceso de CO<sub>2</sub> que se produce con el metabolismo acelerado del músculo al contraerse.

2. La lucha. Es otro método eficaz en algunas especies y cuando la huida no es posible. El cerebro juega aquí un papel aún mayor. Se activan las mismas funciones que en el caso de la huida, puesto que la lucha también exige una gran actividad muscular, pero también otros mecanismos cerebrales que confieren al animal mayor agresividad y mayor grado de alerta para estar atento tanto al ataque como a la defensa.

3. La ocultación. Para defenderse de un peligro, muchos mamíferos recurren a esconderse y a permanecer inmóviles durante el tiempo necesario hasta que la amenaza desaparece. Se ayudan de sistemas de camuflaje que favorecen su ocultación protectora. Algunos acrecientan la protección de la inmovilidad con una serie de trucos: la emisión de olores desagradables, como la mofeta, o rodearse de corazas defensivas, como el armadillo o el erizo.

En los mamíferos se desarrolló aún más la capacidad de sentir dolor y de recordar las experiencias dolorosas y utilizar esa experiencia protectora que es el miedo. En ellos, la eficacia de estos sistemas se vio enriquecida por la contribución de esa fina lámina de neuronas que es la corteza cerebral. El recuerdo de las situaciones dolorosas se enriqueció con aspectos emocionales que, al parecer, no poseen ni las aves ni los reptiles.

## SOCIALIZACIÓN

Una de las principales consecuencias de la corteza cerebral en los primeros mamíferos fue que desarrollaron un mayor grado de socialización, lo que les proporcionaba unos comportamientos más eficaces frente al entorno, lo que les permitía mayores tasas de reproducción y de supervivencia. Por eso los grados de socialización variaron mucho a lo largo de la evolución según los entornos en los que desarrollaba la vida de cada especie de mamífero y las ventajas que cada forma de agrupamiento les otorgaba. Abundaremos en ello con más detalle en el próximo capítulo.

## Los primates

El clima cálido y húmedo de comienzos del Eoceno permitió la proliferación y diversificación de los primates. Pero un nuevo cambio climático determinaría la evolución de nuestros antecesores. Hace cincuenta millones de años se inició un enfriamiento global, persistente y progresivo, que duraría hasta hace apenas once mil años. Este descenso de la temperatura favoreció la evolución de la solución más eficaz y versátil para la supervivencia de los primates en tales condiciones adversas: el cerebro.

Tras la catástrofe ocurrida al final del Cretácico, hace sesenta y cinco millones de años, el planeta volvió a calentarse durante el Paleoceno. Los paleoclimatólogos informan de que en este período el clima era semejante al de algunas épocas muy cálidas del Cretácico. Cocodrilos y tortugas habitaban latitudes árticas. Crecían palmeras en Siberia. El agua del mar estaba varios grados más caliente que en la actualidad, tanto en superficie como en profundidad. El plancton subtropical del Atlántico llegaba unos 15° de latitud más al norte y los corales ocupaban una banda tropical más ancha que la que ocupan hoy.

El calentamiento progresivo del Paleoceno se interrumpió por el llamado Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM, por sus siglas en inglés). Los paleoclimatólogos confirman que fue un abrupto evento de calentamiento que apenas duró unos ochenta mil años, pero influyó enormemente en la evolución de la vida animal. Las temperaturas continentales subieron entre 5 y 7 °C sobre unos niveles térmicos anteriores que ya resultaban elevados. En los mares, las aguas superficiales costeras de la Antártida pasaron de tener una temperatura de 13 °C a otra de 20 °C, y en el Ártico se llegaron a alcanzar los 24 °C. La temperatura se mantuvo elevada durante toda la primera parte del Eoceno,

hasta hace unos cincuenta millones de años. Es de destacar la situación del Ártico, sin hielo, con inviernos mucho menos fríos que los actuales. Tampoco estaba helada la Antártida.

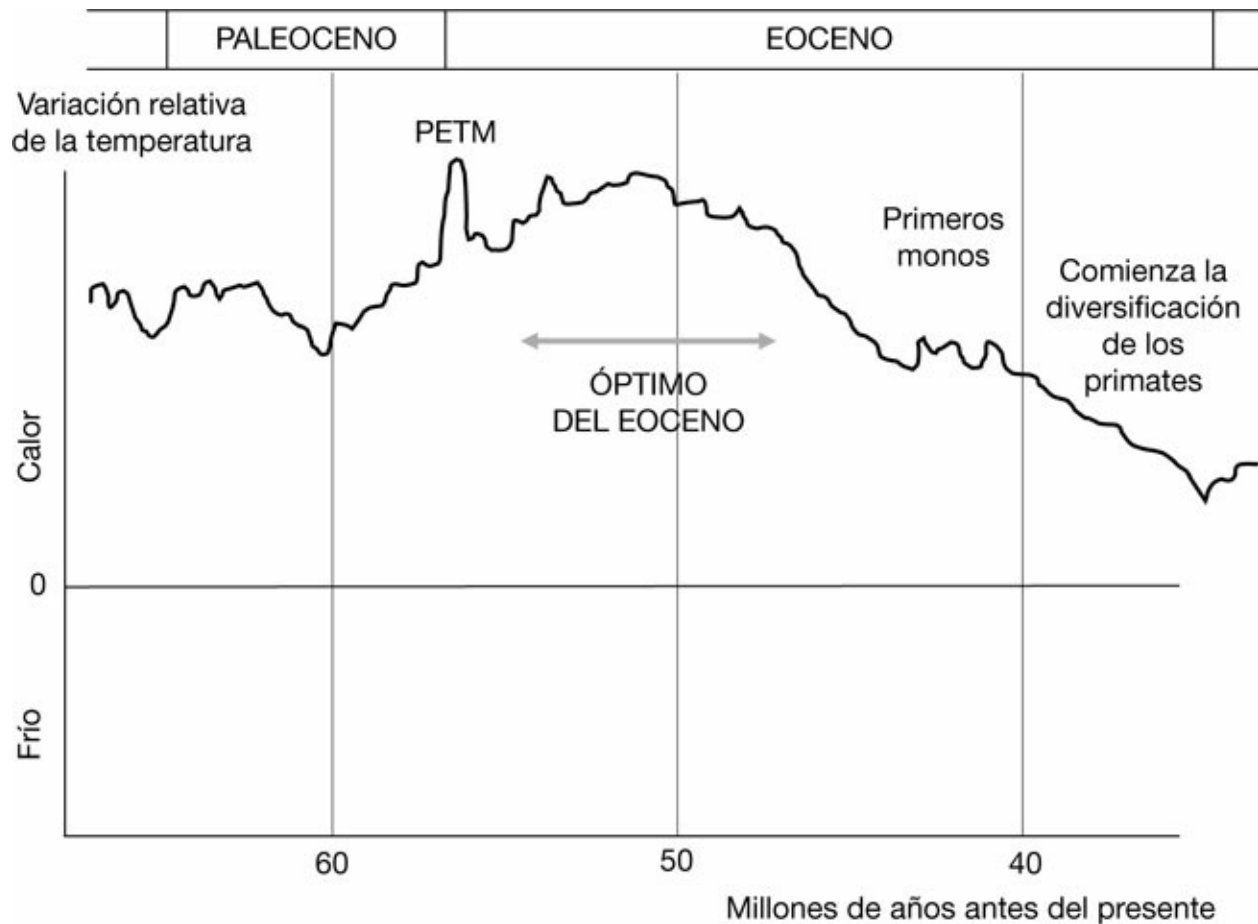


Figura 9.1. Tras el evento catastrófico de hace sesenta y cinco millones de años, la temperatura comenzó a subir durante la segunda mitad del Paleoceno, con un pico breve de incremento térmico, el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM). Luego la temperatura siguió subiendo hasta alcanzar un máximo en el primer tercio del Eoceno (óptimo). A partir de ahí, el planeta comenzó a enfriarse.

## LOS MONOS

Entre los mamíferos que surgieron en estos períodos están los protoprimates, que habitaban todos los continentes y debían de tener un aspecto similar al que hoy presentan los lémures. Colonizaron también Madagascar, entonces muy cerca de África. Luego esta isla se alejó del continente y quedaron allí las formas primitivas de monos que aún viven. Se han encontrado huesos fósiles



de protoprimates en Marruecos, en terrenos datados en unos sesenta millones de años de antigüedad. Eran muy diferentes a los primates que existen hoy. Se parecían más a las ardillas, tanto en tamaño como en apariencia, pero ya comenzaban a mostrar algunas de sus adaptaciones características, como la capacidad de agarrar cosas con las manos y los pies para manipular objetos y trepar a los árboles.

Los protoprimates comenzaron a experimentar cambios evolutivos como el aumento de tamaño del cráneo y de los ojos, mientras que sus hocicos se achataban. En la base del cráneo se estaba produciendo una transformación esencial que iba a marcar una gran diferencia entre los primates y el resto de los mamíferos. Allí hay un agujero por el que se conecta el cerebro con la médula espinal, ese haz de nervios que recorre toda la espalda; es el foramen magnum (literalmente, «el gran agujero», en latín). La posición del agujero occipital es un fuerte indicador del ángulo que forma la columna vertebral con la cabeza y determina la disposición del resto del cuerpo respecto al cráneo, que puede ser horizontal, como por ejemplo en el caballo, inclinado en un chimpancé y completamente vertical en un ser humano. Durante el Eoceno, hace más de cuarenta millones de años, el foramen magnum de algunas especies de primates estaba empezando a desplazarse desde la parte posterior del cráneo hacia el centro. Esto sugiere que comenzaban a mantener sus cuerpos erguidos mientras saltaban de rama en rama o se sentaban a descansar.

Al final del Eoceno y comienzos del Oligoceno, hace entre cuarenta y treinta millones de años, comenzaron a diversificarse las especies de primates que solemos denominar monos (platirrinos, catirrinos, mandriles, macacos, monos araña, etc.), con largas colas, un cráneo pequeño en relación con el cuerpo y los brazos de longitud similar a las patas.

Estos monos prosperaron en el Oligoceno, una época de grandes cambios geológicos que afectaron a la configuración de los continentes y que modificó el clima de amplias regiones. América del Norte y Europa se distanciaron y se convirtieron en continentes distintos. Se formó la gran grieta que es el gran valle del Rift, en África oriental, la India chocó contra Asia y la presión inició el pliegue que originó la cadena del Himalaya y la meseta tibetana. Estos eventos geológicos desencadenaron cambios climáticos globales: el clima se enfrió (aunque seguía siendo más caliente que el actual) y ello contribuyó al

florecimiento de los mamíferos, pues las grandes extensiones de selvas se sustituyeron por praderas arboladas, capaces de alimentar a grandes manadas de herbívoros, que a su vez permitieron la evolución de numerosas especies de carnívoros. En este período, la Tierra adquirió casi su aspecto actual, y la diversidad animal conoció un gran esplendor.

Cuando el continente americano se alejó de África, los primates se dividieron en dos grupos que a lo largo de los siguientes millones de años siguieron caminos evolutivos diferentes, lo que dio origen a los monos del Nuevo Mundo (platirrinos) y a los monos del Viejo Mundo (catirrinos), como suelen denominarse.

## EL CEREBRO DE LOS PRIMATES

El enfriamiento progresivo del clima impulsó la evolución de los primates. La respuesta adaptativa para poder sobrevivir en un entorno cada vez más difícil, escaso de alimentos y lleno de peligros, fue el desarrollo de un gran volumen de corteza cerebral y una mayor densidad en el empaquetamiento neuronal. Esto convertía a los primates en los mamíferos con mayor cantidad de células cerebrales en comparación con cualquier otro mamífero terrestre del mismo peso. La mayor corteza cerebral les proporcionaba una elevada capacidad de procesamiento de la información, un cumplimiento más eficiente con las Fuerzas de la Vida y, por tanto, unas mayores posibilidades de supervivencia y de reproducción.

Una de las habilidades más características de los primates, y posiblemente uno de los rasgos más definitorios y diferenciadores de otros mamíferos, fue el desarrollo de su sistema visual y sus relaciones con el movimiento; lo que se denomina la «coordinación visomotora». Esta mejora en la vista fue consecuencia de una serie de adaptaciones que se fueron sumando a lo largo de millones de años. En primer lugar, los ojos cambiaron de posición. En los primates miran hacia delante, mientras que en la mayor parte de los mamíferos son laterales. Esto facilitó la visión estereoscópica que poseemos todos los primates y aumentó la densidad de fotorreceptores en la retina. Hace cuarenta millones de años, una mutación que sucedió en un antepasado común a monos, simios y seres humanos duplicó el gen para el

pigmento de los conos de la membrana interior del ojo. La retina de los primates adquirió así tres tipos de células sensibles al color (conos) con tres pigmentos diferentes, lo que permitió la visión tricromática del color.

Todos estos cambios se acompañaron de un aumento de la corteza cerebral visual y de la conexión de esta con las áreas motoras, lo que facultó la guía visual del movimiento muscular, así como facilitó el control de la movilidad de las manos, que permitió una manipulación de precisión, y un mayor dominio de los músculos de la cara, hecho que tuvo una gran importancia en la evolución posterior al permitir una mayor comunicación emocional a través de la mímica. Por el contrario, los primates perdieron sentido del olfato y de la comunicación olfativa, que no era tan útil para sobrevivir en un entorno selvático.

Pero durante esa época del Eoceno, nuestros ancestros sufrieron otras mutaciones genéticas que ocasionaron importantes cambios metabólicos y que nosotros hemos heredado. Estos no solo fueron importantes para su supervivencia y evolución entonces, sino que fueron esenciales para nuestra propia evolución. Los cambios que hemos heredado, cuando se enfrentan a las condiciones de vida en las sociedades opulentas y desarrolladas en las que hoy vivimos, son la causa de numerosos problemas que afectan a nuestra salud. A los que estén interesados en profundizar en este interesante aspecto de nuestra evolución les recomiendo la lectura de mi libro *El mono obeso* (Crítica, 2004, y Booket, 2004).

## LA PÉRDIDA DE LA CAPACIDAD DE SINTETIZAR VITAMINA C

El ácido ascórbico es una sustancia con una gran capacidad antioxidante, esencial para la síntesis de colágeno, la proteína más abundante en nuestro organismo y un componente fundamental del tejido conjuntivo y de los cartílagos. Por esta circunstancia la deficiencia crónica en ácido ascórbico o vitamina C ocasiona, entre otras, una enfermedad del tejido conjuntivo llamada escorbuto.

Todos los animales herbívoros pueden fabricar el ácido ascórbico a partir de la glucosa que contienen, en mayor o menor cantidad, todos los alimentos vegetales. Los carnívoros también pueden sintetizar la vitamina C,

aunque la pueden adquirir de la carne y de las vísceras de sus presas. Los animales pueden fabricarla porque sus células del hígado (o del riñón en algunos casos) poseen una enzima, la L-gluconato oxidasa, que cataliza la conversión metabólica de glucosa en vitamina C. Pero hace unos cuarenta millones de años en algún antecesor primate ocurrió una mutación y perdió la capacidad de sintetizar L-gluconato oxidasa. En consecuencia, algunos primates y entre ellos los simios y los humanos, no pueden fabricar la vitamina C.

Por esta razón, los simios y nosotros nos vimos obligados a conseguir ese nutriente tan necesario mediante la ingestión de alimentos que lo tuvieran en abundancia como frutas, tallos, hojas tiernas, carne y vísceras crudas, para así gozar de sus efectos protectores contra la oxidación. La amplia distribución de fuentes de vitamina C en los vegetales de los bosques tropicales y la capacidad de los primates para consumirlos aseguró que ese nutriente pudiera ser aportado solo con la dieta, ahorrando el esfuerzo metabólico de sintetizarlo.

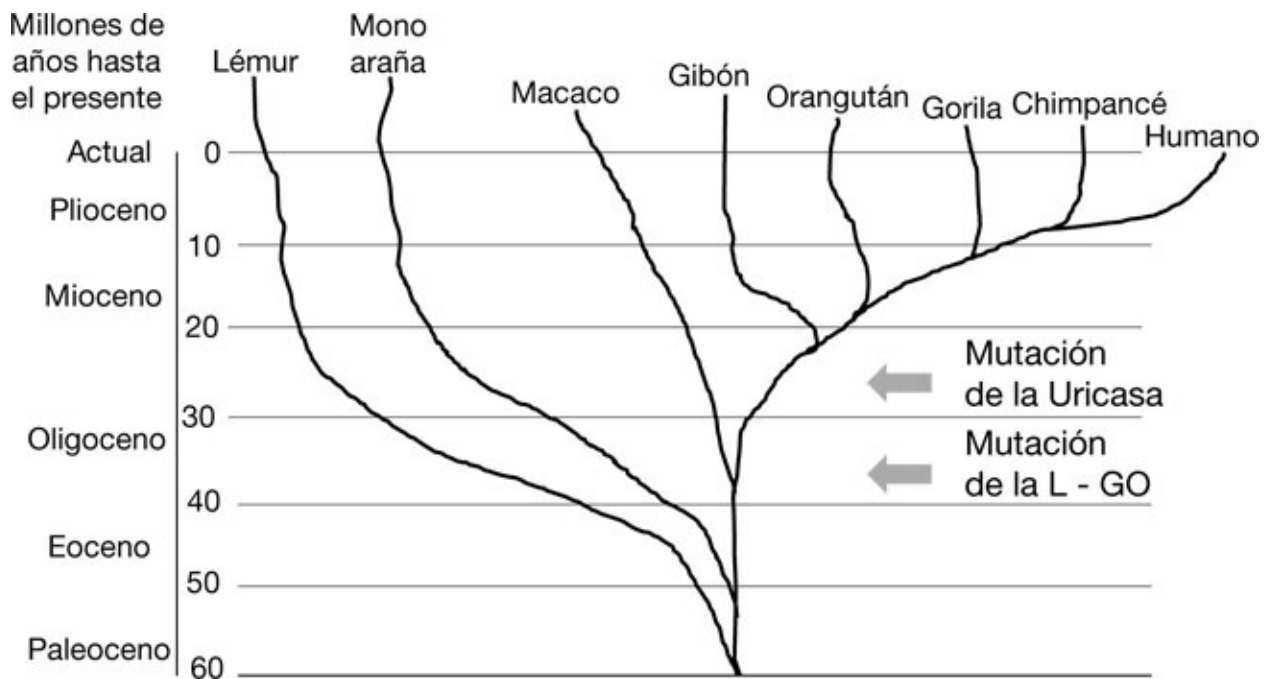


Figura 9.2. Dos mutaciones, que afectaron casi en exclusiva a los simios, ocasionaron dos cambios metabólicos importantes: la imposibilidad de fabricar vitamina C a partir de los azúcares, la mutación del gen de la L-gluconato oxidasa (L-GO) y la imposibilidad de metabolizar el ácido úrico, la mutación del gen de la uricasa.

Esto produjo una situación de extremo riesgo que, sin embargo, tuvo consecuencias positivas para nuestro desarrollo. Como antioxidante, la vitamina C es uno de los agentes que se encargan de controlar los temibles radicales libres de oxígeno. Ya hemos visto que estos agentes oxidantes atacan diversas moléculas en nuestro organismo, y en especial el ADN, ocasionando desorganización de su estructura y mutaciones. Posiblemente estos antecesores, con sus limitadas capacidades de controlar los radicales libres, estuvieron expuestos a un incremento de las mutaciones, que en muchas ocasiones serían perjudiciales y en otras beneficiosas. Algunos opinan que esta deficiencia metabólica en la síntesis de vitamina C contribuyó en gran medida a nuestra propia evolución.

Esta herencia ha tenido importantes repercusiones para nuestra historia y nuestra salud. Científicos como el premio Nobel Linus Pauling han dedicado grandes esfuerzos a este asunto. La vitamina C es tan importante que cualquier animal necesita disponer de grandes cantidades de este antioxidante para estar sano. Por ejemplo, se ha calculado que un gorila ingiere a diario 4,5 gramos de ella con su dieta de hojas y tallos. Si trasladáramos estos datos a un ser humano, resultaría que una persona de setenta kilos de peso debería ingerir entre dos y cuatro gramos de vitamina C cada día. Dado que esta casi desaparece en los alimentos cocinados a altas temperaturas, tendríamos que comer una gran cantidad de frutas, de vegetales y de carne cruda para poder obtener esta dosis diaria.

Esta enorme dependencia de un aprovisionamiento diario de ácido ascórbico ha tenido graves consecuencias pasadas y presentes. Los seres humanos hemos sufrido períodos y circunstancias históricas de deficiencias alimentarias que justifican que enfermedades como el escorbuto deban ser incluidas entre las grandes epidemias de la humanidad. Pero además, los estudios más recientes muestran que en la base de muchos casos de obesidad y de enfermedades de la opulencia, como es el caso de la diabetes, subyace una deficiencia crónica leve de vitamina C.

Somos animales dependientes del ácido ascórbico y dado que esta vitamina no se acumula en el organismo, gastamos lo que tenemos y lo que nos sobra lo eliminamos por la orina. Por eso, para tener salud, debemos

garantizar un aporte diario de alimentos ricos en vitamina C o su suplemento farmacológico.

## LA PÉRDIDA DE LA CAPACIDAD DE METABOLIZAR EL ÁCIDO ÚRICO

El ácido úrico que aparece como residuo metabólico en el organismo de cualquier animal tiene dos procedencias fundamentales: por un lado, la degradación metabólica de los ácidos nucleicos y los nucleótidos del propio organismo, y, por otro, la degradación en el hígado de las nucleoproteínas de los alimentos. La mayor parte de los mamíferos suelen tener niveles de ácido úrico en sangre muy bajos, inferiores a 2 mg/dL. Sin embargo, todos los primates tenemos niveles de ácido úrico en sangre más elevados, por encima de los 4 mg/dL.

Esta diferencia se debe a que si bien todos los animales degradan los componentes de su material genético (nucleótidos, purinas) hasta formar ácido úrico, la mayoría de ellos oxidan el ácido úrico hasta una sustancia llamada alantoína por acción de una enzima llamada uricasa (urato oxidasa). Esta es la razón de que todos los animales tengan niveles de ácido úrico en sangre muy bajos. La alantoína se elimina por la orina. Pero hace algo más de veinte millones de años (durante el Mioceno) se produjo una mutación que suprimió la enzima uricasa en algunos primates. Así, el ácido úrico no podía transformarse en alantoína y aumentaron sus niveles en sangre. Esto confirió a los primates alguna ventaja en relación con las Fuerzas de la Vida, por lo cual la mutación fue potenciada por la selección natural y acabó apareciendo esta ausencia de uricasa en todas sus especies, incluidos los seres humanos. Pero ¿qué ventajas podía proporcionar esta deficiencia enzimática?

En el Mioceno el clima seguía siendo cálido y húmedo y gran parte del planeta estaba cubierto de espesas selvas. Nuestros ancestros primates vivían en estas masas forestales y seguían una dieta exclusivamente a base de vegetales, muy reducida en sodio y que produce tensiones arteriales bajas. Esto no es grave en un herbívoro como una vaca o una oveja, que vive con su cabeza al mismo nivel o, casi siempre, más baja que su corazón; en ellos el riego sanguíneo del cerebro está garantizado. Pero es un peligro en los primates, a los que esa baja presión arterial ocasionaba problemas en el riego

cerebral en sus brazos por las ramas de los árboles y en sus, cada vez más frecuentes, períodos de bipedestación. En todas estas situaciones la cabeza se eleva por encima del corazón y se puede comprometer su riego sanguíneo. Haga la siguiente prueba: siéntese y tómese la tensión arterial en la muñeca manteniendo la mano a nivel del corazón. Luego repita la medida pero con la mano colocada por encima de la cabeza. Comprobará la gran diferencia de presión sanguínea en uno y otro caso.

Por esto, uno de los factores que contribuyeron a la bipedestación fue la desaparición de la enzima uricasa, que impedía la oxidación del ácido úrico, el cual aumentaba algo en sangre y producía subidas de la presión arterial, que favorecían la llegada de sangre al cerebro. Esto no es una mera especulación darwiniana, ya que se ha verificado en numerosos estudios con animales de laboratorio y en personas. En los modelos experimentales en ratas se demuestra cómo una hipotensión producida por un déficit de sal puede compensarse por un aumento del ácido úrico.

Posiblemente la razón de que los seres humanos seamos los animales con mayores cifras de ácido úrico en sangre se debe a la necesidad de favorecer el riego sanguíneo de nuestro cerebro mientras estamos en bipedestación. Pero esta adaptación que confería ventajas de supervivencia a nuestros ancestros primates hoy es causa de enfermedades para sus descendientes que habitamos las sociedades opulentas. Esto nos obliga a restringir el consumo de alimentos ricos en purinas y sus derivados, sobre todo en aquellas personas propensas a desarrollar la temida artritis hiperuricémica o gota.

## EL MONO BORRACHO

Estudios científicos recientes han descubierto que nuestra afición por las bebidas alcohólicas se originó hace más de diez millones de años. Un simio, antecesor común de gorilas, chimpancés y seres humanos, sufrió una mutación en el gen que codifica la síntesis de la enzima alcohol deshidrogenasa, que se encarga de metabolizar el etanol ingerido. El gen mutado fabrica una enzima que hace desaparecer el alcohol del organismo cuarenta veces más rápido que en el resto de los animales. Esto permite que gorilas, chimpancés y nosotros podamos consumir cantidades moderadas de alcohol sin producirnos graves

alteraciones, ya que lo eliminamos de nuestro organismo con rapidez. Otros animales, cuando consumen alimentos que contienen alcohol, padecen sus consecuencias durante muchas horas. Esto permitió a nuestros ancestros consumir frutas muy maduras y parcialmente fermentadas. Es conocido que los chimpancés buscan con devoción estas frutas que han fermentado y contienen algo de alcohol. Y no solo lo hacen por lo contentos y sociables que se ponen, sino porque la fermentación y las levaduras responsables añaden un complemento nutricional a la fruta: mayor valor calórico y mayor cantidad de vitaminas del complejo B. De esta forma, esta mutación proporcionaba un mejor cumplimiento de las Fuerzas de la Vida y por tanto persistió hasta nosotros.

Esta característica de nuestro diseño metabólico nos permite poder disfrutar hoy de un consumo moderado y ocasional de bebidas alcohólicas, sobre todo las fermentadas de manera natural, como el vino, la cerveza o la sidra, y obtener beneficios saludables de ello. Pero no debemos olvidar que el abuso continuado del alcohol causa enfermedades y degrada las células cerebrales.

#### EL ARTE DE CONVERTIR EL AZÚCAR EN GRASA

Esta es una característica de todos los herbívoros que les permite acumular grasa a partir de alimentos que no la contienen. Vean el ejemplo de las ocas o cerdos sobrealimentados. Una oca atiborrada de patatas cocidas transforma todo el azúcar de las féculas (almidón) en grasa que, en parte, se acumula en su hígado, produciendo una alteración común en casi todas las personas obesas: el hígado graso, o dicho en francés, *foie gras*; es decir, hemos provocado a las ocas una deliciosa patología para untar en el pan.

La principal fuente de alimentación de nuestros ancestros en las sabanas arbustivas eran las frutas, los tallos, las raíces y las hojas, aunque, de vez en cuando, lograban atrapar alguna sorpresa en forma de animalillo. Pero la mayor parte de su alimentación carecía de grasa, que no abunda en las plantas, salvo excepciones. Tuvieron que potenciar un método que les permitiera rellenar sus depósitos de reserva de grasa cuando abundaba el alimento en los bosques y así poder sobrevivir durante los días de escasez. Este mecanismo



consistió en dotar al hígado de grandes capacidades enzimáticas para transformar la fructosa, el principal azúcar de las frutas silvestres, en energía en forma de grasas, que se podían acumular en cantidad ilimitada en sus depósitos grasos, en el hígado y el tejido adiposo.

Desde el punto de vista de la evolución, esta habilidad metabólica nos ofreció ventajas adaptativas hace millones de años, pero nos ocasiona consecuencias funestas en la actualidad. Los seres humanos que habitamos sociedades opulentas abusamos a diario de alimentos y bebidas con un elevado contenido en azúcar y fructosa. Según nuestro diseño metabólico, estos azúcares se transforman en grasa que se va depositando por todas partes, ocasionándonos obesidad y el resto de las enfermedades de la opulencia. Hoy día está bien demostrado que la principal causa del sobrepeso, de la obesidad y de las enfermedades asociadas es el exceso de ingestión de azúcar.

## LA SOCIALIZACIÓN Y SUS VENTAJAS

Las circunstancias climáticas y las necesidades de adaptación a entornos cada vez más difíciles convirtieron a los primates en mamíferos con un elevado nivel de socialización. La conducta social está profundamente engranada en la evolución de los primates. Podríamos decir que estos son mamíferos especialistas en socialización, como los murciélagos son expertos voladores o los delfines, hábiles nadadores.

Las bases fisiológicas que permitieron estas adaptaciones fueron los cambios en la estructura y organización del cerebro de los primates. En especial, el desarrollo de la neocorteza, compuesta de numerosas áreas neuronales, cada cual con sus funciones características, y el desarrollo del área de la corteza llamada premotora ventral, que se encarga de controlar los músculos. Una cuestión muy interesante, clave del aprendizaje, fue el desarrollo de las denominadas neuronas espejo. Estas responden cuando un mono ve a otro que está manipulando objetos, pero también cuando el animal observa que el experimentador realiza esa misma tarea. Estas células especulares permiten el aprendizaje observacional de tareas guiadas visualmente. Y también facultan el ser capaz de ponerse en el lugar del otro: la empatía.

Estos desarrollos cerebrales tuvieron una gran repercusión en el control de los músculos de la cara responsables de la expresión facial (las muecas), que tanta importancia tienen en los primates (nosotros incluidos) para comunicar las emociones. Los músculos faciales tienen una gran representación en la corteza motora, es decir, hay muchas neuronas encargadas de controlarlos, lo que permite la expresión de una gran variedad de emociones en un contexto social: miedo, amenaza, sumisión, juego, risa, etc. La amígdala, una parte del cerebro relacionada con el control de las emociones y de la conducta social, está interconectada con el sistema visual y con la corteza. Esta permite a los primates la percepción y la valoración emocional de las expresiones faciales, algo básico en la socialización.

Pero ser gregario acarrea un coste elevado. Impone una mayor competencia por los recursos alimentarios, sobre todo si son escasos, ocasiona una mayor exposición a enfermedades infecciosas y parasitarias y produce una mayor visibilidad y, por tanto, mayor exposición a los peligros. La intensa sociabilidad que caracteriza a los primates antropoides se desarrolló porque les ofrecía algunas ventajas sobre los costes. Una de ellas era la defensa frente a los predadores. Permitía una mejor vigilancia: mayor número de pares de ojos, de oídos y de fosas nasales que les permitían detectar el peligro. Mejor transmisión de las señales de alerta por una amplia gama de sonidos y gestos, incluso algunos específicos para cada tipo de amenaza (ave, serpiente o felino). Mayor cantidad de armas defensivas: colmillos, tamaño y fuerza de los machos.

La socialización no fosiliza, lo que impide estudiar sus cambios a través de la evolución de una manera convencional. Pero la conducta social de los primates muestra una gran inercia filogenética, experimenta pocos cambios en las diferentes especies, lo que permite el uso de técnicas complejas para deducir los cambios en la conducta social a través del tiempo y permitir construir modelos de evolución social en primates. Estos métodos tienen una cierta semejanza con los que utiliza la policía al estudiar los impactos de bala en las paredes de una habitación: sigue las trayectorias de los proyectiles hacia atrás a partir de los agujeros en la pared y de ahí deduce la línea común desde donde partieron los disparos.

Este tipo de estudios aplicado a examinar el árbol familiar de 217 especies de primates actuales pone de manifiesto que el primer escalón en la evolución de la conducta social ocurrió muy pronto, cuando estos pasaron de ser animales activos durante la noche a ser animales de actividad diurna. Pero de día eran más visibles y más vulnerables al ataque de los predadores. La respuesta fue incrementar la capacidad defensiva aumentando el número de individuos. Es decir, el agrupamiento social en los primates comenzó como un medio eficaz para adaptarse a nuevas amenazas. Luego llegaron otras ventajas adicionales de la socialización, como las reproductoras y las nutricionales.

Desde que se formuló por primera vez la teoría de la evolución ha sido un misterio explicar cuáles fueron las presiones ambientales y cuáles los mecanismos de selección natural que favorecieron el que se desarrollara nuestro cerebro. Las cosas se aclararon a raíz de la formulación por Whiten y Byrne, en 1988, de la llamada «hipótesis de la inteligencia maquiavélica», donde se sentaron las bases para considerar que la vida social de los primates fue el principal impulso para la evolución del cerebro.

Esta hipótesis establece que a lo largo de la evolución el enorme impulso socializador de los primates consiguió desarrollar diversas estrategias sociales. Se recurría al uso de trucos y formas de comportamiento según lo demandaba la ocasión, como la reconciliación, la alianza, el chantaje o el sabotaje, así como al desarrollo de un amplio repertorio de gestos y vocalizaciones que les permitía identificar las relaciones de parentesco o de dominancia. Esta intensa vida social favorecía la supervivencia y la reproducción y por ello, desde hace millones de años, fomentó en los primates el desarrollo de determinadas áreas cerebrales de la neocorteza que permitían estas proezas socializadoras.

Ya hablaremos con más detalle de la evolución del cerebro de la especie humana, pero ahora valga recordar que el conocimiento acumulado en los últimos años sobre etología, sociología, neuroanatomía y neurofisiología del orden de los primates permite afirmar que las bases de lo que millones de años después fue el cerebro humano se fueron estableciendo principalmente para permitir una vida social compleja. Y así continuó esa inercia evolutiva hasta llegar a los seres humanos, cuya característica esencial es que somos los primates que han desarrollado un mayor grado de flexibilidad social, que nos

permite vivir en un amplio rango de relaciones sociales complejas y diversas. A lo largo de la historia, los seres humanos se las han arreglado para socializar, interrelacionarse y vivir juntos, tanto en grupos pequeños como en grandes sociedades, y variando los modelos según las diferentes circunstancias ecológicas, culturales o religiosas. Todo ello requirió un cerebro especialmente complejo y diseñado para este fin.

## Los homínidos\*

Hace quince millones de años unos simios que habitaban las densas selvas de África tuvieron que enfrentarse al cambio climático, al enfriamiento y a la sequía. Pero la evolución dotó a nuestros ancestros de las características morfológicas y metabólicas que les permitieron adaptarse a esa nueva situación climática. Algunos simios evolucionaron hasta dar lugar a los homínidos, nuestros ancestros más directos.

El Mioceno comenzó hace unos veintitrés millones de años y finalizó hace unos cinco millones. Durante este período, continuó el movimiento de los continentes hasta casi ocupar las posiciones actuales, aunque América permanecía separada en dos. Los movimientos de las placas tectónicas continuaron produciendo las elevaciones de los Pirineos, los Alpes, las cadenas montañosas del continente americano y el Himalaya. También se estableció la conexión terrestre entre África y Asia, lo que permitió el intercambio de primates y otros animales entre los dos continentes.

Según señalan los paleoclimatólogos, el clima del Mioceno era más fresco que el de la época precedente. En el hemisferio sur se habían establecido las corrientes oceánicas, que aislaban a la Antártida de las corrientes más cálidas del resto del mundo. Esto favoreció la aparición de un gran casquete de hielo antártico. Se redujo la cantidad de agua circulante en la atmósfera, bajó el nivel de los océanos y se produjo una mayor aridez en todo el planeta. Comenzaba a manifestarse ese binomio (frío y sequía) tan importante para nuestra evolución. A partir de aquí toda la historia climática

de la Tierra se caracterizaría, en general, porque los períodos fríos se acompañaron de sequía y desertificación, y los cálidos, de lluvias abundantes y proliferación vegetal.

Grandes áreas del hemisferio norte, antes cubiertas por espesos árboles, se convirtieron en praderas. Los bosques subtropicales se fueron clareando y en muchas regiones de África las masas boscosas se sustituyeron por sabanas arbustivas. Al Mioceno se lo denomina también «la edad de las hierbas»: el enfriamiento y la reducción de las lluvias propiciaron la gran abundancia de las plantas herbáceas.

El enfriamiento del hemisferio norte hizo que los primates se concentraran en las zonas más cálidas y de bosques densos en torno al ecuador, en África, América y Asia. Es en este entorno selvático, fundamentalmente africano, donde los monos evolucionaron hacia los simios. Este es el grupo de primates caracterizados por la ausencia de cola, cráneo más grande en proporción al tamaño corporal y brazos más largos que las patas, lo que les permite andar sobre las cuatro extremidades, apoyados sobre las plantas de los pies y las falanges de las manos.

Hacia la mitad del Mioceno, hace unos quince millones de años, se acrecentó la tendencia al enfriamiento global. En el entorno de África oriental, el descenso de la temperatura y la sequía resultante condujeron a una lenta y progresiva desaparición de las selvas. Conseguir alimento cada vez era más difícil. La suma de numerosas adaptaciones para superar esta dificultad ocasionó que de los simios se separara una gruesa rama que daría lugar a los primeros homínidos, es decir, nuestros antepasados.

Los análisis genéticos realizados en el ser humano y en el chimpancé indican que nos diferenciamos en menos del uno por ciento de nuestro material genético, es decir, que compartimos más del 99 por ciento de la información necesaria para construir y hacer funcionar nuestros organismos. En términos generales, se calcula que solo nos separa una diferencia de unos quinientos genes. Los genetistas saben que acumular mutaciones lleva su tiempo, así que han calculado que para poder llegar a esa diferencia de información las dos especies se tuvieron que separar hace unos siete millones de años. Se han descubierto algunos fósiles de esos primeros homínidos, representantes de los primeros escalones del árbol evolutivo de los seres humanos.

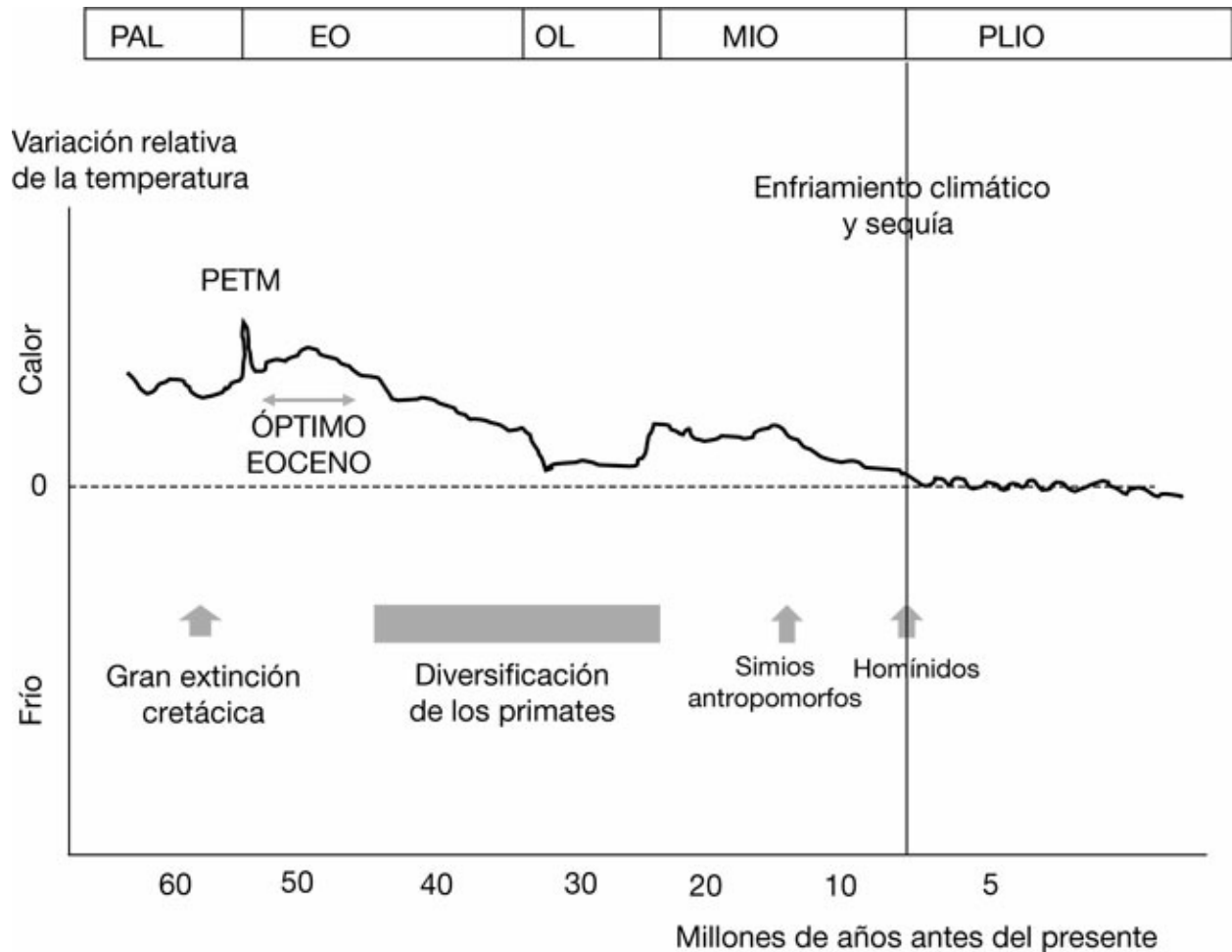


Figura 10.1. Tras el óptimo climático del Eoceno, el planeta comenzó a enfriarse. Durante el Eoceno y el Oligoceno las aún abundantes selvas favorecieron la diversificación y evolución de los primates. En el Mioceno, cuando las selvas comenzaron a reducirse, aparecieron los simios antropomorfos y hace unos siete millones, cuando el planeta llegó a temperaturas globales similares a las del presente, aparecieron los primeros homínidos: nuestros ancestros.

### *SAHELANTHROPUS TCHADENSIS*

El homínido más antiguo descubierto hasta ahora está datado en siete millones de años; es el *Sahelanthropus tchadensis*, del que solo existen nueve fósiles; todos fragmentos del cráneo y de la mandíbula. Pero estos trozos resultan suficientes para que los expertos hayan señalado en este homínido algunas de las características que separan a la especie humana del resto de los simios. Por ejemplo, los caninos (colmillos) son pequeños y la apertura del foramen magnum, ese agujero por donde sale la médula espinal del cráneo, está mucho

más centrada que en los simios, lo que sugiere una posición de la cabeza más erecta sobre el cuerpo. Poco más sabemos de este antepasado, pero ya es bastante para sugerir unos primeros pasos evolutivos hacia la humanidad.

#### *ORRORIN TUGENENSIS*

El segundo representante es el *Orrorin tugenensis*, descubierto en Kenia en 2001 y datado en seis millones de años de antigüedad. Se dispone de trece fósiles de cinco individuos diferentes, entre ellos, la parte superior del fémur completa. Este es el hueso que va desde la rodilla a la pelvis. La articulación coxofemoral (cadera) es esencial para la deambulación bípeda. Su estructura muestra que este antecesor nuestro caminaba sobre dos patas, al menos en trayectos cortos entre un árbol y el siguiente, a los que trepaba con soltura como sugieren las curvaturas de los huesos de los dedos. Sus dientes eran pequeños y con un esmalte delgado semejante al de los humanos modernos, pero el canino y el premolar eran como los de los simios. Del estudio de su dentadura se deduce que debían de tener una alimentación blanda basada en frutas, tallos tiernos y hojas, sin despreciar algún roedor, insecto o reptil que logran atrapar.

#### *ARDIPITHECUS RAMIDUS*

Del homínido primitivo que más datos se poseen es del *Ardipithecus ramidus*, descubierto en Etiopía y datado en más de cuatro millones de años de antigüedad. Se dispone en la actualidad de numerosos fósiles pertenecientes a cien especímenes diferentes. Vamos a utilizar lo que han deducido los expertos acerca de este homínido, añadiendo algunas licencias literarias, para recrear la ambientación necesaria y así poder comprender cómo era el día a día en la vida de este ancestro.

Sabemos que habitaba los bosques que ocupaban durante el Plioceno todo lo que hoy es Kenia y Etiopía, ya que los fósiles de *A. ramidus* han aparecido siempre junto a huesos de otros mamíferos cuya vida estaba ligada a



estas masas forestales. Se puede suponer, por lo tanto, que habitaba un bosque que aún era espeso, con algunos claros, y abundante en frutas y vegetales blandos.

El esmalte de sus dientes es más fino que el de un chimpancé, pero menos que el de un ser humano. Este detalle, junto con la ausencia de marcas en los dientes, sugiere una dieta mixta; comían alimentos blandos pero no cosas duras y abrasivas (como raíces, tubérculos o frutos secos), ya que no presentan especialización en las muelas para esa tarea, ni un gran desgaste en las piezas dentales fósiles.

La curvatura de los huesos del pie sugiere que trepaban bien a los árboles. Pero su pelvis, que se ha logrado reconstruir a partir de fragmentos fósiles, es más corta que la de los simios, más parecida a la de los seres humanos, y sugiere una cierta capacidad para caminar sobre las dos patas, al menos en trayectos cortos. Se ha calculado un tamaño de unos ciento veinte centímetros de altura y unos cincuenta kilos de peso. No se han detectado que hubiera diferencias de talla entre machos y hembras.

La existencia de nuestro ancestro, habitante de aquellos bosques tropicales, no estaba exenta de riesgos. Su vida estaba constantemente amenazada por peligrosos depredadores que acechaban desde el cielo, desde el suelo o desde las propias ramas de los árboles en los que el *Ardipithecus ramidus* pasaría casi la totalidad de su existencia. Aves rapaces gigantescas podían caer sobre ellos mientras degustaban deliciosos frutos en las copas, temibles serpientes podían atenzarlos sobre la gruesa rama en la que descansaban y felinos poderosos podían atraparlos cada vez que se aventuraban a buscar gusanos entre el humus del suelo del bosque. El *Ardipithecus ramidus* debía precaverse de todos esos enemigos y ser capaz de escapar si se veía amenazado.

La braquiación, es decir el desplazarse colgado y balanceándose de rama en rama, era una manera eficaz de escapar de la mayor parte de los predadores. En este sentido, fueron muy importantes las adaptaciones anatómicas de nuestros ancestros que muestran los numerosos fósiles hallados y que hoy vemos en nuestros parientes más cercanos, los simios antropomorfos. Los primates hominoideos actuales, los que más se parecen a cómo deberían ser nuestros ancestros, poseen un tórax aplanado de pecho a

espalda. Este pecho plano es muy diferente al del resto de los primates y mamíferos terrestres. Nosotros y nuestros parientes más cercanos tenemos los omóplatos en la espalda y no a los lados, como el resto de los mamíferos. Esto nos permite una mayor movilidad de los brazos y favorece la braquiación. Los brazos de nuestros ancestros, como los de los simios antropomorfos actuales, eran más largos que las piernas y muy fuertes; las manos tenían los dedos alargados y las falanges curvadas para poder formar un gancho con el que colgarse de las ramas. La columna vertebral tenía menos vértebras lumbares, lo que limita las posibilidades de arqueamiento de la columna. Esto favorece la postura erguida o vertical del tronco al trepar, al desplazarse colgando de las ramas o al sentarse.

En el suelo nuestros ancestros se movían sobre las cuatro extremidades. Se apoyaban como los simios actuales, en los nudillos de las manos y en las plantas de los pies, manteniendo la cabeza por encima del tronco. Esta forma de locomoción terrestre les permitía realizar carreras cortas y rápidas e incluso blandir una rama en una de sus manos a modo de arma.

#### UN DÍA EN LA SELVA HACE SEIS MILLONES DE AÑOS

¿Cómo se nutrían los primeros homínidos? ¿De dónde obtenían la energía y las moléculas necesarias para crear y mantener su orden y complejidad?

Los únicos restos fósiles relacionados con la nutrición de estos ancestros son los dientes. Según los expertos, las dentaduras nos sugieren que su alimentación era muy similar a la de cualquier chimpancé que habita hoy las selvas del Congo. Por otra parte, como veremos más adelante, disponemos de algunas pruebas fósiles de homínidos más recientes (australopitecinos) que sugieren que poseían un aparato digestivo muy similar al de los grandes simios que viven en la actualidad. Por lo tanto, todos los datos indican que la alimentación del *A. ramidus* era fundamentalmente a base de hojas, tallos, raíces y frutas, aunque, como ocurre hoy con los chimpancés, también recurriría a comer insectos, reptiles y roedores y algún mono u otro animal de pequeño tamaño que lograban atrapar.

*A. ramidus* debía de poseer un colon o intestino grueso de gran capacidad, en el que se finalizaba la digestión, sobre todo de la fibra contenida en los vegetales (una adecuada cámara de fermentación), y que debía de representar más del 45 por ciento del tamaño total del aparato digestivo. En ese largo intestino grueso nuestros ancestros albergaban millones de bacterias, pequeños y abundantes huéspedes capaces de digerir la fibra que les llegaba.

## LA REPRODUCCIÓN EN LOS PRIMEROS HOMÍNIDOS

Los órganos que intervienen en la reproducción no fosilizan, pero al analizar los fósiles disponibles podemos deducir, con un elevado grado de certeza, cómo se reproducían los homínidos primitivos. Sus restos petrificados señalan que existía poca diferencia de tamaño entre machos y hembras. A causa de su proximidad genética al chimpancé, del que estos homínidos se acababan de separar evolutivamente, debía de existir una gran similitud reproductora entre ambas especies. Debo advertir que, según los especialistas, estas comparaciones entre chimpancés y los homínidos ancestrales tienen las mismas limitaciones que las que establecemos entre los seres humanos paleolíticos y las tribus actuales de cazadores recolectores. Nos proporcionan, junto con otros muchos datos, algunas ideas acerca de cómo era la forma de vida de nuestros ancestros. Pero solo son aproximaciones. Claro que es lo único que tenemos.

¿Cuál era el modelo de vinculación entre nuestros primates antecesores? Los modelos de agrupamiento de los primates se pueden deducir simplemente por la diferencia de tamaño entre el macho y la hembra. Es lo que se denomina dimorfismo sexual. En los agrupamientos poligínicos (un macho y muchas hembras), como ocurre con los gorilas, el tamaño del macho es mucho mayor que el de la hembra y ellos poseen poderosos músculos y colmillos. Esto se debe a que deben realizar peleas continuas contra el resto de los miembros de su mismo sexo para defender su harén. La evolución ha ido seleccionando los machos más fuertes, mientras que las hembras han mantenido un tamaño discreto, el necesario para sus funciones reproductoras.

En los simios que practican la poliginandria (vinculación sexual y parental entre varios machos y varias hembras) los tamaños de machos y de hembras son muy parecidos. Es el caso de los chimpancés, que viven en comunidades de machos y de hembras genéticamente emparentados compuestas por veinticinco a cien individuos. En sus relaciones, los chimpancés muestran un elevado grado de socialización, de cooperación, de jerarquía, de comunicación y de acercamiento. Practican un acicalamiento mutuo y continuo, el despioje, que además de la función higiénica ejerce una misión apaciguadora, y mantienen diversas formas de comunicación mediante gestos, risas y gruñidos. Aunque los machos adultos expresan conductas agresivas hacia otros machos, en general se toleran y son colaboradores unos con otros. Esto se debe en parte a que en su organización, aunque existen jerarquías, no se les impide el libre acceso a las hembras.

Los chimpancés practican relaciones muy promiscuas. Una hembra puede ser montada por varios machos de manera consecutiva, todos emparentados y con material genético parecido. La teoría del camuflaje explica el valor adaptativo de la promiscuidad. Una hembra al aparearse con todos los machos del grupo crea confusión respecto a la paternidad, lo que acarrea dos ventajas: por una parte protege a su cría del infanticidio, mientras que por otra alienta la actitud protectora y los cuidados parentales hacia su cría por parte de todos los machos del grupo.

Ante el reclamo receptivo de las hembras, lo que sucede sobre todo en la fase ovulatoria del ciclo menstrual, cuando se produce la máxima hinchazón de los genitales externos, los machos comienzan a pelearse con más frecuencia y con más intensidad. Aunque se da una jerarquía entre el sexo masculino, las hembras pueden rechazar a los machos más desfavorecidos, rehusando copular con ellos. Ellas siempre prefieren aparearse con los miembros de alto rango, capaces de proteger a sus crías de los otros machos; pero también aceptan machos específicos con los cuales se ha formado una relación especial a través de un cortejo, mediante una situación amigable de despioje y de cuidados mutuos. Las hembras también se ofrecen a nuevos machos llegados de fuera del grupo, para así proteger a sus crías contra el infanticidio. La variabilidad genética tan necesaria para la especie se obtiene mediante dos mecanismos fundamentales. Por una parte, la exogamia a cargo de algunas

hembras jóvenes que abandonan su grupo para irse a integrar en otro y procrear allí. Por otra, los machos de una comunidad grande, si durante sus correrías selváticas se topan con otro clan menor, matan a los machos y a las crías e incorporan las nuevas hembras a su grupo.

El cuidado de los bebés corre a cargo de las hembras, que los transportan, los lactan y les procuran alimentos. Los machos colaboran algo con la alimentación y también cumplen una misión de defensa del territorio mediante patrullas bien organizadas.

Un caso especial es el de los bonobos, los chimpancés pigmeos que habitan al sur del río Congo. Se parecen mucho a los chimpancés comunes, pero han evolucionado de manera diferente a estos desde que los separó hace dos millones de años la barrera infranqueable del gran río africano. Su organización social y sexual está centrada en las hembras, que son capaces de dominar e intimidar a los machos. Estos últimos son poco agresivos entre sí: se puede decir que el macho del bonobo es de carácter amable y cordial. Las hembras forman alianzas y se socorren mutuamente. La mayoría de las veces, una hembra adulta ayudada por sus amigas puede superar a cualquier macho adulto. Los bonobos son los simios más lujuriosos del planeta. El sexo sustituye a la agresividad. Es como si los machos tuvieran que ahorrar energía para atender a sus promiscuas y ardientes compañeras.

## Los simios sin bosques

Hace cinco millones de años el enfriamiento y la sequía ocasionaron la desaparición de las selvas en las regiones del este de África donde habitaban nuestros ancestros. Tres adaptaciones fundamentales les permitieron superar esta dura prueba y avanzar en su evolución: la bipedestación, la pérdida de los colmillos y la adquisición de una gran capacidad de ahorro metabólico, que se conoce como genotipo ahorrador.

Hace cinco millones de años el planeta continuó su lento y progresivo enfriamiento, lo que condujo a la disminución de las masas forestales en el este de África. Las causas son diversas. Por una parte, los cambios astronómicos que condujeron a la disminución de la temperatura global; por otra, los movimientos de la corteza terrestre, que provocaron la elevación de las montañas que constituyen esa gran fractura africana que es el valle del Rift y que bloquea los vientos húmedos del océano Atlántico. Como consecuencia, las grandes selvas se fueron reduciendo aún más en esa zona, las masas boscosas se fragmentaron y se aislaron, interrumpidas por extensiones abiertas de pastos. Así, la selva fue sustituida poco a poco, milenio a milenio, por la sabana.

Todos los datos señalan que hace tres millones y medio de años habitaban las zonas boscosas y las sabanas del este y del sur de África unos simios que tenían el aspecto y el cerebro de un chimpancé de hoy y caminaban sobre dos pies con bastante soltura, aunque sus brazos largos y la curvatura de las falanges de manos y pies sugieren que no despreciaban la vida arbórea. Eran los *Australopithecus*.

## LOS AUSTRALOPITECOS

*Australopithecus africanus* (mono del sur de África) es una especie de homínido cuyos fósiles se han encontrado en diversos yacimientos sudafricanos. Su hallazgo lo realizó en 1924, de manera casual, el científico Raymond Dart entre un montón de cráneos fósiles almacenados en los sótanos de un museo. Este fósil, denominado en la actualidad el niño de Taung, consiste en parte del cráneo, la cara y la mandíbula de un individuo joven, de tres a cuatro años de edad, con la primera dentición.

Los *A. africanus* debieron de habitar la zona sur de África hace entre dos y cuatro millones de años. Poseían la capacidad para una marcha bípeda, aunque aún conservaban costumbres arborícolas. Su peso promedio era de 41 kilos para los machos y de treinta kilos para las hembras, y su estatura era inferior al metro y medio. La capacidad craneal estaba entre 480 y 520 cm<sup>3</sup>, similar a la de los chimpancés actuales y muy inferior a los 1.300 cm<sup>3</sup> del ser humano actual. En comparación con el resto de los simios, su caja craneal era más alta y redondeada, su cara más corta y su mandíbula estaba menos adelantada con respecto al maxilar (prognatismo). Sus piezas dentales no se diferencian mucho de las del ser humano: los caninos son pequeños, sin sobresalir como los colmillos de los simios, y los incisivos tienen el tamaño de los nuestros.

El primer espécimen de *Australopithecus afarensis* fue descubierto el 24 de noviembre de 1974 por Donald Johanson, Yves Coppens y Tim White en el yacimiento de Hadar, valle del río Awash, Etiopía, en el lugar donde habita la tribu afar, de ahí el nombre. El espécimen, encontrado cuando en el mundo triunfaba la música de los Beatles, recibió el nombre de Lucy por una de las canciones del grupo (*Lucy in the sky with diamonds*). Junto a Lucy se encontraron los restos (incluidos algunos cráneos) de otros doce individuos de la misma especie; era la primera familia completa de nuestros primeros ancestros. En los años sucesivos se han desenterrado numerosos fósiles de *A. afarensis* en la misma zona del este de África.

Estos homínidos tenían una capacidad craneal similar a la de los *A. africanus* (375 a 550 cm<sup>3</sup>). A diferencia de los simios antropomorfos, los caninos de *A. afarensis* son pequeños, aunque se proyectan ligeramente por

delante del diente adyacente. Los incisivos son grandes; los molares y premolares también lo son y tienen superficies planas. El paladar es muy similar al del ser humano. Las costillas adoptan una forma acampanada, mucho más ancha a nivel abdominal, lo que es una característica de los animales herbívoros. La forma de la pelvis sugiere un caminar bípedo. Pero las falanges de los dedos son curvadas, tanto las de las manos como las de los pies (de manera más marcada en estos últimos). Esta característica sugiere que tenían gran capacidad para subir y colgarse de las ramas de los árboles. El dimorfismo sexual resultaba muy marcado, siendo los machos mucho más corpulentos que las hembras, con un promedio de masa corporal calculada de 45 kilos para ellos y 29 kilos para ellas.

## LA BIPEDESTACIÓN

Uno de los hitos más importantes en la evolución de la especie humana fue la bipedestación. Caminar sobre dos patas no es tarea fácil, es casi un ejercicio circense, complicado y difícil de aprender. Un cabritillo trota nada más nacer y un chimpancé corretea y trepa a los árboles a las pocas semanas de vida. Pero nuestros niños apenas son capaces de dar algunos pasos sin caer al suelo hasta que tienen más de un año de edad.

El bipedalismo habitual es raro en primates y en mamíferos. Todos los primates, con muy pocas excepciones, pueden sentarse erectos, mantenerse sobre dos patas para alcanzar algún fruto y hasta dar algunos pasos bamboleantes. El bipedalismo humano sería la culminación de una larga tendencia evolutiva, un proceso que no debe considerarse como la transformación en un solo paso desde un cuadrúpedo estricto como un caballo a un bípedo perfecto, sino como la suma de pequeñas modificaciones que se fueron acumulando a lo largo de más de sesenta millones de años. Tres son los cambios más importantes que tuvieron que ocurrir:

1. Los cambios óseos y musculares que permitieran la complicada biomecánica de la locomoción bípeda. Se modificó la columna vertebral y su punto de conexión con la base del cráneo, lo que permite tener la cabeza erecta sobre la columna vertebral. Cambió la estructura de la pelvis y de la



articulación coxofemoral (cadera), la capacidad de extender completamente la pierna sobre la articulación de la rodilla, y se modificó la estructura del pie, entre otras numerosas adaptaciones óseas.

2. Los cambios en la disposición y estructura de numerosas vísceras, como es el caso de los órganos reproductores en la hembra: el útero, los ovarios y el canal vaginal.

3. Los cambios nutricionales y metabólicos, como la mutación que suprimió en la mayoría de los primates la capacidad de metabolizar el ácido úrico, hecho que permitió una eficaz regulación del flujo sanguíneo al cerebro durante la postura erecta y la braquiación, cuando la cabeza en muchos simios se encuentra a casi medio metro por encima del corazón.

Se han propuesto numerosas hipótesis para justificar el impulso final de presión ambiental que permitió la selección de simios bípedos como lo fueron los *Australopithecus*. Pero la más aceptada es la que coincide con los planteamientos que proponemos en este libro: las Fuerzas de la Vida. En especial, la necesidad de garantizar la energía alimenticia en ese mundo cada vez más frío y seco del final del Mioceno.

La locomoción bípeda es más barata en términos energéticos que el andar del cuadrúpedo. Los chimpancés que caminan sobre los nudillos gastan alrededor de un 35 por ciento más de energía durante la locomoción que un cuadrúpedo ordinario del mismo tamaño, por ejemplo un perro grande. Los simios, antecesores de los actuales gorilas y chimpancés, que siguen habitando las selvas del África occidental deben desplazarse, como mucho, un par de kilómetros al día para conseguir alimento. Para ellos las ventajas energéticas de una locomoción más eficiente son muy pequeñas y no han cambiado de sistema de desplazamiento a lo largo de millones de años. Pero los simios que se vieron obligados a habitar selvas cada vez más fragmentadas tuvieron que encontrar otra solución para sobrevivir. Unos recurrieron a parecerse a los cánidos y adoptar el estilo de vida de una jauría de perros, tal es el caso de los papiones que forman hordas numerosas, caminan a cuatro patas y hasta han desarrollado un hocico y colmillos parecidos a los de los perros (monos cinocéfalos). Pero en el caso de los homínidos, habitantes de sabanas arbustivas del este y del sur de África, que tenían que recorrer largas

distancias por el suelo para encontrar alimento, la evolución optó por dotarlos de una deambulación más eficiente para adaptarse al nuevo medio en el que les tocó evolucionar.

Un elemento esencial de la teoría de la evolución es que ninguna adaptación es absoluta, es decir completamente adecuada para todas las situaciones. Los cambios pueden ser adaptativos, o no, según el contexto en el que sucedan. El bipedalismo humano es mucho más eficiente energéticamente que el cuadrupedalismo de un simio para desplazarse a las velocidades características del caminar. Pero las adaptaciones bípedas son menos eficientes para trepar a los árboles y balancearse colgados de sus ramas. El bipedalismo solo fue eficaz cuando el avance de la deforestación obligó a que nuestros ancestros pasasen más de un setenta por ciento de su tiempo en el suelo. Se ha dicho que el bipedalismo fue la adaptación evolutiva que permitió a unos simios (nuestros ancestros) sobrevivir donde ningún simio podría hacerlo.

En resumen, los cambios ecológicos y climáticos progresivos, como los que ocurrieron en África, junto con la acumulación de unas afortunadas mutaciones, permitieron que unos simios se transformaran a lo largo de cientos de miles de años en los homínidos *Australopithecus afarensis*. Un nuevo peldaño en la escalera de la evolución del hombre se había superado: la bipedestación.

#### EL HAMBRE CONSTANTE

El *Australopithecus afarensis* vivía en un paisaje muy diferente a sus predecesores que lo obligaba a adaptarse: ahora, en vez de estirar el brazo perezosamente para agarrar el fruto maduro de la rama más cercana, tenía que bajar al suelo para rascar y escarbar fatigosamente la tierra hasta encontrar raíces y estaba obligado a desplazarse por la sabana ardiente y peligrosa hasta llegar a un nuevo grupo de árboles, una vez agotadas las reservas de frutas y de brotes jugosos del bosquecillo de ribera en el que hubiera pasado los últimos días.

La bipedestación permitió dos mejoras significativas: la posibilidad de acarrear alimentos con las manos y los brazos y una más eficiente movilidad. La primera supuso una gran ayuda para la supervivencia. En los simios, cada individuo come para sí mismo y tiene que hacerlo en el mismo sitio en donde se encuentra el alimento. No disponen, como algunos monos, de bolsas en las mejillas (abazones) para llevar la comida hasta un lugar seguro donde comer con tranquilidad. Pero al tener las manos libres, nuestros ancestros podían transportar alimentos con facilidad y comérselos en un lugar seguro o incluso compartirlos con otros compañeros o con su hembra y sus crías. Se potenciaron de esta manera los lazos de colaboración y las tendencias socializantes.

Las plantas de elevada calidad nutritiva, en especial las frutas y los brotes tiernos, se hicieron más dispersas, así que Lucy y sus compañeros tenían que moverse mucho para encontrar alimento, lo que implicaba un aumento del gasto energético. Ya no se trataba simplemente de pasar de un árbol al contiguo. Cada vez se requerían desplazamientos más largos caminando por el suelo, con el temor de caer en las garras de algún depredador. Y la recompensa a este esfuerzo eran con frecuencia unas raíces o unos tallos leñosos con poco valor nutritivo. Así que, para los *Australopithecus*, el coste asociado para conseguir una dieta equilibrada debía de ser cuantioso.

Las evidencias paleodentales son concluyentes. Las características de las muelas del *Australopithecus afarensis* indican que su alimentación estaba compuesta en gran parte por vegetales. Además de algunos frutos tiernos, también incluiría alimentos más duros, tales como hojas, frutos secos, tallos fibrosos y raíces. El disponer de las manos libres les permitiría utilizar palos para desenterrar estos vegetales. Las partículas minerales que se meterían en la boca junto con esos alimentos que crecen bajo tierra (se supone que no lavaban la comida) harían rechinar los dientes y contribuirían a dañar las piezas. Este trabajo de masticación implicaba un gran desgaste para las coronas dentales, lo que ha quedado reflejado en las muelas fósiles.

En todos los cráneos de *Australopithecus* se observa la desaparición de los grandes y amenazadores colmillos que caracterizan a los primates, en especial a los machos. Cuando el simio cierra la boca, estos caninos se alojan

en una especie de funda, unos espacios vacíos en las encías que se denominan diastemas dentarios. Por esta razón, las mandíbulas que poseen colmillos que sobresalen sobre los dientes adyacentes tienen muy limitados los movimientos laterales de molienda y la posibilidad de triturar los alimentos. Los carnívoros, que tienen colmillos, cortan la carne en trozos con sus muelas carniceras y los tragan sin más. Los herbívoros, que necesitan moler bien los vegetales, no tienen caninos y en cambio poseen unas muelas anchas y grandes, como piedras de molino. Así, en estos simios, las mutaciones genéticas que venían acumulando a lo largo de miles de años habían provocado la reducción del tamaño de los colmillos. Cuando se daban épocas de sequía, ellos poseían una ventaja definitiva para la supervivencia en un medio hostil: tenían una masticación más eficaz para procesar el nuevo tipo de alimentos, más secos y duros, mediante una mayor movilidad lateral de sus mandíbulas.

Para poder procesar tanta cantidad de vegetales fibrosos y poco nutritivos se requería un gran intestino grueso. Lucy desde luego era herbívora y, como se aprecia en su esqueleto fósil, poseía una parrilla costal acampanada, sin cintura y con el reborde costal inferior de gran diámetro. Esta morfología es característica de los herbívoros y sugiere que Lucy albergaba un aparato digestivo voluminoso, con una cámara de fermentación eficaz para digerir tanta fibra vegetal.

Otra de las estrategias evolutivas que pudo permitir a los *Australopithecus* adaptarse a las nuevas condiciones ambientales fue la de aumentar la densidad calórica de su dieta mediante la modificación del tipo de alimentos. Se supone que los *Australopithecus* también comían huevos, reptiles, termitas e insectos diversos. Nosotros hemos heredado esta capacidad insectívora de nuestros antepasados, como lo testifica la gran actividad de la trehalasa que poseemos en nuestro intestino. La función exclusiva de esta enzima es digerir el carbohidrato trehalosa, que abunda en los caparazones de los insectos y crustáceos.

LA CAPACIDAD DE AHORRAR ENERGÍA

Los *Australopithecus* se enfrentaron a una situación novedosa en toda la evolución precedente y que ya nunca abandonaría a los homínidos: el pasar hambre. Los primates, que habitan bosques tropicales, siempre disponen de alimentos a su alcance, en cualquier momento del día o de la noche, en todas las estaciones del año. Pero nuestros antecesores, en las nuevas condiciones ecológicas en las que se vieron forzados a evolucionar, se enfrentaban con frecuencia a tener que sobrevivir durante varios días solo con cuatro raíces e incluso soportar largos períodos de hambruna ocasionados por las cada vez más complicadas condiciones climatológicas y geológicas.

Solo existe una forma de resolver el problema de sobrevivir a largos períodos de escasez de alimentos: almacenar reservas de energía durante los períodos de abundancia. Algunos animales solucionan este problema escondiendo provisiones en un lugar seguro. Pero la mayor parte prefiere llevar las reservas de energía siempre consigo en forma de grasa, por si las necesitan en cualquier momento. La grasa corporal es la forma más eficiente y económica de almacenar energía. La grasa empaqueta dos veces más energía que los carbohidratos o las proteínas por unidad de peso. Se almacena sin agua, con un coste de solo el tres por ciento de la energía almacenada. La glucosa se guarda en forma de glucógeno en el hígado y en el músculo, pero tiene que conservarse con mucha agua y a un coste elevado, de más de un veinte por ciento de la energía almacenada.

Los lípidos se acumulan en el tejido adiposo, que está formado por unas células, los adipocitos, capaces de acopiar grandes cantidades de estas moléculas en su interior hasta llegar a convertirse en una enorme gota de grasa. Por lo tanto, una primera condición necesaria para que un animal acumule grasa es que disponga de una buena dotación de estos acumuladores. Los depósitos grasos se llenan cuando hay exceso de alimentos y, en principio, de forma ilimitada. Los *Australopithecus* tampoco necesitaban comer grasas para acumularla, ya que la mayor parte de los lípidos los fabricaba el hígado a partir de la fructosa de las frutas y otros vegetales.

Todos los mamíferos poseen la capacidad de acumular algo de grasa en su organismo, pero este proceso está acelerado en algunas especies en las que una abundante provisión de grasas es esencial para su supervivencia. Por ejemplo, el oso debe hacer acopio de gran cantidad de grasa para sobrevivir

al largo sueño de la hibernación. Los mamíferos que habitan las frías aguas de las zonas polares, como las ballenas, las focas o las nutrias, necesitan conservar grandes cantidades bajo la piel para que les sirva a la vez de aislante térmico y de reserva energética. El camello guarda gran cantidad de grasa en su joroba para poder sobrevivir a muchos días sin comer ni beber en el desierto. Hay que hacer constar que cuando se metaboliza, parte de la grasa se convierte en agua, además de producir energía.

El ser humano es uno de los mamíferos que más grasa posee: nuestra masa grasa es tan abundante que nos asemeja más a un delfín que a un primate. Los seres humanos, junto con el cerdo, son los animales que poseen un mayor número de adipocitos en relación con su masa corporal. Esta es la razón de la enorme facilidad para acumular grasa de estas dos especies de animales. Y esta característica se fue potenciando evolutivamente cada vez que nuestros antecesores se enfrentaban a períodos prolongados de escasez de alimentos. Para sobrevivir a esas situaciones frecuentes de precariedad energética la selección natural nos dotó de la capacidad de cargar con una abundante reserva de combustible. Apareció sobre el planeta el mono obeso. Pero ¿cómo fue posible esta adaptación?

Según la hipótesis del genotipo ahorrador o *thrifty genotype*, formulada por primera vez por James Neel en 1962, los ciclos de hambre y abundancia que padecieron durante millones de años de evolución nuestros ancestros en aquel entorno de escasa disponibilidad de alimentos seleccionaron un genotipo que, mediante mutaciones en los receptores a ciertas hormonas o en la actividad de algunas enzimas, permitía una ganancia rápida de grasa durante las épocas de abundancia. Así, estos depósitos de energía de reserva proporcionaban ventajas de supervivencia y reproducción cuando escaseaba la comida. Los que desarrollaban estas características genéticas cumplían mejor con las Fuerzas de la Vida, se reproducían más y transmitían a sus descendientes ese genotipo ahorrador de energía.

Un grupo de investigación formado por más de cincuenta genetistas de todo el mundo ha logrado identificar 32 genes ahorradores en la población actual, los cuales se asocian con la obesidad. Los seres humanos portamos una proporción variable de esos genes ahorradores. Aquellas personas con mayor número de alelos ahorradores en su genoma tienen un mayor índice de masa

corporal y mayor predisposición a la obesidad que aquellos que portan en sus genomas pocos alelos ahorradores. Pero esa ventaja del diseño evolutivo que permitió a nuestros ancestros afrontar con éxito la escasez de alimentos hace millones de años hoy se vuelven en nuestra contra. Cuando sometemos esta configuración al sedentarismo y a la abundancia constante de alimentos que caracterizan hoy a las sociedades opulentas, los genes ahorradores se convierten en los responsables de las llamadas enfermedades de la opulencia, como la obesidad, la diabetes, la hiperlipemia, la hipertensión y la aterosclerosis, entre otras muchas. Todo ello se trata con detalle en mi libro *El mono obeso* (Crítica, 2004).

## LOS CAMBIOS EN LA REPRODUCCIÓN

La bipedestación, al modificar la estructura de la cadera, desplazó la abertura de la vagina hacia delante. En las hembras de los primates, como en el resto de las especies animales, la vagina se abre hacia atrás, justo bajo el orificio anal, que a su vez se encuentra inmediatamente debajo del rabo. A causa de esta disposición anatómica, en la mayor parte de los animales, incluidos los primates, la cópula se realiza por detrás. Esta posición exigía desplegar atractivos traseros para atraer al macho, como los escandalosos colores y tumefacciones que adornan la vulva de las monas en celo.

Al desplazarse la vagina hacia delante, se favoreció la cópula delantera, cara a cara. Es posible que con los australopitecinos, nuestros primeros ancestros de los que tenemos certeza fósil de que caminaban sobre dos patas, se terminara la moda de los coloreados traseros, de las vulvas hinchadas y llamativas. La evolución fomentó el desarrollo de regiones de especial atractivo sexual y de mayor sensibilidad en la zona delantera, la parte que se frotaba con el compañero sexual durante el coito. En nuestra especie, actualmente, la mayor parte de las señales sexuales y las principales zonas erógenas se encuentran en la parte anterior del cuerpo: los labios, el pecho, el vientre, el área genital y la cara anterior de los muslos.

Son numerosas las repercusiones que tuvo en nuestra evolución este hecho aparentemente banal. Una de ellas es que permitió la cópula cara a cara, característica exclusiva de la especie humana. Por supuesto, esta no es la

única postura posible en el apareamiento humano, gracias sobre todo a la extraordinaria flexibilidad del pene humano. La erección en el hombre se produce por un mecanismo hidráulico, al llenarse el pene de sangre a presión, sin que exista ningún hueso rígido en su interior. Muchos autores opinan que la cópula cara a cara tuvo una gran importancia en la aventura humana. Por primera vez, en toda la historia evolutiva de la vida sobre este planeta, un macho y una hembra podían abrazarse, mirarse a los ojos y rozar sus caras mientras copulaban. Sí: seguro que ha tenido alguna trascendencia en nuestra evolución el ser los únicos seres vivos a los que se les ha permitido besarse mientras mezclan sus genes. Los aspectos de la evolución de la sexualidad humana se tratan con detalle en mi libro *La cadera de Eva* (Crítica, 2005).

#### VENTAJAS DEFENSIVAS DE LA BIPEDESTACIÓN

Nuestros primeros ancestros, los *Ardipithecus ramidus*, que vivían en el espesor de la selva, solo necesitaban realizar movimientos rápidos y breves para escapar de las amenazas de los predadores, lo justo para trepar a lo alto del árbol o saltar a la rama del árbol vecino. Pero los *Australopithecus*, que se movían por sabanas arbustivas donde solo podrían encontrar refugio en algún bosquecillo cerca de un río o de una laguna, necesitaban a veces huir durante minutos o incluso días para alejarse de algún peligro. Por esa razón, nuestros ancestros desarrollaron una gran capacidad para trotar durante largas distancias. A ello contribuyeron las adaptaciones termorreguladoras. La postura bípeda reduce el área de la superficie expuesta al Sol mientras se busca comida, lo que es de suma importancia sobre todo en África a medio día. Posiblemente, fue entonces cuando comenzamos a perder vello corporal para hacer más eficaz la sudoración. Todo esto minimizaba el estrés térmico, lo que permitía correr durante más tiempo que ningún otro animal y buscar alimento durante todas las horas del día.

Los *Australopithecus* desconocían el uso del fuego, del que huían como cualquier otro animal. Por las noches se protegían de los depredadores en nidos construidos en las ramas de los árboles y en cuevas poco profundas, que utilizaban de forma ocasional. Estaban constantemente amenazados por la gran cantidad de fieras poderosas que vagaban por las sabanas y los bosques. Y



suponemos que debían de emplear instrumentos, tales como piedras, palos y huesos de animales, para defenderse de los depredadores. Eran criaturas de pequeño tamaño, que ya no vivían en la protección permanente de un bosque espeso, que ni siquiera poseían colmillos ni garras con los que defenderse. Es evidente que estos homínidos no pudieron sobrevivir sin utilizar algún tipo de arma. Usaban los instrumentos tal como los encontraban en el momento de requerir su uso. Puede ser que el gran logro de los australopitecinos sobre sus predecesores fuese el de tener suficiente volumen cerebral como para, en vez de abandonar los instrumentos tras utilizarlos como hacen hoy los chimpancés, conservarlos para otra ocasión.

## BIPEDESTACIÓN Y PATOLOGÍA VERTEBRAL

La estructura esquelética y muscular de nuestra cabeza y nuestra columna vertebral es un prodigio de estabilidad y flexibilidad para permitir la deambulación circense que implica la bipedestación. También faculta numerosos movimientos de flexión y giros en todas las direcciones del espacio que confirieron a nuestros antepasados numerosas ventajas de supervivencia. Este magnífico diseño evolutivo lo comenzamos a someter a sobrecargas antinaturales cuando comenzaron los trabajos agrícolas y artesanales, hace más de ocho mil años. Desde entonces, nuestra columna se ha visto sometida a posturas y movimientos en contra de su diseño, lo que ha provocado miles de años de problemas de espalda, como han diagnosticado los paleopatólogos en huesos fósiles humanos muy antiguos.

Pero nunca nuestra espalda y nuestro cráneo han estado tan sobrecargados como en los tiempos que corren. Hoy día sometemos a nuestra columna vertebral a posturas de flexión mantenidas durante horas y a movimientos que nos ocasionan graves problemas, inflamación, deformaciones y dolores, así como pérdida de las capacidades funcionales. Está bien demostrado que se originan problemas graves de cuello en personas que pasan horas con la cabeza flexionada tecleando en su móvil, tableta u ordenador.

Esta situación se agrava con otro problema de nuestra sociedad: el sedentarismo. La columna vertebral no tiene articulaciones como la rodilla o el codo. Las vértebras, que son los huesos que la forman, se mantienen en su

sitio y cumplen su función gracias al tono y al desarrollo de los músculos paravertebrales, que las mantienen en posición y permiten las rotaciones y giros durante los movimientos. El sedentarismo atrofia estos músculos y entonces las vértebras comienzan a rozarse entre sí y a formar puentes óseos entre unas y otras, dando pie a los dolores de espalda y los problemas con los discos intervertebrales.

Si queremos tener una columna sana debemos respetar nuestro diseño evolutivo, intentar mantener la postura cervical y del resto de la columna lo más natural posible y tonificar nuestros músculos vertebrales con los ejercicios adecuados.

## El cerebro que surgió del frío

Hace unos tres millones de años, se acrecentó la tendencia al enfriamiento global del planeta. Comenzaron a sucederse una serie de picos abruptos en las temperaturas que se correspondían con períodos glaciales, separados por fases interglaciales cálidas más o menos largas. Cada uno de estos ciclos duraba varios miles de años. La respuesta adaptativa para que nuestros ancestros superaran estas oscilaciones del clima fue el cerebro.

Hace unos tres millones de años el clima adoptó un patrón cíclico en el que se intercalaban períodos de frío intenso con otros más cálidos. Los estudios paleoclimáticos muestran cómo durante los ciclos fríos gran parte de las masas continentales de Europa, Siberia, el norte de América, la Antártida y Groenlandia se fueron cubriendo, a lo largo de milenios, de capas de hielo de varios kilómetros de espesor. Esto hizo descender el nivel de los océanos y, en consecuencia, al reducirse la cantidad de agua disponible en la atmósfera, aumentó la sequía en muchas partes del planeta. En las latitudes más bajas, como en el este africano, la mayor aridez del clima favoreció que prosperara un tipo de vegetación arbustiva, más propio de las zonas desérticas. También se incrementaron las sabanas de pastos, casi desprovistas de árboles, semejantes a las praderas, las estepas o las pampas actuales. El proceso de glaciación persistió a lo largo de miles de años hasta alcanzar un máximo de extremo frío y de sequedad.

Luego comenzó un ciclo cálido interglaciar: a lo largo de miles de años subió la temperatura global, por lo que se fundieron las masas heladas continentales. En los polos, los hielos remitieron ligeramente, aunque nunca desaparecieron por completo. Aumentó el nivel del mar y, al existir mucha

más agua disponible en la atmósfera, se incrementó la humedad en muchas zonas del planeta. Estos períodos interglaciares duraban varios miles de años hasta que comenzaba de nuevo la época fría. Como veremos más adelante, hoy nos encontramos en una fase interglaciar de calentamiento que comenzó hace unos quince mil años.

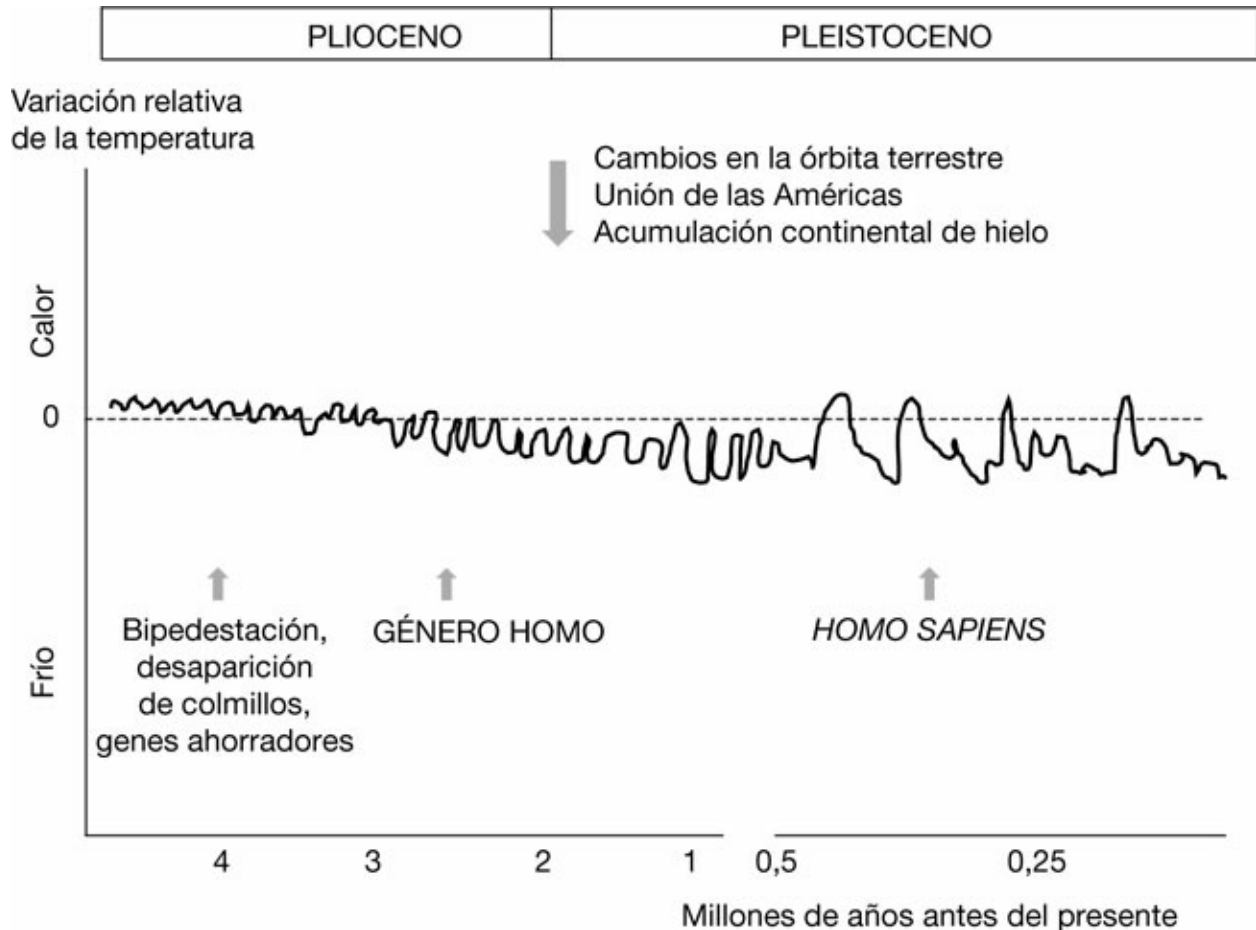


Figura 12.1. A finales del Plioceno se agudizó el enfriamiento global del planeta. Comenzaron a producirse ciclos de enfriamiento y calentamiento de entre cuarenta mil y ochenta mil años de duración. La temperatura media del planeta casi nunca superaba la temperatura media actual.

Los paleoclimatólogos no se ponen de acuerdo respecto a las causas de esta agudización oscilante del enfriamiento del planeta. En el proceso podrían haber desempeñado un papel determinante algunos acontecimientos geológicos. Pero los cambios cíclicos extremos en la temperatura (que aún continúan) se atribuyen, sin embargo, a dos fenómenos astronómicos que provocaron grandes variaciones en la cantidad de radiación solar que recibe

el planeta. La inclinación del eje de rotación de la Tierra varía con una periodicidad de 23.000 años y determina la cantidad de energía solar que reciben las distintas zonas del globo. Además, la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol ocasiona que en determinados momentos esté más cerca de la estrella y, en otros, más alejada; entre ambos extremos, transcurren unos cien mil años. La combinación de ambos fenómenos da lugar a los «ciclos de Milankovitch», los responsables, al parecer, de los ciclos térmicos que ocurren desde hace más de tres millones de años.

## EL CLIMA CREÓ EL CEREBRO

Coincidiendo con el inicio del enfriamiento oscilante de nuestro planeta se produjo otro gran salto en la escalera de la evolución de la especie humana: se aceleró el proceso de la encefalización. Esto viene avalado por la aparición de restos fósiles de los primeros representantes de nuestro propio género: el género *Homo*. ¿Cómo pudieron el frío, la sequía y, en definitiva, las condiciones difíciles para la supervivencia acelerar el desarrollo evolutivo de nuestro cerebro? La clave está en las diferentes respuestas evolutivas de los organismos a los cambios en el medio ambiente.

Se acepta desde la ciencia que la selección natural es el mecanismo por el cual los seres vivos evolucionan y se transforman. En el mundo exterior se producen cambios que dificultan que una determinada especie pueda cumplir con las Fuerzas de la Vida, por lo que la selección natural constituye el mecanismo que proporciona las soluciones más adecuadas para la supervivencia de esa especie o bien para hacerla desaparecer. La clave del proceso reside en las mutaciones aleatorias, sin finalidad precisa, que continuamente se producen en los individuos de cualquier especie (variabilidad genética). Algunas de estas variaciones confieren a los sujetos que las portan ventajas de supervivencia en un determinado entorno (adaptabilidad). Las mutaciones favorables se heredan y a lo largo de las generaciones se van imponiendo en todos los individuos de la especie.

Otra de las fuerzas promotoras de variaciones en las especies son las modificaciones de larga duración (miles de años) en el medio ambiente en el que viven: movimientos tectónicos, terremotos, volcanes, alteraciones

drásticas en la topografía o cambios climáticos globales. En cualquier caso, se modifican la temperatura, las precipitaciones y el viento, la flora y la fauna de las que esa especie se alimenta, la orografía y las fuentes de agua de las que bebe.

Cuando estos cambios ocurren a lo largo de miles de años ponen en juego las posibilidades de supervivencia de esa especie, ya que todos los organismos siempre prefieren aquel entorno más adecuado para cumplir con las Fuerzas de la Vida, mejorar así las expectativas de supervivencia como individuos y garantizar la reproducción como especie. Cuando el hábitat usual cambia, solo existen tres soluciones:

1. Moverse hasta encontrar otro nuevo hábitat que reúna las condiciones idóneas para cumplir con las Fuerzas de la Vida.

2. Adaptarse al nuevo hábitat a través de los cambios genéticos que proporcionan nuevas habilidades para sobrevivir en las nuevas condiciones ambientales.

3. Extinguirse.

Recapitemos nuestra historia evolutiva hasta la actualidad. Nuestros primos los chimpancés y los bonobos se quedaron en las densas selvas del Congo. Allí las condiciones ambientales apenas se han modificado en millones de años. Esas especies no han necesitado cambiar, ni emigrar, ya que siempre se han encontrado en el mejor entorno posible para su supervivencia y reproducción. De este modo, ambas especies han permanecido inalterables durante millones de años. Solo se han generado unas pequeñas diferencias entre unos y otros a causa de la barrera genética que suponía la infranqueable corriente del gran río africano.

Los primeros homínidos, que habitaban el este y sur de África, comenzaron a sufrir el enfriamiento y la sequía. Estos cambios permanentes en su entorno dificultaban su supervivencia y su capacidad de reproducción. La secuencia de cambios principales en la adaptación a estas condiciones desfavorables fue: la bipedestación, la desaparición de los colmillos, la adquisición de un patrón metabólico ahorrador, las modificaciones de la estructura digestiva que permitieron el acceso a nuevos alimentos, el aumento de tamaño y de complejidad del cerebro y el mayor desarrollo social, entre otras.

Pero el hito esencial de la evolución de los homínidos, la encefalización, se ajusta más al mecanismo que se ha denominado «selección de variabilidad». Los mecanismos clásicos de la evolución no funcionan cuando el entorno varía más rápidamente que la velocidad a la que se pueden producir y acumular mutaciones favorables. No era cuestión de desarrollar eficaces cambios genéticos (por ejemplo, cubrir todo el cuerpo de una gruesa capa de pelo) para sobrevivir durante los siglos álgidos de frío glacial y escasez de alimentos, que luego no les servirían de nada en los siguientes siglos de calentamiento y abundancia. O viceversa. Por eso cuando el entorno experimenta grandes oscilaciones en cortos períodos de tiempo la especialización para ese entorno en particular es poco ventajosa.

La hipótesis de la selección de variabilidad propuesta por R. Potts sugiere una mayor versatilidad de las respuestas adaptativas para poder hacer frente con éxito a los grandes y oscilantes cambios climáticos. Las adaptaciones específicas para un determinado hábitat tuvieron que ser reemplazadas por la combinación de nuevas estructuras y nuevos patrones conductuales capaces de dar una respuesta adecuada a cambios ambientales tan complejos y rápidos. Por eso a nuestros ancestros, hace casi tres millones de años, se les ofreció una solución novedosa y única para enfrentarse a las modificaciones en el medio ambiente. ¿Se pueden imaginar una especie que pudiera desarrollar un dispositivo natural que le permitiera una adaptación rápida a cualquier condición ambiental, ya sea al frío extremo de los polos, al calor y a la sequía de los desiertos, a la humedad calurosa de las selvas tropicales o a las altas montañas carentes de oxígeno? ¿Advierten la utilidad de un dispositivo que permitiera cumplir con las Fuerzas de la Vida aunque los cambios climáticos drásticos ocurrieran solo en meses? Pues ese dispositivo es el cerebro de la especie humana.

Este órgano es el invento evolutivo más idóneo para adaptarse a cambios rápidos, ya que proporcionaba la capacidad de enfrentarse a diversos hábitats y climas, más que especializarse en un solo tipo de entorno. Si llegaba el frío, el cerebro permitía matar a un bisonte, quitarle la piel y confeccionarse un abrigo que pudieran quitarse cuando llegara el calor. Esto no ocurrió de repente, fue posible gracias a la acumulación de una serie de adaptaciones previas.

## EL GÉNERO *HOMO*

A lo largo del millón y medio de años transcurridos desde que Lucy se paseaba por África habían surgido numerosas especies de homínidos, algunas de las cuales prosperaron durante cientos de miles de años y luego desaparecieron. Es conveniente tener en cuenta que la aparición de una nueva especie no tiene por qué coincidir necesariamente con la extinción de la precedente. En realidad, muchas de estas especies llegaron a convivir durante cientos de miles de años.

Por aquellos tiempos, hace tres millones de años, habitaba la zona del este de África el primer representante del género *Homo*: el *Homo habilis*, un antecesor mucho más próximo a nosotros que cualquiera de las anteriores especies, que tenía una capacidad craneal mayor que la de Lucy, de entre 600 y 800 cm<sup>3</sup>, además de una reducción del prognatismo de la parte inferior de la cara y del tamaño de dientes y muelas. El *Homo habilis* ya era capaz de fabricar utensilios de piedra, aunque muy toscos. En noviembre de 2014 se descubrieron en unas cuevas de Sudáfrica los fósiles del *Homo naledi*: más de mil restos pertenecientes a quince individuos. Se trata de un nuevo eslabón de la cadena de nuestra evolución, que estaría situado entre los australopitecinos y los primeros representantes conocidos del género *Homo*. Esta nueva especie de homínido tendría un peso entre 40 y 55 kilos. La mayor parte de los fósiles encontrados, especialmente aquellos relacionados con la manipulación, la locomoción o la masticación, son más similares al género *Homo* que al *Australopithecus*. Otros huesos, como el cráneo, la pelvis o los hombros, son más parecidos a los fósiles de las especies de homínidos anteriores.

La aparición de todas esas especies de homínidos y de algunas más, que debieron de existir pero de las que no tenemos conocimiento, representan diferentes tanteos de nuestra evolución, como si se hicieran pruebas para encontrar el modelo más idóneo, el mejor diseño para crear esa herramienta prodigiosa de supervivencia que es el cerebro, y así superar las dificultades del entorno. La mayor parte de estas especies acabaron extinguiéndose porque las mutaciones acumuladas no fueron las adecuadas para sobrevivir en un hábitat cambiante y cada vez más hostil. Pero una línea sí prosperó en la



dirección adecuada y es esa la que volvemos a encontrar ahora en los mismos parajes por los que su antecesora Lucy se paseaba más de dos millones de años antes.

Se trata del *Homo ergaster*, cuyo representante fósil más característico es el llamado niño de Turkana. Sus restos fueron descubiertos en el verano de 1984 por el equipo de Richard Leakey en un yacimiento próximo a la orilla occidental del lago Turkana, en Kenia. Se trata de un esqueleto de un muchacho de un millón ochocientos mil años de antigüedad, uno de los más completos de todo el registro humano fósil: a la cabeza solo le faltan unos minúsculos fragmentos del cráneo y del maxilar, conserva todos los dientes y tiene completas la columna vertebral y la caja torácica; muestra los huesos de los brazos y de las manos, la pelvis completa y ambas piernas. Solo se han perdido algunos huesos de los brazos, los pies y algunas vértebras cervicales. A partir de otros fósiles se ha podido verificar que los individuos de la especie *Homo ergaster* poseían unos pies muy parecidos a los nuestros, con un empeine bien formado, y que su astrágalo, el hueso que soporta todo el peso del cuerpo, era ya casi idéntico al nuestro. La capacidad craneal de aquel muchacho era mayor de 800 cm<sup>3</sup>, tenía una estatura de 162 centímetros y, de cuello hacia abajo, presentaba unas proporciones casi completamente humanas. Aún no había perdido los caninos de leche y sus huesos no habían acabado de crecer del todo. De adulto, su cerebro habría alcanzado casi los 900 cm<sup>3</sup> y su estatura habría llegado a los 180 centímetros. A partir de otros fósiles se estima que el *Homo ergaster* había tenido una capacidad craneal entre 800 y 1.000 cm<sup>3</sup>, prácticamente de un sesenta a un setenta por ciento de la nuestra. Su cara era también moderna: sus huesos nasales eran prominentes, ya no tan chatos como en el resto de los primates y, en general, el esqueleto facial tenía una apariencia más humana. En su dentadura se observa una reducción en el tamaño de los molares y premolares, así como de los caninos e incisivos. La mandíbula adopta una forma en U, muy diferente a la forma en V del resto de los primates.

EVOLUCIÓN DEL CEREBRO ARCAICO

Se sabe muy poco acerca de las etapas de la evolución del cerebro. El encéfalo no fosiliza, solo lo hace su envoltura ósea, por lo que conocemos bastante bien la evolución de los cráneos, pero carecemos de información acerca del desarrollo de la estructura y complejidad de los encéfalos. En general se diferencian dos etapas fundamentales. Una etapa de inicio, que va desde los primeros homínidos (cráneos de menos de 450 cm<sup>3</sup>) hasta el *Homo ergaster* (900 cm<sup>3</sup>), y una segunda, o fase de culminación, que abarcaría hasta la aparición del *Homo sapiens sapiens* arcaico, con un cerebro de 1.500 cm<sup>3</sup> (algo mayor que el de los seres humanos actuales), lo que sucedió hace apenas doscientos mil años.

Es un misterio cómo se desarrolló nuestro cerebro con una capacidad y una complejidad estructural tan sorprendente. Pero también resulta intrigante cómo fue posible que evolucionara a la velocidad a la que lo hizo: en apenas tres millones de años su volumen pasó de 450 a 1.300 cm<sup>3</sup>. Si los datos paleoantropológicos actuales son correctos, significa un aumento de 850 cm<sup>3</sup> en tres millones de años, o en treinta mil siglos. Un pequeño cálculo nos señala que el cerebro creció casi 30 mm<sup>3</sup> por siglo de evolución. Si consideramos una duración media de treinta años para cada generación (tres generaciones por siglo), han pasado unas cien mil generaciones desde Lucy hasta nosotros, lo que supone un crecimiento medio de 10 mm<sup>3</sup> de encéfalo por generación. ¡El tamaño de una lenteja!

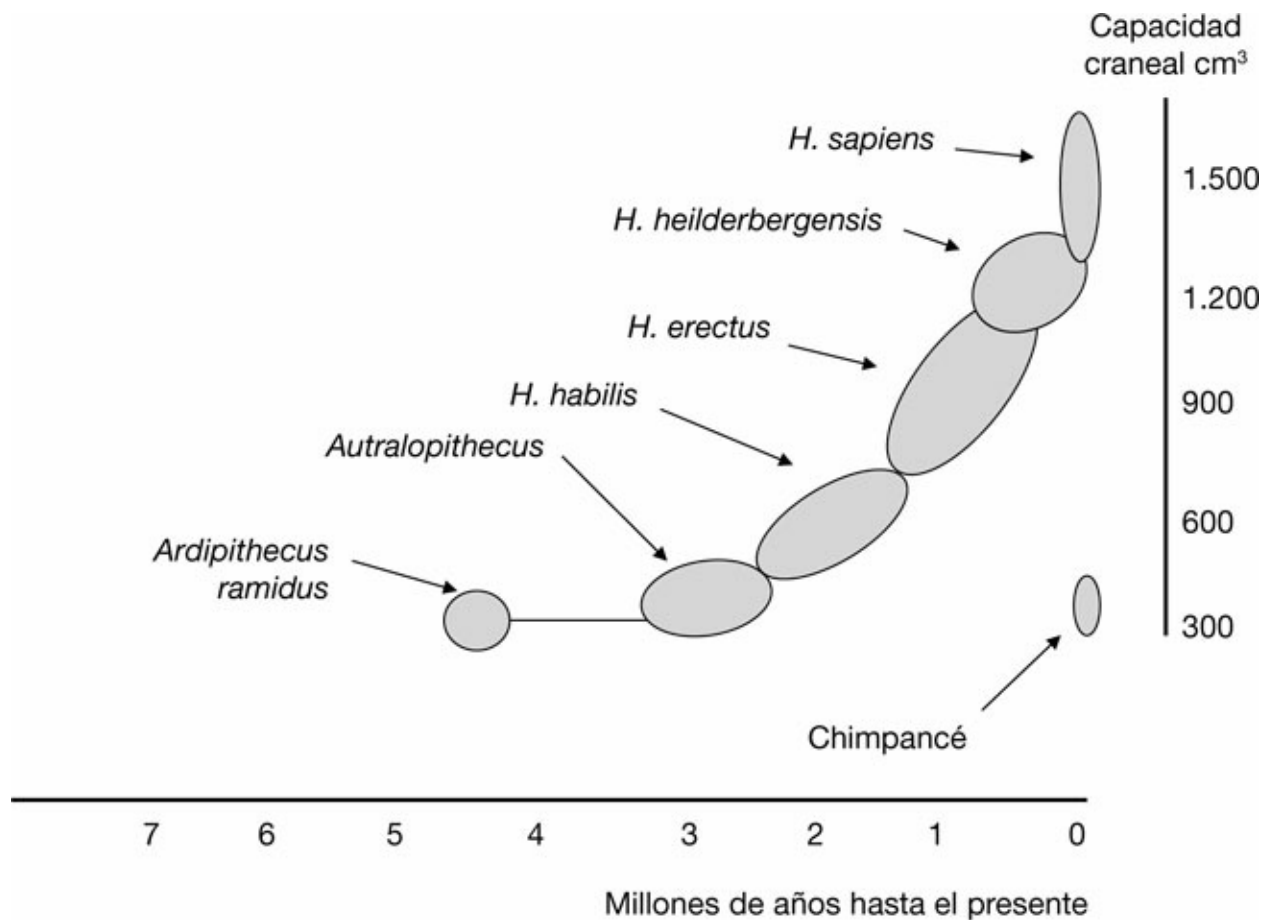


Figura 12.2. La evolución del cerebro ocurrió de manera muy rápida a partir de los *Australopithecus*, que tenían una capacidad cerebral similar a la de los chimpancés actuales. El cerebro cuadruplicó su volumen en apenas tres millones de años.

## LA NEOTENIA

Si vamos de visita al zoo y nos acercamos al recinto de los chimpancés nos enternecerá la imagen de ese pequeñín recién nacido que tanto nos recuerda a nosotros y a nuestros hijos. Tocaremos con nuestra mano la zona del cristal protector donde él planta su mano peluda y jugaremos con la cría que tanto se nos parece, hasta que su madre irrumpe de un salto y se la lleva a un lugar seguro. Nos sorprende que el adulto no se parezca en nada a nosotros a pesar de la gran semejanza que tenemos con su cría. Realmente, un bebé chimpancé se parece más a un ser humano adulto que a su propia madre. O dicho de otro modo: nosotros manifestamos en la edad adulta las características infantiles de nuestros ancestros.

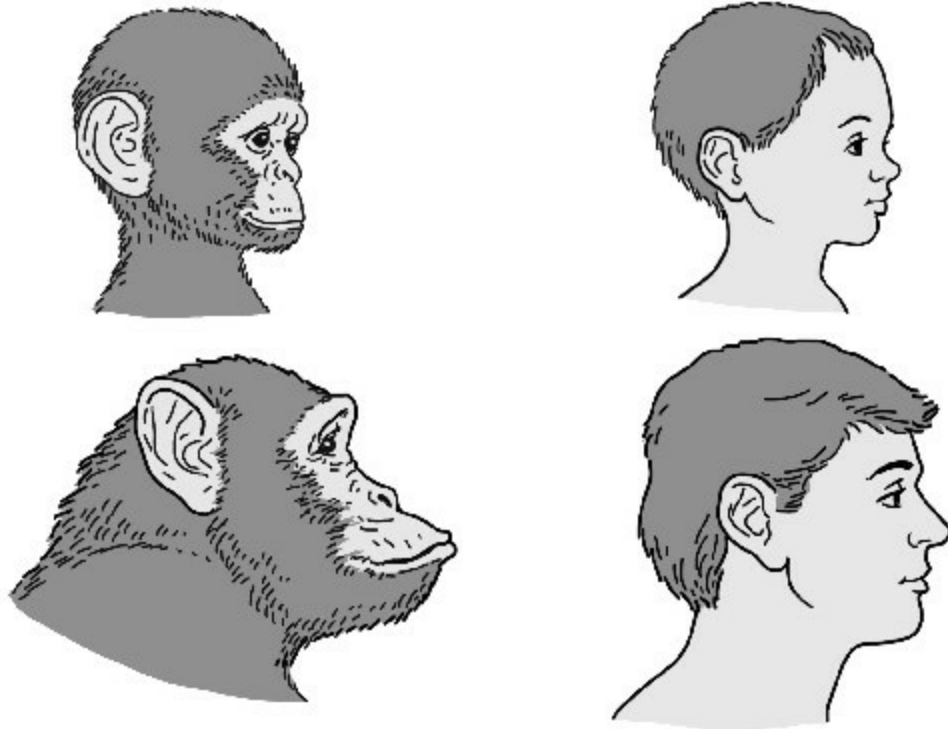


Figura 12.3. El cráneo y la estructura facial del chimpancé joven se asemejan mucho más a la estructura craneal y a la cara del humano adulto que a los de su propia madre. Este fenómeno se denomina «neotenia».

A este fenómeno biológico de persistencia de caracteres infantiles en la edad adulta se lo denomina «neotenia» (del griego *neo*, «joven», y *teinein*, «extenderse»). Parece ser que este fenómeno forma parte de un proceso de enlentecimiento del desarrollo que ha sido fundamental para la evolución de nuestro cerebro, según opinan ilustres científicos evolucionistas. Los cráneos y huesos faciales de los cromañones adultos (nosotros) se parecían mucho más a los cráneos y huesos faciales de las crías de los neandertales que a los de sus padres.

Los más recientes estudios genéticos sugieren que las variaciones en el ritmo del desarrollo podrían constituir un poderoso mecanismo en la evolución, ya que permiten remodelar los organismos utilizando solo unos pocos cambios moleculares. Se ha analizado la expresión de 7.958 genes en el cerebro de 39 cadáveres humanos y 14 de chimpancés que habían muerto a diversas edades. La zona estudiada fue la parte dorsolateral de la corteza prefrontal, que es un área ligada a la memoria y que se identifica fácilmente en ambas especies. Tanto en los humanos como en los simios, un porcentaje

similar de genes cambiaba de actividad a lo largo de su vida, pero diferían en el momento del desarrollo en que se activaban. De los 299 genes cuyo ritmo de activación cambiaba con la edad, el cuarenta por ciento se expresan en los seres humanos a una edad más avanzada. Es decir, esa parte del cerebro permanecía más infantil en los humanos que en los chimpancés.

No se conoce la función específica de estos genes neoténicos, pero la hipótesis que se aduce apunta a que podrían permitir una mayor capacidad para el aprendizaje. La aptitud de adquirir conocimientos nuevos es muy elevada en el cerebro infantil y disminuye con la madurez. La neotenia proporcionaría una maduración más lenta, dando así mayor oportunidad temporal al aprendizaje. Es decir, el cerebro humano aprende más porque permanece infantil durante más tiempo.

## El cerebro caprichoso y tragón

El cerebro humano es un lujo evolutivo, es la herramienta más delicada y precisa jamás creada en la biología. ¿Qué nos costó permitirnos esa ventaja? Hablamos de precio energético, de kilocalorías. En este capítulo vamos a considerar cómo se desarrollaron las adaptaciones metabólicas que permitieron tan elevada tasa de crecimiento cerebral y sus repercusiones para nuestra salud.

Ya vimos que desde un punto de vista termodinámico, un mayor grado de orden y de complejidad requiere un mayor aporte de energía. Esta es la causa de que nuestro cerebro sea un órgano muy costoso de construir y de mantener, en términos energéticos.

El aumento del volumen del cerebro es una especialización como la de cualquier otro órgano, y la selección natural favoreció el crecimiento encefálico porque proporcionó ventajas de supervivencia frente a las grandes oscilaciones climáticas que tuvieron que padecer los homínidos. La alimentación que proporcionaba más energía y moléculas más ordenadas permitió el desarrollo de un cerebro grande, capaz de almacenar y procesar cantidades astronómicas de información. A su vez, su mayor tamaño permitió una mejor alimentación y un mejor cumplimiento del resto de las Fuerzas de la Vida.

El cerebro es un órgano que consume mucha energía y posee una elevada actividad metabólica. En los seres humanos tiene una actividad metabólica varias veces mayor de lo esperado para un primate de nuestro mismo peso corporal: consume más de un veinte por ciento del gasto energético en reposo

(metabolismo basal), en comparación con el gasto, de ocho a diez por ciento, del cerebro de un chimpancé. Sí, casi la cuarta parte de todo lo que usted come a diario sirve para mantener el cerebro en funcionamiento.

Además, es un órgano exquisito y muy caprichoso en cuanto al combustible que utiliza para producir energía; no le sirve cualquier cosa. En situaciones normales, el cerebro humano solo consume glucosa y utiliza cien gramos de este hidrato de carbono cada día, la cual procede de los alimentos vegetales ingeridos y de la transformación de algunas proteínas. Solo en casos de extrema necesidad, por ejemplo tras varios días sin comer hidratos de carbono, el cerebro recurre a su combustible alternativo, un sucedáneo: se trata de los cuerpos cetónicos, que derivan de las grasas.

A causa de estas peculiaridades metabólicas del tejido cerebral, su funcionamiento entraña un elevado consumo de recursos y gasta continuamente una notable cantidad de combustible metabólico. Estos valores aumentan si consideramos el precio de su desarrollo: el cerebro de un recién nacido representa el doce por ciento del peso corporal y consume alrededor del sesenta por ciento de la energía del lactante. Una gran parte de la leche que mama un niño se utiliza para mantener y desarrollar este órgano.

### ¿CEREBRO O INTESTINO? ESA ES LA CUESTIÓN

Ante este gasto tan elevado se plantea una cuestión de reparto. La cantidad de energía que un organismo puede introducir en forma de comida es limitada. Depende en gran parte de la dificultad de conseguir unos alimentos de elevada calidad energética y de la capacidad de digerirlos. En cualquier caso, sea mucha o poca la energía que se ingiere cada día, esas calorías hay que repartirlas para permitir el funcionamiento de los diferentes órganos y sistemas que componen el organismo en su totalidad.

La energía de los alimentos debe permitir que funcione el cerebro, que el corazón lata y que la sangre circule, que el fuelle de los pulmones no se pare, que el riñón filtre, que las glándulas endocrinas fabriquen sus secreciones, que nuestro aparato digestivo digiera los alimentos y absorba los nutrientes y que

los músculos se contraigan para permitirnos movernos. La energía debe dar para todos, y si alguno de estos sistemas gasta más de la cuenta, hay que quitárselo a otro; pero si el cerebro gasta demasiado ¿a quién se lo quitamos?

En 1891, *sir* Arthur Keith enunció que en los primates existe una relación inversa entre el tamaño del cerebro y el del intestino: «Un primate no puede permitirse tener a la vez un sistema digestivo grande y un cerebro también grande». En 1995, L. Aiello y P. Wheeler, completaron este principio formulando la llamada «hipótesis del órgano costoso». En ella se establece que, dado que el cerebro es uno de los órganos más costosos desde el punto de vista metabólico, un aumento evolutivo de su volumen solo sería posible a cambio de reducir el tamaño y la actividad de otro órgano con similar consumo de energía. ¿Pero cuál es este órgano? El otro sistema que consume tanta energía como el cerebro es el aparato digestivo. El intestino puede reducirse a lo largo de la evolución porque su tamaño, en una determinada especie, depende de la calidad de la alimentación que esta ingiera. Una dieta de alta calidad es la que se digiere con facilidad y libera mayor cantidad de nutrientes y energía por unidad de trabajo digestivo invertido. Cuando se comparan en términos energéticos las proporciones de volumen del cerebro y del aparato digestivo en humanos y en chimpancés, se obtiene un resultado concluyente: la energía ahorrada por la reducción del tamaño del intestino en humanos es aproximadamente del mismo orden de magnitud que el coste energético adicional de su mayor cerebro. Así, según estas teorías, la expansión cerebral que se produjo durante la evolución desde nuestros antecesores hasta el hombre solo fue energéticamente posible mediante una reducción paralela del tamaño del aparato digestivo; y eso fue consecuencia del cambio de dieta.

La evolución pudo haber optado por otras soluciones. Por ejemplo, la de incrementar la cantidad total de energía en forma de alimento, para así permitir que hubiera suficiente a la vez para un voluminoso cerebro y para un gran aparato digestivo. Pero esto planteaba la dificultad insalvable de cómo conseguir cada día tanta comida. Esta solución solo hubiera sido posible en un entorno de gran abundancia de alimentos energéticos, pero ya hemos visto que



lo que disparó nuestra separación del resto de los primates e inició el camino hacia la especie humana fue precisamente el abandono del bosque y el hambre. Así que no quedaron muchas opciones.

Para la selección natural, la expansión cerebral del género *Homo* solo fue posible mediante un cambio en la alimentación. La reducción en el consumo de vegetales permitía una disminución del tamaño del intestino grueso o colon y el incremento de alimentos de origen animal exigía un aumento del intestino delgado. Pero el balance global de pasar de una alimentación herbívora a otra carnívora es una reducción del tamaño (y del gasto metabólico) del aparato digestivo. Este cambio de dieta se vio alentado por las condiciones climáticas desfavorables que les tocó soportar. La escasez de vegetales los forzó a recurrir a consumir comida procedente de animales, tanto terrestres como acuáticos. Este cambio nutricional, junto con el cocinado de los alimentos, permitió a nuestros ancestros disponer de un intestino más pequeño y así ahorrar energía para dedicarla al desarrollo del cerebro.

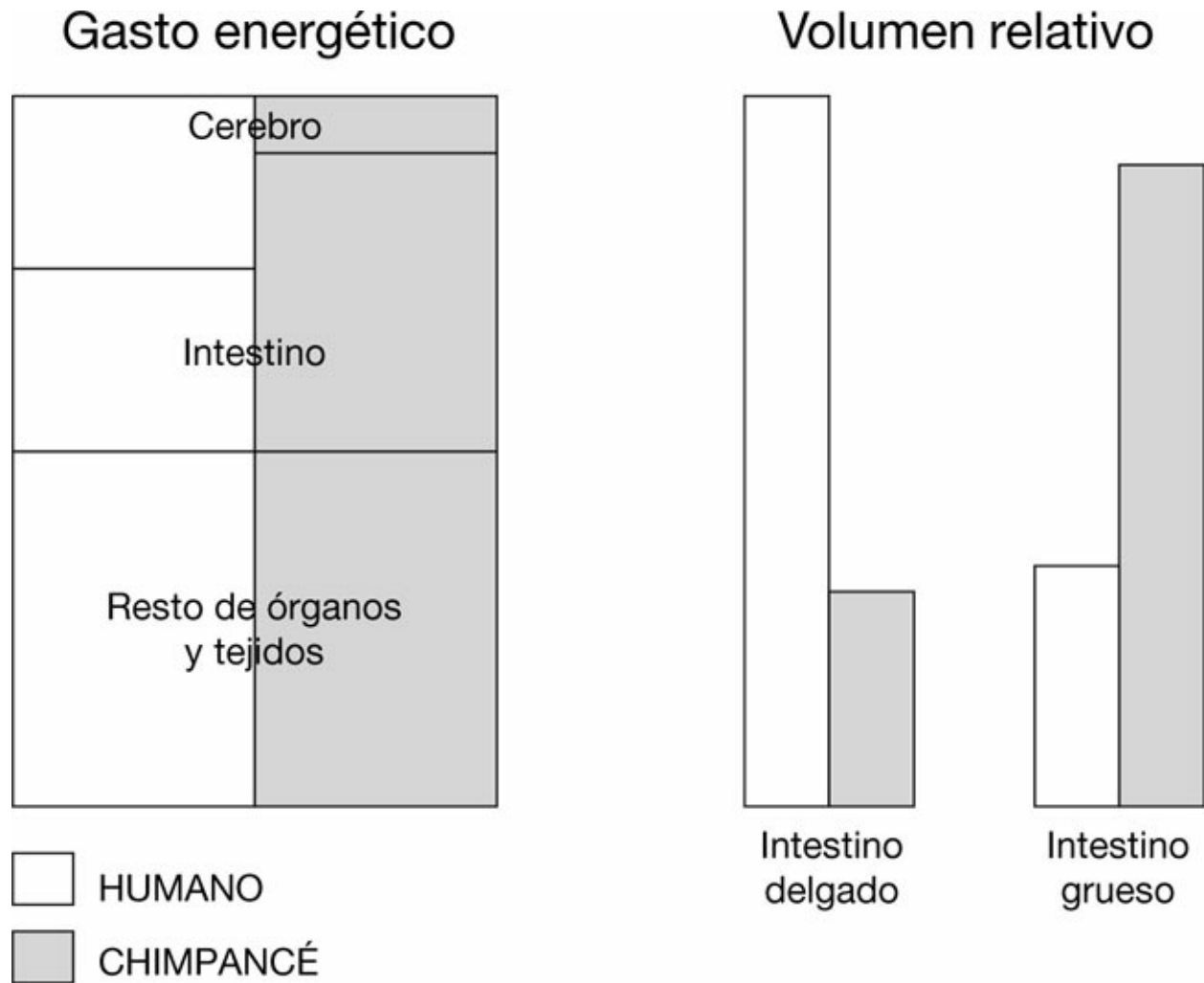


Figura 13.1. Diferencias entre seres humanos y chimpancés. A la izquierda, comparación aproximada entre el porcentaje de gasto energético del cerebro, el intestino y el resto del organismo. A la derecha se muestran las diferencias en el tamaño relativo de los intestinos delgado y grueso. Basado en datos de L. C. Aiello y J. C. K. Wells, 2002.

## LOS LADRILLOS DEL CEREBRO

Resulta evidente que el estímulo para la expansión evolutiva del cerebro obedeció a diversas necesidades de adaptación, como puede ser el incremento de la complejidad social de los grupos de homínidos y de sus relaciones interpersonales. Estas y otras muchas razones fueron la clave para que la selección natural incrementara esa prodigiosa construcción que es el cerebro

humano. Pero para ampliar cualquier edificio se necesita, además de un estímulo para hacerlo, los ladrillos con los que sostenerlo y la energía con la que mantenerlo funcionando.

La evolución rápida del cerebro no solo requirió alimentos de una elevada densidad energética y abundantes proteínas, vitaminas y minerales, sino que necesitó de otro elemento fundamental: un aporte adecuado de ácidos grasos poliinsaturados de largas cadenas, que son los componentes fundamentales de las membranas de las neuronas, las células que hacen funcionar nuestro cerebro. Por esa razón es el segundo órgano con mayor contenido en grasa, después del tejido adiposo: el sesenta por ciento del peso seco del cerebro son fosfolípidos con ácidos grasos poliinsaturados.

El cerebro humano contiene seiscientos gramos de estos lípidos tan especiales, imprescindibles para su función. Entre esos lípidos destacan los ácidos grasos araquidónico (AA, 20:4  $\omega$ -6) y docosahexaenoico (DHA, 22:6  $\omega$ -3); entre los dos constituyen el noventa por ciento de todos los ácidos grasos poliinsaturados de larga cadena en el cerebro humano y en el del resto de los mamíferos. El ácido graso  $\omega$ -3 DHA (omega 3) es el más abundante y de mayor significación funcional en el cerebro. Se ha estimado que su contenido total en el cerebro humano es de 5 gramos (aproximadamente un 1,3 por ciento del peso seco del órgano). Una buena provisión de estos ácidos grasos es tan importante que cualquier deficiencia dentro del útero o durante la infancia puede producir fallos en el desarrollo cerebral.

Nuestro organismo es incapaz de sintetizar en el hígado suficiente cantidad de estos ácidos grasos, por lo que tiene que conseguirlos mediante la alimentación. Estos ácidos grasos son abundantes en los animales y en especial en los de origen acuático (peces, moluscos, crustáceos). Por ello, algunos autores consideran que la evolución del cerebro no pudo ocurrir en cualquier parte del mundo, sino que requirió un hábitat donde existiera una abundancia de estos: un entorno acuático. El entorno geográfico del este de África, donde evolucionaron nuestros ancestros, proporcionó una fuente única nutricional, abundante de estos ácidos grasos esenciales para el desarrollo cerebral. Esta es otra de las circunstancias extraordinarias que favoreció nuestra evolución.

Las evidencias fósiles indican que el género *Homo* surgió en un entorno ecológico único, como es el formado por los numerosos lagos que llenan las depresiones del valle del Rift a lo largo de toda la parte oriental de África. En conjunto y desde un punto de vista geológico, el área geográfica formada por el mar Rojo, el golfo de Adén y los grandes lagos forma lo que en geología se conoce como «océano fallido». Muchos de estos lagos son alcalinos debido al intenso vulcanismo de la zona. Son abundantes en peces, moluscos y crustáceos, que tienen proporciones de lípidos poliinsaturados de larga cadena muy similares a los que componen el cerebro humano. Este entorno, en el que el género *Homo* evolucionó durante al menos dos millones de años, proporcionó a nuestros ancestros una excelente fuente de proteínas de elevada calidad biológica y de ácidos grasos poliinsaturados de larga cadena, una combinación ideal para permitir que el cerebro creciera. Esta es otra de las razones en la que se apoyan algunos para sugerir que nuestros antecesores se adaptaron durante algunos cientos de miles de años a un entorno litoral, posiblemente una vida lacustre, en ese «océano fallido» de los grandes lagos africanos y que nuestra abundante capa de grasa subcutánea es la prueba de esta circunstancia en nuestra evolución.

Estos alimentos acuáticos completaban la carroña (incierto) o la caza (casi imposible sin armas). Durante cientos de miles de años, los homínidos evolucionaron en este entorno entre la sabana ardiente y las extensiones interminables de aguas someras, por las que vagaban los clanes de nuestros antepasados chapoteando a lo largo de kilómetros en busca de alimento. Este hábitat único no solo garantizó los nutrientes imprescindibles para el desarrollo del cerebro, sino que aceleró numerosos cambios evolutivos que confluían en el *Homo sapiens*. La primera persona en alertar sobre esta etapa acuática de la evolución humana fue una periodista galesa, Elaine Morgan, quien publicó en 1982 su hipótesis en un polémico libro titulado *The aquatic ape* (El simio acuático).

LAS BUENAS GRASAS

Los seres humanos hemos heredado la necesidad de incluir en nuestra dieta una adecuada proporción de grasas poliinsaturadas, sobre todo aquellas que contienen ácidos grasos omega 3. Esto no solo es importante para el desarrollo y mantenimiento de la función de nuestro cerebro, sino que estas grasas ejercen efectos beneficiosos en la prevención y el tratamiento de numerosos problemas de salud que nos afectan en las sociedades sedentarias y opulentas en las que vivimos, como alteraciones inflamatorias y autoinmunitarias, síndrome metabólico, obesidad, aterosclerosis, enfermedades cardiovasculares, trastornos mentales degenerativos y cáncer.

A lo largo de nuestra evolución, el organismo ha desarrollado un requerimiento muy específico respecto a las grasas poliinsaturadas que determina nuestra salud y nuestro desarrollo cerebral. El efecto saludable de estas se debe a que son precursoras de unos agentes muy potentes: prostaglandinas, prostaciclina, tromboxanos y leucotrienos. ¡Vaya nombres! Son moléculas defensivas muy potentes (algunas de acciones contrapuestas) y que necesitan estar presentes en el organismo en proporciones adecuadas para proporcionarnos salud.

Las grasas omega 3 son antiinflamatorias y anticoagulantes y regulan los niveles de colesterol. A causa de estas propiedades, son muy beneficiosas como protectores cardiovasculares, para el mejor funcionamiento de las células nerviosas y para prevenir los trastornos cerebrales. Estas grasas abundan en los pescados azules, en el hígado de los pescados blancos como el bacalao, en los aceites de semillas oleaginosas, como el lino y en frutos secos como las nueces. Están presentes en menor cantidad en la mayor parte de los vegetales. Las grasas omega 6 son proinflamatorias y procoagulantes y también forman parte de la estructura de las membranas celulares. Pero hay que evitar consumirlas en exceso. Abundan en aceites de semillas como el maíz y el girasol, en los cereales refinados, en las pepitas de uva y en las pipas de girasol, en todas las carnes de animales criados con piensos, en la piel de las aves y en los huevos.

Numerosos estudios han demostrado que lo más importante para nuestra salud es mantener una adecuada proporción de grasas omega 6 y omega 3 en nuestra alimentación: lo ideal sería una relación de 5/1, respectivamente, que es la proporción de estas grasas en la leche materna humana. Los japoneses, la

población con mayor esperanza de vida, consumen una proporción de 4/1, mientras que la proporción en la dieta de Estados Unidos es de 16/1. Para tener un equilibrio correcto hay que consumir todos los días algo de pescado, sobre todo azul, alimentos vegetales en cada una de las cinco comidas y dos o tres nueces por la noche, reducir los cereales refinados, las carnes y los huevos, así como cocinar con aceite de oliva. Pueden obtener información más detallada sobre estos asuntos en mi libro *Comer sano para vivir más y mejor* (Destino, 2010).

## LA REFRIGERACIÓN DEL CEREBRO

Una cuestión relacionada con este asunto de la energética y el cerebro es el problema de la regulación de la temperatura corporal. Como en cualquier otro sistema mecánico, en nuestro organismo una parte de la energía consumida se disipa en forma de calor que hay que eliminar para mantener constante nuestra temperatura interior.

Cuando nuestros antecesores abandonaron la selva húmeda y umbría y colonizaron la llanura tuvieron que defenderse del calor. Ya no les era de utilidad el pelaje grueso y por eso se fueron seleccionando aquellos individuos en los que el vello era más fino y más ralo. La selección natural llenó la piel de estos homínidos, colonizadores de la sabana, de millones de glándulas que producían sudor, el cual, al evaporarse sobre la epidermis desnuda, enfriaba el cuerpo. En el mundo de los primates no se da nada parecido a la capacidad de transpiración del ser humano. En los animales con pelo, el sudor no es tan eficaz como elemento refrigerante. La bipedestación permitía a nuestros antepasados trotar a lo largo de grandes distancias sobre la ardiente sabana, y eso fue posible porque fuimos capaces de mantener fresco el cuerpo mediante la sudoración y porque no estábamos cubiertos por una piel gruesa. Otros mamíferos con pelo se refrigeran jadeando, como hacen los perros: sacan al exterior la lengua empapada en saliva y la evaporación de esta es lo que les enfría. Los elefantes hacen circular la sangre a través de sus grandes orejas, que abanicen continuamente.

La piel humana y la sudoración evolucionaron a la par. La selección natural favoreció a aquellos individuos que tenían desarrollados estos mecanismos y que por ello estaban capacitados para recorrer largas distancias, para cazar o para buscar carroña, manteniendo un trotecillo lento durante largo tiempo sin sucumbir a la hipertermia. Esta capacidad es la que hoy permite a millones de personas en todo el mundo el disfrute de las carreras de fondo en largas distancias, como el maratón o incluso otras de mayores distancias. No existe ningún animal que pueda mantener un trote constante durante tanto tiempo como un ser humano. Esta característica es el fundamento de la llamada «caza por persistencia», que fue uno de los métodos que nuestros ancestros debieron de utilizar para conseguir comida. En YouTube puede disfrutarse de un maravilloso vídeo de David Attenborough sobre este asunto.

Nuestros ancestros desarrollaron otra facultad: la gran capacidad de retener sodio y agua en el riñón. El sodio es un elemento indispensable para la vida, pero que no abunda en los alimentos. Esta capacidad de ahorrarlo les confería una gran ventaja para sobrevivir en una sabana arbustiva con una baja ingesta de sodio y una elevada pérdida del mismo y de agua por la sudoración. En algunos de nuestros ancestros surgieron algunas mutaciones favorables que, en conjunto, podemos denominar «genotipo ahorrador de sodio». Esto supuso una gran ventaja de supervivencia para nuestros ancestros. Pero hoy, en las condiciones de vida de las sociedades opulentas en las que vivimos, el exceso de ingestión de sodio es una de las causas de la gran tasa de hipertensión arterial que padecemos (más del cuarenta por ciento de la población).

Es interesante considerar la relación que pudo existir entre la termorregulación y el desarrollo del cerebro a la luz de la llamada «teoría del radiador», enunciada por D. Falk. Este científico parte de la premisa de que cualquier especie que cambia su postura y modo de locomoción debe desarrollar transformaciones en su sistema circulatorio a causa del efecto que se produce en el flujo y en la presión de la sangre. Nuestro cerebro es muy sensible al aporte sanguíneo, no solo porque requiere una provisión continua de combustibles y oxígeno, sino porque necesita refrigerarse a causa de la elevada energía que consume y al hecho de estar encerrado en una hermética caja de hueso.

La bipedestación y el aumento del tamaño del cerebro tuvieron que ir acompañados de un incremento paralelo de la vascularización cerebral. Y, en efecto, los cráneos fósiles muestran que la bipedestación en todos los primeros homínidos se acompañó de modificaciones en el sistema circulatorio. Los cambios vasculares en el cráneo de estos homínidos se insinúan en el comienzo de una red de pequeñas venas, cuyas improntas quedaron grabadas en la cara interna de los cráneos fósiles. Estas redes vasculares son las que en nuestra especie funcionan como un radiador de coche que enfría los cerebros, tan sensibles al calor durante el ejercicio intenso.

Los registros fósiles muestran que, hace dos millones de años, esta red venosa cerebral comenzó a aumentar drásticamente en el género *Homo*, a la vez que lo hacía el tamaño del cerebro y, por lo tanto, el consumo de energía. De acuerdo con la teoría del radiador, cuando la red de venas refrigerantes comenzó a funcionar con eficacia, el cerebro pudo crecer sin miedo al sobrecalentamiento.

Este conjunto de facultades ha dotado a los seres humanos de una ventaja única que no compartimos con ningún otro mamífero: la capacidad de trotar durante horas sin detenernos. Es el llamado «genotipo motor» que, en mayor o menor medida, hemos heredado todos los humanos. Muchos de los que somos aficionados a correr largas distancias, como los 42 kilómetros (y pico) de una carrera de maratón, lo hemos comprobado sobre nuestras piernas, en nuestro cerebro y con nuestro corazón. Los interesados pueden consultar estos aspectos del trote y la salud en mi libro *Razones para correr* (Ediciones B, 2015).

## LA DOMESTICACIÓN DEL FUEGO

Darwin ya estableció en sus escritos que el fuego fue el gran descubrimiento de la humanidad, seguido del lenguaje. Es indudable que la domesticación del fuego abrió a nuestros ancestros la posibilidad de disponer de energía extrasomática (fuera de su cuerpo) que podían controlar a su voluntad para mejorar el cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Toda la tecnología desarrollada por los seres humanos, desde el cocinado del pernil de un ciervo



hasta la cerámica, el trabajo de los metales, el motor de combustión o la industria nuclear, tiene su origen en el dominio del fuego, que también permitió el desarrollo de la cultura y de la historia.

Es muy difícil datar la primera vez que se logró dominar el fuego. Los textos especializados proponen numerosas fechas que varían en cientos de miles de años. Pero lo que resulta evidente es que su utilización por los homínidos que nos precedieron pasó por varias etapas y, por ello, se le puede atribuir una gran antigüedad.

En primer lugar, tuvo que haber un uso oportunista de incendios provocados por rayos o por volcanes. Numerosos animales predadores y algunos simios, como los chimpancés, se benefician de estas catástrofes naturales para devorar las presas que han sido pasto de las llamas. Este pudo ser el primer uso del fuego de los homínidos primitivos desde hace millones de años. Les permitía la ventaja de comida abundante y fácil de obtener con el plus del cocinado natural, lo que favorecía la digestión del alimento.

La segunda etapa fue la conservación del fuego. Es posible que el *Homo ergaster*, con ya casi 1.000 cm<sup>3</sup> de cerebro, fuese capaz de recoger las brasas de un incendio natural, conservarlas en algún recipiente, como un trozo chamuscado de corteza de árbol, y llevarlas a su choza o gruta. Allí sería fácil de mantener alimentándolo con ramas. Esta utilización podría tener una antigüedad de más de un millón de años. Se han encontrado en África restos de hogares de esa datación.

La tercera etapa es más reciente, con menos de trescientos mil años. Sus protagonistas fueron los primeros representantes de *Homo sapiens* o sus inmediatos antecesores. Esta gente pasaban horas en cuclillas golpeando piedras de diversos materiales unas contra otras para elaborar lascas, cuchillos y hachas. En ese proceso saltan muchas chispas. Es posible que en alguna ocasión algunas de ellas prendieran en la hierba seca sobre la que trabajaban. Cuando esto ocurrió, algún homínido con suficiente inteligencia sacó las adecuadas conclusiones y se hizo el gran descubrimiento: la producción de fuego a voluntad y en cualquier lugar o situación. Este fuego «antropogénico» permitió cambios radicales en la dieta, modificar el entorno para el beneficio de la tribu, promover la sociabilidad en torno al hogar común y, posiblemente, dar origen a los mitos y las religiones.

Como veremos más adelante, el fuego adquirió una gran importancia en los últimos cien mil años de evolución del *Homo sapiens*. Eran tiempos de glaciación, con fríos terribles que persistían durante siglos. Los cromañones que ya poblaban Europa en aquella época, hace cuarenta mil años, no pudieron sobrevivir encerrados en sus cuevas durante días sin disponer de un buen fuego.

Pocos estudiosos reparan en el ambiente de humo en el que vivieron nuestros ancestros durante miles de años. El fuego, permanente encendido en las cuevas sin chimeneas y con las entradas tapadas por pieles de animales para detener el frío glacial, ocasionaba un ambiente casi irrespirable. Además, el humo contiene tóxicos derivados de la propia combustión de la madera. A este respecto, son interesante las investigaciones que han detectado una mutación genética presente en los seres humanos actuales que nos permite la metabolización rápida y segura de algunas de estas toxinas que contiene el humo. Esta secuencia genética no se encuentra en homínidos más antiguos, como los denisovanos y los neandertales. Fueron los cromañones sobre los que actuó la selección natural a lo largo de miles de años de glaciación para desarrollar las defensas necesarias para soportar vivir en medio del humo.

## Cómo parir y criar un cerebro grande

El otro problema que genera un cerebro grande es cómo parirlo. Sobre todo a través de una pelvis angulada por causa de la bipedestación. Comentaremos algunas de las adaptaciones que tuvieron que incorporar a su organismo nuestras antecesoras para superar este gran reto. Ello, además, nos permitirá comprender muchas de las ventajas e inconvenientes de nuestro comportamiento reproductor.

El incremento del volumen cerebral se acompañó de un aumento paralelo del tamaño del cráneo que lo alberga. En los recién nacidos humanos el tamaño de la cabeza es más de dos veces mayor que en las crías de los primates más próximos. Es evidente que la evolución no pudo emprender el brillante camino del aumento del volumen encefálico sin antes resolver la cuestión de cómo parir una cabeza de ese tamaño, con la dificultad añadida de hacerlo a través de una pelvis deformada y angulada a causa de la bipedestación.

Sobre los fósiles disponibles de nuestro antecesor *Homo ergaster*, se ha calculado que el volumen del cráneo de un recién nacido era de unos 275 cm<sup>3</sup>. La pelvis de estos ancestros era tan angulada y algo más estrecha que la pelvis del ser humano actual. Según los datos obtenidos de los fósiles disponibles, en el *Homo ergaster* el canal del parto debería ser de unos diez centímetros. Para que pudiera pasar por ese canal angulado, el cráneo del neonato del *Homo ergaster* no debería superar los 275 cm<sup>3</sup>, aproximadamente.

En proporción al resto de los primates, la gestación humana tendría que durar dieciséis meses. Pero en estas condiciones la cría tendría un volumen de cráneo de tal magnitud que el parto sería una empresa demasiado arriesgada para haber prosperado en la evolución. La selección natural eliminó a

aquellos individuos en los que la gestación duraba demasiado y en los que el tamaño del volumen craneal fetal en el momento del parto era de tal magnitud que el paso por el canal obstétrico resultaba imposible. La razón es que esto conducía inevitablemente a la muerte de la madre y del hijo; y, en consecuencia, se favoreció lo contrario.

La solución encontrada por la evolución para resolver este problema fue la de lanzar a la vida a un ser con el cerebro a medio desarrollar, y, por tanto, con un cráneo de menor tamaño que el que le correspondía. Es decir, el parto normal de una mujer es un parto prematuro a escala zoológica. Las crías de los *Homo ergaster* nacían con un elevado grado de inmadurez, casi un año antes de lo que les correspondía. Esta prematuridad de los recién nacidos generó a su vez dos problemas que resolver: en primer lugar, la necesidad de aportar la energía necesaria para completar el desarrollo del cerebro fuera del útero, sobre todo en los dos primeros años de vida, mediante la lactancia. En segundo lugar, un ser con un cerebro a medio desarrollar tarda tiempo en ser autónomo y valerse por sí mismo, por lo que requiere unos cuidados especiales y una atención constante durante varios años. Nuestros niños permanecen infantiles durante más tiempo que sus primos peludos.

#### LA LARGA INFANCIA DEPENDIENTE

La niñez es un rasgo exclusivo del género *Homo*. Un niño es aquel individuo que depende de sus progenitores o de otros individuos del clan para su alimentación o su protección. En cualquier otra especie de mamífero, incluidos los primates, las crías ya se alimentan por su cuenta a los pocos días de nacer y también pueden correr o trepar para escapar de los predadores. Los niños humanos tardan años en ser capaces de valerse por sí mismos.

La niñez está diseñada por la evolución como el período en el que se culmina el desarrollo extrauterino del cerebro: se produce el crecimiento rápido del encéfalo y de los huesos del cráneo. El tamaño cerebral pasa de los 400 cm<sup>3</sup> al nacer a más de mil en dos años. Este crecimiento se logra exclusivamente mediante el establecimiento de nuevas conexiones neuronales, ya que la dotación completa de células nerviosas se posee desde el nacimiento: nacemos con un *hardware*, que es el conjunto de elementos

estructurales que componen nuestro cerebro, que llenamos de *software*, es decir, de programas e instrucciones de funcionamiento, a lo largo de nuestra vida.

Nuestros niños se encuentran con otras limitaciones exclusivas de nuestra especie. Tienen unos dientes de leche provisionales, con una capa de esmalte más fina y raíces más cortas y delicadas que persisten durante años, mientras que en algunas especies de primates esta dentición provisional solo se mantiene durante la lactancia. Esto limita el procesamiento de alimentos duros hasta que el niño no muda esos dientes de leche. Por otra parte, nuestros hijos poseen un aparato digestivo inmaduro y corto, por lo que necesitan alimentos de fácil digestión, muy calóricos y ricos en nutrientes. Esta puede ser una razón del rechazo casi general de los niños a los alimentos vegetales y su apetencia innata hacia las proteínas y los dulces.

A lo largo de la niñez, las crías de los homínidos aprendían poco a poco a alimentarse por sí mismas. Este período de dependencia nutricional dura desde el destete hasta los siete años, aproximadamente. Los hijos de los grupos de cazadores recolectores que viven en la actualidad comienzan a conseguir comida a diferentes edades, en distintas cantidades y calidades, según la disponibilidad, la dificultad de hallarla y los peligros que conlleve lograr los alimentos. Los niños pequeños de la tribu aché de Paraguay son bastante hábiles recogiendo frutas pequeñas del suelo, pero no logran conseguir alimentos más consistentes hasta los diez años. En realidad, los vástagos de los cazadores recolectores permanecen energéticamente dependientes de individuos mayores, en cierta medida, hasta la quincena.

## LA PAREJA Y LOS CUIDADOS PARENTALES

En el entorno natural de hoy o de hace cientos de miles de años no resulta fácil criar a dos o tres hijos. Ni siquiera a uno solo. Durante mucho tiempo, un niño no puede caminar largas distancias por sí mismo y pesa demasiado para que sus padres puedan cargar con él durante las jornadas de nomadeo o de búsqueda de alimento. Las hembras de los homínidos necesitaron el compromiso afectivo de los machos para poder atender a la maternidad.

Los cuidados parentales son complementarios de la atracción de la madre por su hijo y han evolucionado simultáneamente para proporcionar a los individuos que poseen esos genes una ventaja de supervivencia. Aquellos padres o parientes a los que su genoma no les motivase para atender a la criatura no habrían tenido descendencia y, por lo tanto, esos genes de despreocupación por los niños se habrían extinguido.

Hay buenas razones para suponer que una horda promiscua como la del chimpancé nunca fue típica de los representantes del género *Homo*. La especie humana se ha adaptado a través de su fisiología a un nexo de pareja duradero. Los antropólogos manifiestan que no existe ningún grupo humano actual sin pareja matrimonial estable. En las sociedades de cazadores recolectores, la mayor parte de los matrimonios polígamos constituyen relaciones asistenciales: un hombre se ve obligado a acoger y a tomar por esposa a más de una mujer, por ejemplo, a la viuda de su hermano. La mortalidad de los machos ha sido siempre más precoz que la de las hembras, y las viudas más abundantes que los viudos, por eso, los emparejamientos altruistas y solidarios serían muy frecuentes.

Las mejores circunstancias para la reproducción de los homínidos requerirían de un número relativamente pequeño de recién nacidos, cuya supervivencia se lograría mediante una especial atención y cuidados proporcionados por todos los miembros del clan; al menos, durante la primera etapa de su desarrollo. Estas actitudes tendrían otros efectos positivos secundarios. Un mayor tiempo de dedicación al cuidado y protección de las crías, así como la permanencia de estas durante más tiempo en el seno del clan, estrecharía los lazos de unión entre los individuos del grupo y potenciaría un mayor grado de socialización. De ello se derivarían también ventajas para la caza en grupo y para la defensa común contra el ataque de los predadores.

Los genes que favorecen conductas de cooperación recíprocas, de comunicación, de protección y de cuidado hacia otros miembros del grupo, especialmente los jóvenes, siempre se seleccionaron. En este sentido, es interesante considerar que durante la niñez hay un retraso del crecimiento del cuerpo en su conjunto, excepto la cabeza y, sobre todo, un retardo en el desarrollo de los huesos de la cara, lo que proporciona un permanente aspecto

infantil, una apariencia frágil y desvalida que mueve a los adultos a su protección y los estimula a proporcionarles alimentos. Este mecanismo automático (neotenia) también lo encontramos en nuestros modelos, las aves: ningún pájaro adulto resiste el pico abierto, coloreado y gritón de un polluelo con hambre. Por eso el mantenimiento de la niñez es un rasgo evolutivo característico de nuestra especie. No olvidemos que la selección natural favorece a los individuos cuyas progenes alcanzan la edad reproductiva. Por eso, con el fin de evitar la extinción de los propios genes, resulta esencial cuidar de los más jóvenes, que son los nuevos envases que los portan.

#### EL ALTRUISMO GENÉTICO Y LA SELECCIÓN PARENTAL

El egoísmo de los genes, en el sentido que tan magistralmente describió R. Dawkins, obliga a un organismo a cometer cualquier tipo de crueldad (infanticidio) o a protagonizar el acto más heroico (una abuela que pierde la vida por salvar la de su nieto) siempre que se trate de favorecer la transmisión y la dispersión de sus propios genes.

Se conoce como altruismo toda conducta que favorece a un individuo en detrimento del que la realiza. El altruismo genético se refiere al sacrificio que hace alguien, perdiendo incluso su propia vida, para salvar los genes que porta un descendiente. Estos mecanismos evolutivos en los que no solo se tiene en cuenta al individuo, sino que también se incluyen a sus parientes, se denominan «selección familiar o parental». Un ser cooperará en el éxito reproductor de sus congéneres si los beneficios que obtiene exceden al coste. Las ganancias siempre son genéticas: el incremento del número de copias de sus propios genes en la siguiente generación, que resultan de su actividad cooperativa altruista. Así que para que el altruismo pueda evolucionar por selección natural tiene que darse el caso de que el beneficio en términos genéticos, es decir, la probabilidad de pasar genes propios a la siguiente generación a través de la familia, compense el coste que supone renunciar a dedicar ese mismo esfuerzo a fabricar sus propias copias.

El cuidado de las crías tan dependientes necesitaba la colaboración de parientes, en especial, del padre. Por eso la evolución solucionó el problema de cómo retener al macho en casa. Tres mecanismos, que solo existen en la

hembra de la especie humana, sirvieron a tal propósito: la ocultación de la fertilidad, la disponibilidad sexual permanente y el amor.

## LA OCULTACIÓN DE LA FERTILIDAD

Por una mera razón de eficacia y ahorro, todos los mamíferos (y muchos otros animales sexuados) restringen a unos días concretos y convenientes el período de fertilidad y de procreación (el celo o estro). El resto del año lo dedican a la alimentación, la lactancia y al cuidado de las crías. Con este fin, las hembras se dotan de unos mecanismos de aviso, que anuncian, a los cuatro vientos y con claridad meridiana, la breve disponibilidad para el acoplamiento sexual y para la procreación.

Cuando llega el momento del celo, las hormonas de la hipófisis, las gonadotropinas, estimulan el desarrollo del folículo ovárico, el cual, además de albergar el óvulo, produce las hormonas estrógenos, que son responsables de la aparición de todos los signos indicadores del celo: señas visuales, sonoras, olfativas, de fenómenos vasculares de vasodilatación genital, así como de un cambio del comportamiento de las hembras hacia los machos.

El período de fertilidad de las hembras de los actuales primates se anuncia de manera escandalosa mediante un despliegue de colores y tumefacciones en los genitales externos. Además, las glándulas existentes en la región genital secretan sustancias olorosas cargadas de feromonas, que son hormonas que estimulan la atracción sexual. Fuera de la época de celo, el interés por copular de la mayor parte de los animales queda en suspenso. No existen competiciones, ni luchas, ni rivalidades sexuales. En resumen, toda preocupación por la cópula se elimina de la vida ordinaria del animal una vez que termina ese período crítico y receptivo de las hembras.

Pero en la especie humana estos procesos ocurren de forma muy diferente. En primer lugar hay que destacar que la capacidad de la mujer para ser fecundada no se circunscribe a un breve período de fertilidad que tiene lugar una o dos veces al año, sino que estas son fértiles durante algunos días de cada ciclo menstrual, a lo largo de todo el año. Esa característica es compartida por las hembras del chimpancé; pero lo que da un carácter extraordinario a la sexualidad de la hembra de la especie humana con respecto



a cualquier otra, incluso a las de los primates antropomorfos, es la ocultación de la fertilidad. En la mujer este período fértil, es decir, la ovulación, no se anuncia ostensiblemente, de modo que este momento esencial para la reproducción pasa desapercibido. Los signos avisadores de la ovulación de las hembras de los homínidos, dependientes del ciclo hormonal, fueron perdiendo fuerza a lo largo de la evolución. No se sabe cuáles fueron las razones evolutivas para que los genitales de las homínidas perdieran su capacidad de hincharse de forma escandalosa durante los días de receptividad sexual, como ocurre en las simias. Podría especularse que esta ausencia pudo venir condicionada por el desplazamiento ventral de la vagina a causa de la bipedestación. En esta posición anatómica, unas vulvas hinchadas y húmedas dificultarían mucho el caminar o el sentarse; cosa que no sucede en las otras hembras de primates, que poseen una apertura vaginal claramente trasera.

#### DISPONIBILIDAD SEXUAL PERMANENTE

Resulta evidente que si no se puede saber en qué momento es fértil una hembra, la única manera de fecundarla es copular diariamente con ella, con la esperanza de dar con el día bueno. Esta lógica fracasa si consideramos que todo el sexo femenino, como regla zoológica general, rechaza al macho fuera de los períodos de celo. Por esto se sugiere que la evolución seleccionó a aquellas hembras en las que, por algunas mutaciones que tuvieron lugar posiblemente en la esfera endocrina o en los centros nerviosos hipotalámicos y límbicos, desarrollaron una tendencia a aceptar al macho en cualquier día o momento del año.

Y así adquirimos otra de las rarezas de la especie humana: la de mantener relaciones sexuales al margen de la reproducción. Se ha llegado a decir que la disponibilidad sexual ininterrumpida durante todo el año fue una auténtica revolución biológica: la más asombrosa innovación que tuvo lugar desde la aparición del sexo en la evolución biológica global. Fue otro hito achacable a la hembra de alguna de las especies de homínidos. Mediante esta función social de la sexualidad se garantizaba la reproducción y se creaban así las bases para el desarrollo de lo que luego, tras muchos cientos de miles de años de evolución, constituiría la unidad familiar.

## EL AMOR

Las hembras del género *Homo* tuvieron que desarrollar una tendencia a la formación de grupos familiares estables. Era necesario que la selección natural fomentase las conductas que tendían a una mejora del comportamiento familiar y a un reparto de los deberes entre el padre y la madre. Había que seleccionar y crear, para ello, lo que podríamos denominar «la facultad de enamorarse».

Ese patrón de comportamiento tan complejo, al que llamamos amor, se ha desarrollado como una forma de vínculo entre la pareja y, desde un punto de vista evolutivo, ha demostrado tener éxito. Las parejas o grupos familiares que criaban cooperativamente a sus crías engendraban más hijos, que sobrevivían con más facilidad y llegaban a reproducirse y transmitir en sus genes la tendencia a enamorarse, que se incrementaría en la población. No obstante, esta predisposición al emparejamiento que caracteriza hoy a los seres humanos tenía que estar fundamentada en necesidades primarias surgidas en los homínidos más antiguos.

El coito frente a frente, la piel desnuda y las manos manipulativas brindaron a los homínidos un campo mucho más amplio para el estímulo sexual, potenciando las sensaciones placenteras más allá del mero contacto entre los cuerpos. Se fue seleccionando de este modo un elaborado comportamiento precopulativo, mediante roces, presiones, caricias, así como todo un repertorio de órganos especializados en captar sensaciones, como los labios, los lóbulos de las orejas, los pezones o los órganos genitales, llenos de terminaciones nerviosas muy sensibles. A todo ello se sumó la facultad de comunicar una gran diversidad de matices a través de la expresión facial. Decenas de músculos adquirieron la responsabilidad de dotar de una infinita gama de movimientos a la carne que rodea la boca, la nariz, los ojos, las cejas y la frente.

Otro de los mecanismos que sustentan este comportamiento que llamamos instinto amoroso reside en algunos genes y en ciertos mensajeros químicos que operan en determinadas áreas cerebrales: la oxitocina y la vasopresina. Estas sustancias son neurotransmisores y también hormonas que cumplen importantes funciones aparentemente sin nada que ver con el amor. Pero estas

neurohormonas ejercen también importantes acciones en las relaciones sexuales. Cuando la oxitocina y la vasopresina se inyectan dentro del cerebro de un ratón macho se desencadena una erección. Si el cerebro es de una hembra, esta adopta la postura llamada de lordosis, que indica receptividad para la cópula. En hombres y mujeres voluntarios se produce un aumento de los niveles de oxitocina tras la masturbación.

¿Se enamora la gente cuando sus receptores de oxitocina y vasopresina se estimulan en alguna parte de sus cerebros? Cuando una persona que dice estar enamorada contempla una foto del ser amado mientras le están haciendo un escáner cerebral, ciertas partes de su cerebro brillan más que cuando mira la foto de un desconocido. Al parecer, cuando la oxitocina se une a sus receptores, se activan mecanismos en el sistema límbico, en especial una formación que se llama la amígdala medial, y se estimula la dopamina, que desencadena sensaciones de aprecio a la persona amada. A ciegas y de una forma automática y natural, nos sentimos atraídos por quienquiera que se encuentre cerca cuando los receptores de la amígdala medial se estimulan. El refuerzo reiterado de estas estimulaciones afianza los lazos y conduce al amor.

*Homo sapiens*

Hace un millón de años, algunas especies del género *Homo* ya estaban dotadas de un cerebro de más de un litro, capaz de fabricar utensilios eficaces y resolver con rapidez problemas ambientales complejos. Comenzaron a abandonar África y a colonizar Asia y Europa. ¿Cómo pudieron salir del continente donde habían evolucionado durante millones de años? ¿Cuál fue su suerte fuera de África?

Hace un millón de años solo había dos formas de salir del continente africano: a través de la península del Sinaí o, más al sur, por el estrecho de Bab el-Mandeb, en el mar Rojo. Estas dos salidas del inmenso corral africano funcionaban alternativamente: cuando la puerta norte estaba abierta, la sur se cerraba. Quien controlaba la apertura o cierre de estas vías de evacuación era el clima.

En plena glaciación, gran parte del agua estaba atrapada como hielo en los polos y sobre los continentes; había una gran sequía que transformaba el desierto en una frontera infranqueable, pero los niveles del mar eran más bajos y resultaba relativamente fácil cruzar el estrecho de Bab el-Mandeb hacia la península arábiga. Hoy este tiene más de veinte kilómetros de ancho, pero en plena glaciación, cuando el nivel del agua bajaba más de sesenta metros, no debía de ser difícil atravesarlo.

En los períodos interglaciares, el calor fundía los hielos, había más agua en la atmósfera y el nivel de los océanos era más elevado, lo que bloqueaba la salida directa hacia Arabia. Pero el calentamiento y la abundancia de lluvias hacía reverdecer el desierto y permitía recorrerlo a lo largo de ese gigantesco oasis que era el río Nilo, para abandonar África hacia Palestina por la

península del Sinaí. Se ponía en funcionamiento lo que se denomina «la bomba del Sahara». Las gentes eran «aspiradas» hacia el interior del desierto cuando este reverdecía en las fases cálidas y húmedas y, luego, expulsadas fuera de África cuando llegaban el frío y la sequía.

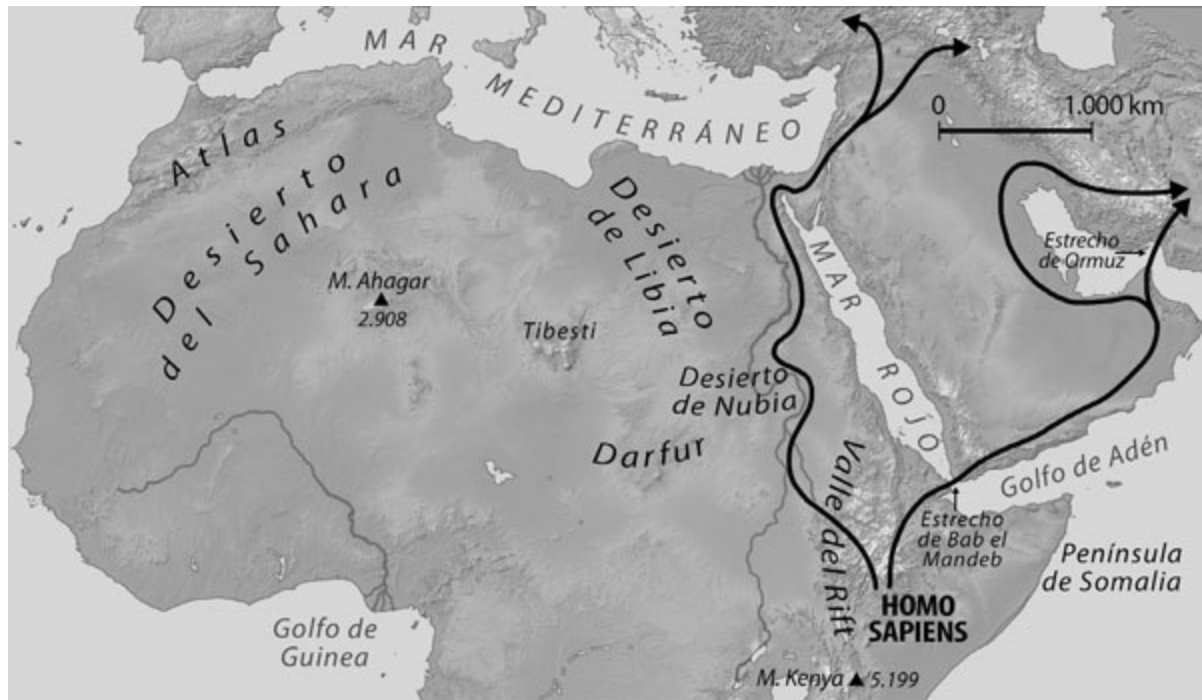


Figura 15.1. Las dos principales rutas para salir de África hace un millón de años. La ruta del sur, hacia Arabia, se abrió durante los períodos fríos y secos de las glaciaciones. La del norte, hacia el Sinaí, estaba operativa solo en los períodos cálidos y húmedos.

Estos grupos no estaban constituidos por exploradores o aventureros, sino por simples nómadas que caminaban al azar siguiendo a sus presas, buscando alimento. A veces se aposentaban en una región con abundancia de comida donde permanecían durante varias generaciones. En otras ocasiones huían con rapidez de catástrofes naturales o de inclemencias climáticas. Si consideramos la escala temporal geológica, se puede concluir que es posible llegar a todas partes aunque se camine muy despacio. Por ejemplo, tomando una movilidad mínima, de veinte kilómetros por generación, en solo veinte mil años, que es un instante en términos evolutivos, algunos individuos *Homo ergaster* podrían haber cubierto la distancia entre Kenia y China. En mucho menos tiempo ya habrían aparecido en Europa y colonizado la península ibérica.

El abandono del continente africano tuvo una gran importancia en la evolución de la especie humana e implicó cambios radicales en el estilo de vida de los homínidos. Los trópicos ofrecen una seguridad considerable en cuanto a recursos alimentarios, con frutos e insectos disponibles todo el año. Por el contrario, en las zonas templadas, el paso de las estaciones proporciona grandes variaciones en la oferta dietética, incluyendo la escasez terrible del invierno glacial.

Los homínidos del género *Homo* no colonizaron un único hábitat, sino una gran variedad. Fuera de África, encontraron distintos entornos ecológicos, diferentes plantas y animales, variados tipos de alimentación y múltiples condiciones climáticas (amplio rango de temperaturas, cambios en aridez y pluviosidad). Pudieron adaptarse a todos estos entornos tan diversos gracias a la flexibilidad adaptativa de ese órgano prodigioso que es el cerebro.

Así, con la ayuda del tiempo ilimitado, nuestros antepasados se desplazaron más allá del desierto a lugares desconocidos, al frío de los inviernos que nunca habían previsto en una existencia ecuatorial, a nevadas, a vientos terribles, a peligros de todo tipo. Pero el *Homo ergaster* y sus descendientes continuaron su peregrinación de cientos, de miles de años.

Este lento vagar llevó a sus descendientes a colonizar todo el mundo, excepto América, Australia y la mayor parte de las islas, cuyo acceso estaba impedido por miles de kilómetros de océano y barreras de hielo que, para nuestros primitivos ancestros, resultaban infranqueables. Durante esos cientos de miles de años de emigración se fueron acumulando diferencias genéticas entre los descendientes del *Homo ergaster*, lo que fue dando lugar a la aparición de nuevas especies.

Se han hallado restos de *Homo erectus* en diversas zonas de Asia, también de otras especies, como el denominado hombre de Pekín, encontrado en unas cavernas de China, o el hombre de Java, descubierto a orillas del río Solo, en Indonesia. El más evolucionado de todos (es decir, el más humano) de los homínidos asiáticos es el *Homo floresiensis*, que se desarrolló en un entorno insular que le proporcionó miles de años de aislamiento genético.

En África y Europa encontramos el *Homo antecessor*, descubierto en los yacimientos de Atapuerca (Burgos) y datado entre un millón y ochocientos mil años de antigüedad. Más moderno es el *Homo heidelbergensis*, de unos

seiscientos mil años de antigüedad, cuyos restos fósiles se han localizado en Europa. Los paleoantropólogos creen que cualquiera de estos dos homínidos pudo ser el último antecesor común a toda la especie humana. Los que salieron de África evolucionaron en Europa hasta los *Homo sapiens neanderthalensis* y se extinguieron. Los que permanecieron en África, en especial los que vivían en una zona muy concreta de Etiopía, evolucionaron hacia los *Homo sapiens sapiens*, es decir, nosotros.

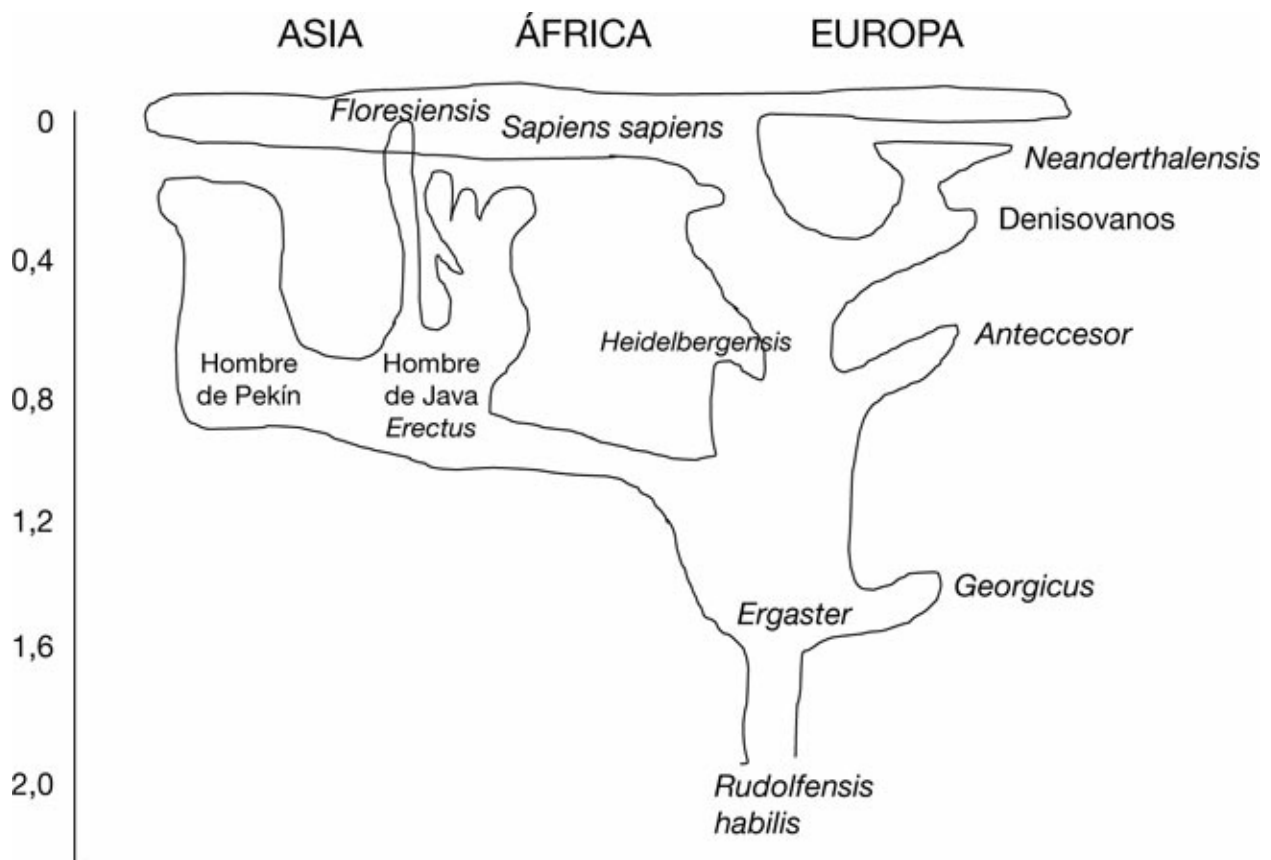


Figura 15.2. Esta es la visión actual de la evolución y diversificación en tres continentes de las principales especies de homínidos. La única especie en colonizar América fue el *Homo sapiens sapiens*, hace unos treinta mil años.

## LAS GLACIACIONES

Los estudios de paleoclimatología nos muestran que hace un millón de años se acrecentó el enfriamiento global del planeta y aumentó la magnitud de las oscilaciones del clima por causas astronómicas. Antes, los ciclos completos,

fríos y cálidos, duraban unos cuarenta mil años y coincidían con las variaciones periódicas en la inclinación del eje de la Tierra. A partir de entonces estos ciclos adquirieron una duración entre ochenta y cien mil años, lo que coincide con la duración de la excentricidad en la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Durante los miles de años que duraba la glaciación, el enfriamiento global del hemisferio norte ocasionaba bajísimas temperaturas en casi toda Europa, Asia y Norteamérica. Durante las fases de calentamiento, las temperaturas globales del planeta no superaban las temperaturas medias que se registran hoy.

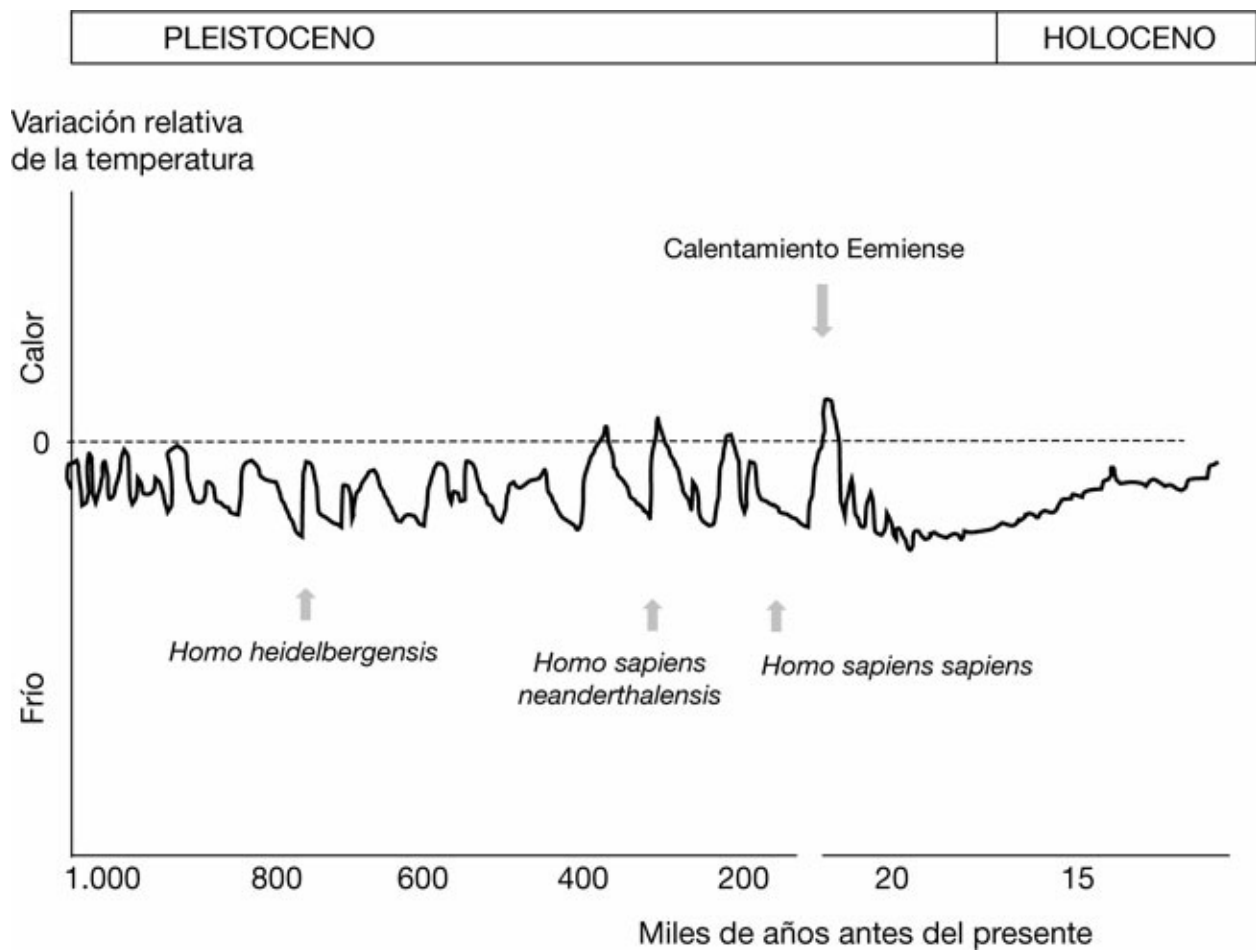


Figura 15.3. Hace un millón de años comenzó la glaciación que persistió hasta hace quince mil años. Los períodos de bonanza climática se sucedían por grandes enfriamientos del clima en oscilaciones que se repetían periódicamente.



Hace seiscientos mil años la situación de nuestros ancestros era la siguiente. Todo el planeta, excepto América, Australia y las islas de Oceanía, estaba habitado por una gran diversidad de especies de homínidos que habían evolucionado a partir de los primeros *Homo erectus* y *Homo ergaster* que habían abandonado África un millón de años atrás. Estos ancestros vivieron y evolucionaron para adaptarse a áreas geográficas y climáticas muy diferentes, aislados genéticamente del resto de los grupos de homínidos de tal forma que sus características funcionales, morfológicas y tecnológicas se diversificaron.

Estas especies ya tenían suficiente desarrollo cerebral, lo que les permitía utilizar las posibilidades de ese órgano sin igual para sobrevivir y adaptarse a los diferentes ambientes. Así, no precisaron que sus organismos evolucionaran para adaptarse a cada entorno desarrollando nuevas estructuras anatómicas o dispositivos funcionales. Los que fueron hacia el gélido norte no necesitaron que les naciera un pelaje espeso, ya que su cerebro les permitió fabricarse vestidos con pieles de animales, ni que se les desarrollaran dentaduras de carnívoros para alimentarse de carne, pues este también les facultó para fabricar filosos cuchillos de piedra con los que abrir la gruesa piel de los herbívoros y cortar sus músculos. Este órgano les proporcionó la capacidad de que en cada ocasión desarrollasen una respuesta tecnológica para solventar la dificultad sobrevenida en cada entorno o a consecuencia de cada oscilación climática.

Así, hace seiscientos mil años, nuestros ancestros eran capaces de cumplir con los imperativos de las Fuerzas de la Vida de la manera más ventajosa y rápida que se había visto hasta entonces. Pero en la mayor parte de los casos sus prototipos de cerebro no eran aún lo suficientemente eficaces. De todas las numerosas especies que surgieron de aquellos *Homo ergaster* que abandonaron el continente africano y poblaron el resto del mundo no existe ningún descendiente vivo sobre la superficie de la tierra; su destino fue la extinción.

EL *HOMO SAPIENS NEANDERTHALENSIS*

Los homínidos más conocidos y más cercanos a nosotros fueron, sin ninguna duda, los neandertales. Su nombre deriva del topónimo de la cantera del valle de Neander (Alemania) en la que se identificó el primer cráneo fósil en 1856.

El *Homo sapiens neanderthalensis* es un producto exclusivamente europeo y dominó Europa hasta hace unos treinta mil años. Eran robustos y con un cerebro incluso mayor que el nuestro, de unos 1.500 cm<sup>3</sup>. Evolucionaron a partir de los *Homo heidelbergensis* que salieron de África hace más de seiscientos mil años.

Los datos que está proporcionando el análisis del genoma de diversas muestras fósiles de neandertales (Neanderthal Genome Project) permiten sugerir una cierta actividad reproductora entre seres humanos y neandertales hace muchas decenas de miles de años. A consecuencia de este cruce, todos los seres humanos actuales portamos entre un uno y un cuatro por ciento de genes neandertales en nuestro genoma. Pero esto no justifica que hubiera un entrecruzamiento completo y habitual de ambas especies, aunque las escasas diferencias entre los genes de las dos se lo permitieran. Hay que tener en cuenta que aunque desde un aspecto genético sea posible el entrecruzamiento fértil de especies diferentes, puede que no sea ecológicamente posible. Por ejemplo, caballos y asnos, asnos y cebras o leones y tigres tienen parecidos genéticos capaces de permitir un cruce exitoso. Pero esto solo ocurre bajo la mano del hombre, en cautividad, nunca sucedería en condiciones naturales de vida.

En el año 2016 se pudo extraer ADN de homínidos fósiles de la Sima de los Huesos, de Atapuerca (España), en muchos aspectos parecidos a los neandertales (*Homo heidelbergensis*). Los datos retrasaron la separación entre los linajes de neandertales y humanos hasta hace unos quinientos mil años. Mayor antigüedad que las estimaciones por métodos clásicos realizadas hasta la fecha (unos trescientos mil años). Según estos datos, resulta difícil pensar en un cruce entre seres humanos arcaicos y neandertales, más bien sugieren que el pequeño intercambio de genes se debió realizar hace varios cientos de miles de años; cuando ambas especies comenzaban a separarse.

Los neandertales llegaron a extenderse por toda Eurasia, desde la península ibérica hasta Siberia. Tenían una cultura compleja y una tecnología más sofisticada que sus predecesores; aunque muy inferior a la capacidad

tecnológica de los cromañones, los seres humanos que fueron sus contemporáneos. Lejos de la imagen de brutos carnívoros, tenemos pruebas de que su existencia era parecida a la de los actuales cazadores recolectores. Su dieta se componía de cualquier cosa que se pudiera comer. A través de los datos arqueológicos se ha podido deducir que eran relativamente sofisticados, formaban grupos o tribus de pequeño tamaño y puede que enterraran a sus muertos, pero se duda de que tuvieran capacidad para las más altas funciones cerebrales que hoy caracterizan a los seres humanos.

Los neandertales, a pesar de su fortaleza física, tenían muchas limitaciones en comparación a los cromañones. Por ejemplo, la estructura ósea de su articulación del hombro muestra que no podían arrojar una lanza a gran distancia a causa de su dificultad para llevar hacia atrás el brazo elevado para tomar impulso. Solo podían usarla clavándola en la presa o en el enemigo sin soltarla. Los cromañones, por el contrario, sí podían enviar con precisión una lanza ligera a varios metros de distancia.

Los neandertales, en contra de lo que antes se creía, no estaban muy bien adaptados al frío. Su cerebro no poseía aún la suficiente complejidad para enfrentarse con éxito a las condiciones que reinaban en Europa durante los períodos más fríos de las oscilaciones climáticas. La prueba es que la datación de los fósiles que se han hallado en asentamientos muy al norte coincide con las fases más cálidas. Cuando el ciclo climático iniciaba un nuevo descenso hacia una nueva glaciación, los neandertales debían desplazarse siglo a siglo hacia el sur. Sus últimos representantes, de unos treinta mil años de antigüedad, es decir, en plena glaciación, se han encontrado en cuevas de Gibraltar.

La inestabilidad meteorológica, que forzaba la adaptación o extinción de especies animales y vegetales por toda Europa, acabó por reducir mucho el número de individuos, que se fragmentaron en pequeños grupos con pocas posibilidades de supervivencia. No se puede descartar que la competencia con los seres humanos arcaicos, con los que convivieron durante algún tiempo en Europa, tuviera alguna responsabilidad en su rápida extinción; sin descartar que fueran considerados como caza fácil por nuestros antecesores. Hay quien incluso señala ese momento como la primera manifestación de este impulso genocida y exterminador que ha caracterizado siempre a la especie humana. El

profesor de historia y escritor israelí Harari señala que la desaparición de los neandertales pudo ser la primera y más importante operación de limpieza étnica de la historia.

## EL CEREBRO HUMANO Y DEL NEANDERTAL

Las diferencias entre los cerebros de los cromañones y de los neandertales constituyen la razón que justifica el éxito de nuestra especie: los cerebros de los *Homo sapiens sapiens* eran más versátiles y estaban mejor capacitados para cumplir con las Fuerzas de la Vida en los ambientes tan difíciles en los que les tocó vivir.

El cerebro es un tejido blando que no fosiliza. Sin embargo, debido a su apretado embalaje dentro del cráneo, el encéfalo produce algunas impresiones en la superficie interna de estos: son las huellas óseas de las circunvoluciones y de los surcos cerebrales que, a veces, permiten a los paleoneurólogos inferir de estos endomoldes algunos detalles de la anatomía cerebral de su propietario.

La capacidad craneal de los neandertales era, en promedio, de 1.450 cm<sup>3</sup>; esto es, más grande que la de los humanos modernos. Hay que tener en cuenta que gran parte del volumen de la corteza cerebral y de otras partes del cerebro está en función de la masa muscular, por eso los homínidos más robustos deberían tener mayor cantidad de neuronas para controlar ese mayor número de células musculares. El menor volumen cerebral de los humanos modernos se explica por dos razones. Por una parte, la menor masa muscular y el menor desarrollo óseo de los cromañones exigían un número inferior de neuronas motoras. Por otra, se produjo un aumento de la complejidad de los circuitos cerebrales y una mayor eficiencia energética y de plasticidad del cerebro humano en comparación con la de los neandertales, de modo que se pudo albergar una mayor potencia computacional en un espacio más pequeño. Recuerde el volumen de cualquier ordenador de hace veinte años y sus limitadas prestaciones en comparación con el tamaño y las posibilidades de los pequeños y modernos portátiles. Estas modificaciones supusieron una

enorme ventaja para nuestra especie y favorecieron el desarrollo de las funciones cerebrales que subyacen a los procesos cognitivos avanzados que los cerebros humanos son capaces de realizar.

Dos detalles anatómicos diferencian sin ninguna duda el cráneo de un neandertal de otro de un cromañón. Los primeros tienen un gran abultamiento o «moño» occipital del que carecemos los seres humanos. Recientemente se ha aclarado la razón de esta enorme protuberancia del cráneo neandertal en la parte posterior, en la zona correspondiente al lóbulo occipital. Esta es la parte del cerebro dedicada al control de la visión. Los neandertales tenían los ojos más grandes que nosotros, según se deduce del mayor tamaño de las órbitas oculares en los cráneos fósiles. Esto sugiere que poseían una mayor capacidad visual en comparación con la nuestra. Se ha sugerido que esto fue debido a su evolución en zonas del norte, donde la intensidad de luz normalmente era inferior a la de las zonas tropicales donde evolucionaron nuestros antecesores.

Ya hemos comentado la gran relación que existe entre el cerebro y la organización social. Gran parte de las capacidades de relación entre individuos se localizan en las áreas frontales del cerebro. El lóbulo frontal está muy desarrollado en los seres humanos y menos en los neandertales; ellos poseen una frente inclinada que surge a partir del engrosamiento óseo supraciliar, los llamados «toros orbitarios», de los que también nosotros carecemos. Estas diferencias tuvieron importantes implicaciones para la vida y supervivencia de los neandertales. Sus comunidades tenían un tamaño más pequeño, su comunicabilidad entre tribus y su capacidad exploradora de nuevos asentamientos era mucho menor, y también lo era la capacidad para adquirir y conservar innovaciones tecnológicas. Esto los hacía más frágiles frente a las fluctuaciones climáticas y demográficas.

## HERRAMIENTAS Y OBJETOS ARTÍSTICOS DE LOS HOMÍNIDOS

Existe un gran debate en torno al origen y antigüedad del sentimiento artístico, una de las manifestaciones más características y exclusivas de la humanidad. Es posible encontrar en la naturaleza construcciones que podríamos calificar de artísticas, como algunos nidos de aves, telas de araña o colmenas. Algunos chimpancés en cautividad se divierten pintando con los dedos o con pinceles

sobre lienzos: uno del zoo de Londres llegó a vender varios de sus cuadros a buen precio. Pero esta pretendida manifestación artística solo ocurre en cautividad, cuando a un animal aburrido de estar encerrado se le proporcionan pinturas y pinceles. No hay constancia de que los chimpancés se dediquen espontáneamente a decorar los árboles y las rocas en su medio natural usando pigmentos extraídos del barro o de las plantas.

La primera manifestación de innovación en los homínidos corresponde a lo que se denomina manufactura achelense. Se le atribuye una antigüedad de seiscientos mil años, es decir al *Homo erectus* y al *Homo heidelbergensis*. Su característica esencial fue la técnica del bifaz para la elaboración de hachas de mano y cuchillas. La innovación consistía en trabajar la piedra por ambos lados, dotándola de dos filos simétricos. Estos utensilios persistieron hasta hace unos doscientos mil años, cuando los neandertales desarrollaron unas técnicas más sofisticadas para elaborar armas y herramientas que se denomina manufactura musteriense. Pero aún estaban lejos de las producciones, incluso, de los *Homo sapiens sapiens* más arcaicos.

Un dicho clásico en paleoantropología proclama que «la ausencia de evidencia no es evidencia de ausencia». Hasta hace muy poco apenas se tenían noticias acerca del arte producido por los neandertales. Se habían estudiado con detalle, por profesionales, más de ochenta centros arqueológicos que ocuparon los neandertales por toda Europa y Asia desde hace trescientos mil hasta hace treinta mil años. Y el único hallazgo reseñable había sido el uso de colorantes de manganeso, posiblemente para decoración corporal, encontrado en más de setenta lugares de Europa, y piedras de ocre rojo y amarillo, en menor número. Sobre muchas de estas piedras había dibujadas toscas líneas onduladas o en zigzag y rectas paralelas. La única representación mural atribuible a los neandertales se había encontrado en una cueva de Gibraltar. Se trata de un grabado de cuarenta mil años de antigüedad compuesto por varias toscas líneas entrecruzadas grabadas en la roca. Pero se acaba de publicar un estudio (*Science*, 2018) que puede dar un vuelco significativo respecto a las capacidades artísticas de los neandertales. Este estudio se ha realizado en tres lugares de la península Ibérica: las cuevas de Ardales en Málaga, La Pasiega en Cantabria y Maltravieso en Cáceres. Mediante la aplicación de técnicas isotópicas novedosas, como la datación de uranio-torio, se ha demostrado que

las pinturas rupestres encontradas en estos tres lugares de España tienen más de 64.000 años de antigüedad. Estas pinturas son las pinturas rupestres más antiguas del mundo. Es importante destacar que son 20.000 años anteriores a la llegada de los humanos modernos a Europa, lo que sugiere un indudable origen neanderthal. Estas representaciones de arte rupestre comprenden principalmente pinturas rojas y negras e incluyen representaciones esquemáticas de varios animales, signos lineales, formas geométricas, plantillas de manos y huellas de manos. Por lo tanto, estos recientes hallazgos demuestran que los neandertales poseían un comportamiento simbólico mucho más rico de lo que se suponía anteriormente.

Las más antiguas expresiones artísticas de *Homo sapiens sapiens* arcaico se han encontrado en Pinnacle Point, en la costa sur de Sudáfrica. Se trata de una ocupación que duró entre ciento setenta mil y cuarenta mil años. Allí se han encontrado muestras de las representaciones simbólicas más precoces en piedras tratadas con calor para luego modelarlas para hacer útiles líticos y piedras raspadas, pulidas y decoradas con líneas. También son antiguas las representaciones artísticas encontradas en la cueva de Blombos, en Sudáfrica, datadas entre ciento cuarenta mil y setenta mil años. Hay piedras coloreadas con diseños abstractos y conchas de caracoles marinos agujereadas para hacer pendientes o collares.

Hace unos cien mil años comenzó a manifestarse la capacidad de comunicación mediante el uso de símbolos (rayado y punteado de objetos) y la utilización de pinturas para decorar piezas o para ritos funerarios. La comunicación simbólica está relacionada con el almacenamiento y transmisión de la información. El lenguaje es una parte esencial (y quizá única) de la comunicación de los *Homo sapiens sapiens*. No hay fósiles de palabras o de sintaxis, pero sí de signos, aunque estos fueran al principio muy elementales. Fragmentos y restos de pigmentos sugieren su empleo en las primeras formas de comunicación. También adornos personales, collares de cuentas, colmillos y fragmentos de huesos, posiblemente servían para indicar estatus social, autoridad, sexo o edad. La llamada revolución paleolítica estaba en camino.

## El protagonismo de Eva

La recta final de la evolución de la especie humana exigió nuevos cambios en los mecanismos de reproducción. Una vez más, el organismo de la hembra vino en ayuda de nuestra especie. Eva incorporó a su fisiología algunas características que fueron esenciales para cumplir con las Fuerzas de la Vida y para transitar este último y dificultoso tramo de nuestra evolución.

Nosotros nos hicimos humanos gracias, fundamentalmente, a las adaptaciones que se sucedieron en el organismo de la hembra de nuestra especie. Ya hemos visto que sin las modificaciones en la fisiología del embarazo y del parto, sin los mecanismos hormonales que se desarrollaron para afianzar la cooperación parenteral del macho en el cuidado de la prole (la ocultación de la fertilidad, la disponibilidad sexual constante y el amor) no se hubiera desarrollado nuestro gran cerebro. Con un poco de imaginación podemos pintar una escena característica de nuestro pasado.

Vemos a una hembra de *Homo sapiens* arcaico dentro de una cueva en plena era glacial, con 20 °C bajo cero en el exterior, preñada de seis meses, con un niño de dos años al que aún amamanta y apenas sabe andar y otros dos a los que cuidar, uno de tres años y otro de cinco, y sin poder contar con la ayuda de las otras hembras del clan, ya que cada una de ellas está en una situación similar. Podemos añadir al cuadro algún niño enfermo, agonizante, lo que debía de ser frecuente a causa de la elevada mortalidad infantil que existía en la época. Imaginemos el viento helado que se cuele entre las pieles que apenas tapan la entrada de la cueva. Unos troncos arden, pero apenas espantan el frío intenso. El miedo aterroriza a aquellas hembras y a sus crías, ya que los



machos están ausentes, de cacería, y en cualquier momento pueden verse atacadas por una jauría de lobos hambrientos o por los terribles osos cavernarios. ¿Cómo fue posible evolucionar y sobrevivir en estas condiciones, durante miles de años? ¿Cómo resolvió la evolución que las hembras pudieran atender con éxito a tantas crías en situaciones tan difíciles?

## LA MENOPAUSIA

Uno de los logros que resolvió el problema de criar tantos niños, tan desvalidos y con un período de desarrollo tan largo fue un invento extraordinario: la evolución creó a las abuelas.

La selección natural favoreció el desarrollo de esta característica casi exclusiva de las hembras de nuestra especie: la menopausia, es decir, la supresión de la fertilidad al llegar a una edad en la cual la esperanza de vida es aún significativa. De esta forma, las mujeres se vuelven estériles de manera irreversible mucho antes de ser fisiológicamente viejas. Esta fase posreproductora de la vida, que ocurre en torno a los cincuenta años de edad, puede llegar a representar un tercio de su existencia biológica total.

En un principio, ya que la menopausia pone fin precozmente a la capacidad reproductiva de las mujeres, podría pensarse que algo así no puede ser adaptativo, ya que parece dificultar la reproducción. Pero veremos que existen al menos cinco argumentos que apoyan su valor en este aspecto:

1. La menopausia garantiza que la madre sea lo suficientemente joven para que pueda sobrevivir a la larga infancia de su hijo. El climaterio solo podría tener utilidad evolutiva cuando criar a un bebé requiere un largo período de tiempo y energía antes de que pueda ser independiente de sus padres para nutrirse y para escapar de los peligros; que es el caso de las crías humanas.

2. La menopausia evita que las madres añosas compitan con sus hijas por reproducirse. Las hembras de los homínidos que invertían sus energías y su tiempo en cuidar de sus nietos tendrían a la larga más descendientes que las mujeres que no ayudaran a sus nietos y, a cambio, parirían hijos tardíos. Es el denominado «parar pronto».

3. Las abuelas realizan una mayor contribución al acervo genético criando a sus nietos (que portan la cuarta parte de sus genes) que arriesgándose a parir hijos propios (con la mitad) a una edad en la que difícilmente podría criarlos, a causa de su largo período de desarrollo, que los deja expuestos a quedar huérfanos y perecer.

4. La menopausia reduce el riesgo de malformaciones y abortos que aumentan con el envejecimiento de la persona, lo que hace crecer la probabilidad de perder al niño o que este nazca con alteraciones genéticas. Es sabido que se produce un incremento de alteraciones cromosómicas en los óvulos de las mujeres de mayor edad. También se reducía el riesgo de mortalidad durante el parto.

5. La detención de la actividad ovárica reduce los niveles de los estrógenos circulantes y así disminuye el riesgo de transformaciones cancerosas de unas células glandulares ya envejecidas.

Es decir, la hipótesis de la abuela establece que la menopausia es una adaptación evolutiva, el resultado de una selección para permitir una larga vida posreproductiva y aumentar la inversión maternal en la progenie ya existente. Con ayuda de la abuela se pudo adelantar el destete e incrementar la probabilidad de supervivencia de los niños destetados. Al avanzarse el final de la lactancia, se permitía que la hembra volviera a ser fértil antes, por lo que se acortaba el intervalo entre nacimientos y, como consecuencia, se aumentaba el número de descendientes.

## LA EDAD DE LA MENOPAUSIA

Los que están en contra de la hipótesis de la abuela argumentan que en la prehistoria la gente se moría joven, antes de la cuarentena, y, por lo tanto, antes de que ocurriera la menopausia. Pero no es cierto que todos los homínidos murieran a edades tempranas. Algunos fósiles corresponden a huesos de individuos de edad avanzada. Por otra parte, se han estudiado numerosas tribus de cazadores recolectores que viven en la actualidad en condiciones muy similares a las que vivían nuestros antecesores del paleolítico, y aunque la esperanza de vida es muy baja en estos individuos, en torno a los cuarenta años, algunos llegan a alcanzar edades muy avanzadas,

sobre todo las mujeres. Entre los aché, cazadores recolectores de las selvas de Paraguay, casi la mitad de las féminas llegan a vivir hasta dieciocho años tras el cese de la menstruación.

La menopausia en nuestros ancestros, como en los actuales cazadores recolectores, ocurría más temprano, entre los treinta y ocho y los cuarenta años. El avance de las condiciones socioecológicas incrementa significativamente la edad de la menopausia. En las sociedades desarrolladas actuales, las mejores condiciones de vida y de alimentación han retrasado el cese menstrual definitivo hasta la cincuentena avanzada.

¿PARA QUÉ SERVÍAN LOS SOFOCOS?

Los cambios hormonales que experimentan las mujeres en la menopausia suponen una cierta virilización. Al reducirse la producción de estrógenos se produce un predominio de los andrógenos (hormonas masculinas) que toda mujer produce siempre, en pequeñas cantidades. Este proceso afecta al aspecto físico, con el endurecimiento de las facciones, el cambio en la distribución de la grasa corporal, el aumento del vello o la modificación del tono de la voz, pero también al aspecto psíquico, con una mayor agresividad. Cabe pensar que estas características fueron seleccionadas porque proporcionaban una ventaja para la supervivencia de la especie.

Es interesante considerar que las hembras menopáusicas debieron de ejercer dentro del grupo de homínidos otras funciones importantes, además de las de cuidar y alimentar a sus nietos. A causa de la mayor mortalidad del macho, que como hoy día también en aquel entonces tendría una esperanza de vida menor que las hembras, las abuelas se constituían en los individuos de más edad y de mayor experiencia del grupo. Helen Fisher las ha catalogado de «bibliotecas vivientes», ancianas sabias que habían acumulado conocimientos sobre las plantas curativas y nutritivas, sobre modos de curar heridas y de asistir en los partos. Con la menopausia, las hembras adquirían poder, ya que las tradiciones tribales se conservaban en las abuelas. Estas mujeres menopáusicas debían de asumir entonces la autoridad sobre los hogares de sus hijas, sus parejas y sus hijos. Numerosas investigaciones antropológicas

realizadas sobre tribus primitivas, por todos los rincones del planeta, muestran que en las sociedades tradicionales estudiadas la mujer posmenopáusica alcanza algún tipo de poder económico, social, político o espiritual.

Desde este punto de vista, toda esa gama de manifestaciones extrañas, como los calores y sofocos que suceden al comienzo del climaterio, serían las señales que el organismo de la hembra lanzaba al resto de los miembros de la tribu, sobre todo a los machos, para indicarles su nuevo estatus fisiológico.

## LAS TÍAS SOLTERONAS

Esta es otra adaptación de gran valor para la evolución de la especie humana, aunque no es exclusiva del *Homo sapiens sapiens*. En situaciones climáticas difíciles, nuestras antecesoras podrían lograr una mayor eficacia reproductiva gracias a la cooperación de parientes cercanos que colaboraban con ellas en el esfuerzo reproductor. Se trata del caso de las hembras colaboradoras (*Helpers at the nest* o colaboradoras en el nido), cuyo concepto ya describió A. Skutch en la década de 1930.

Se trata de un conjunto de conductas muy frecuentes en el reino animal, sobre todo en insectos sociales, en numerosas especies de aves y en algunos mamíferos monógamos. Consiste en que algunos individuos sacrifican su propia fertilidad en beneficio del grupo. Un ejemplo extremo es el de las abejas. En la colmena todas las obreras son estériles y dedican sus esfuerzos a la reproducción de la abeja reina. A estos sistemas que se basan en la supresión de la capacidad reproductiva en los colaboradores fenotípicos altruistas y que permiten la reproducción de algunos individuos privilegiados se los denomina aristogamia.

Algunos autores sostienen que en nuestro pasado evolutivo las mujeres, que tenían que soportar una larga preñez y cargar durante años con el cuidado de una prole muy dependiente, necesitaron la ayuda de hembras estériles. Sin esta colaboración, la reproducción de los homínidos, que ya poseían un elevado grado de encefalización, hubiera sido muy difícil. Recordemos la imagen que hemos dibujado al comienzo del capítulo. En estas circunstancias, la colaboración de las «tías solteronas» resultaba esencial: al no tener que soportar su propia carga reproductora, podían dedicar su tiempo y sus

esfuerzos en favor de sus hermanas fértiles. Teniendo en cuenta que la fabricación de vasijas y recipientes para transportar comida debió de ser un logro muy reciente, apenas hace ocho mil años, ¿cómo se las ingeniaban para transportar comida con la que alimentar a las hembras reproductoras que no podían abandonar el refugio en el que habitaban? Las fémimas solteronas podrían colaborar en esta tarea de la misma forma que lo hacen las abejas o las aves, aportando la comida dentro de sus propios estómagos, que regurgitaban al llegar al abrigo rocoso para alimentar a las hembras fértiles y a sus crías. Estas mujeres acompañaban a los machos en sus cacerías. Cuando la partida de caza lograba una presa, tenían que devorarla a la mayor velocidad posible, antes de que llegaran los predadores atraídos por el olor del festín. Las hembras estériles se atracarían hasta que no poder más con la carne de las presas, que luego vomitarían al llegar al refugio.

Estudios genéticos recientes han identificado diversos genes, denominados bulímicos, responsables de estas conductas altruistas. La persistencia y expresión de algunos de estos genes en mujeres actuales sería el mecanismo responsable de la bulimia. Resulta sugerente que el comportamiento de atracones repetidos y el deseo de ingerir grandes cantidades de alimentos a gran velocidad, para luego vomitarlos, que caracteriza a este trastorno y que afecta a algunas mujeres, pudiera ser una reminiscencia de este comportamiento altruista de algunas de nuestras antecesoras y que tanta importancia tuvo en el éxito de nuestra evolución.

## HAMBRE Y FERTILIDAD

El engendrar y criar a un hijo es una tarea especialmente costosa en términos energéticos para las hembras de todos los mamíferos, en especial, la de la especie humana. Por eso la reproducción está finamente ajustada a la disponibilidad de energía, de alimentos.

Es un hecho bien conocido que cuando en una mujer (o en cualquier hembra de mamífero) disminuye el porcentaje de grasa corporal por debajo de un cierto límite (menos del diez por ciento de su peso) se produce una inhibición de la ovulación y una amenorrea (ausencia de la menstruación). Esto se puede dar en situaciones fisiológicas frecuentes, como ocurre en

aquellas deportistas de élite que deben de reducir su masa grasa a un mínimo, por ejemplo, las corredoras de fondo o las gimnastas. También se observa en aquellas mujeres que pierden mucho peso debido a enfermedades o dietas extremas.

En la evolución de nuestra especie, un descenso del contenido de grasa en el organismo de una hembra siempre indica que se estaba pasando por una época de hambruna. También hoy, como consecuencia de los mecanismos desarrollados por la evolución, el organismo interpreta que si falta grasa es que se dan condiciones de alimentación deficiente y obra en consecuencia. Una de las prioridades es inhibir la reproducción en esa hembra que se encuentra en una situación metabólica comprometida.

¿Cómo detecta el organismo que las reservas grasas están casi vacías? Una de las claves es una hormona que se produce en las células del tejido adiposo: la leptina. Básica y muy esquemáticamente, vamos a considerar cómo deberían suceder las cosas en una hipotética antecesora que se vio, por circunstancias climáticas, sometida a una prolongada falta de alimentos.

Cuando las células adiposas pierden grasa dejan de liberar la hormona leptina, el pilotito rojo que indica que el depósito de combustible está vacío. La disminución de esta hormona es captada por el cerebro y activa el hipotálamo, que es la zona donde, entre otras funciones, se controla el hambre. En ausencia de leptina, el hipotálamo desencadena la sensación de hambre (¡hay que llenar los depósitos vacíos!). Si la situación persiste, además de estimular aún más las ganas de comer, el hipotálamo, a través de mecanismos bien conocidos, reduce la secreción de las hormonas gonadotrofinas LH y FSH, que son las encargadas de controlar la función de las gónadas. El descenso de estas hormonas provoca un freno de la actividad del ovario y se produce la amenorrea y la anovulación, lo que ocasiona la esterilidad. Así, la naturaleza bloquea la fertilidad de la hembra en situaciones de deficiencias energéticas. Superada la hambruna, la hembra famélica comenzará a rellenar rápidamente sus depósitos de grasa y, al crecer el tamaño de sus adipocitos, se estimulará la secreción de leptina (se apaga el pilotito al volverse a llenarse el depósito de combustible), que alertará al hipotálamo para que inhiba la

sensación de hambre. El hipotálamo volverá a estimular la secreción hipofisaria de gonadotrofinas LH y FSH, hormonas que activarán de nuevo el ciclo ovárico para que la hembra vuelva a ser fértil.

Este asunto de la grasa de la hembra y la supervivencia de la tribu de antecesores tuvo una gran importancia. Ya veremos más adelante que numerosas estatuillas paleolíticas de diosas de la fertilidad, datadas en más de treinta mil años de antigüedad, representan siluetas de mujeres voluminosas, con redondeces y gorduras muy evidentes: hace miles de años, las gordas eran las diosas.

## EL PLACER DE SENTIR HAMBRE

Los seres humanos hemos tenido que superar siglos de fríos constantes y de grandes hambrunas. Pero a lo largo de nuestra evolución fuimos acumulando en nuestra fisiología adaptaciones ventajosas para superar todos estos avatares.

Los animales ponen en marcha diversas estrategias para superar las malas condiciones climáticas y el hambre. Pero en las primeras especies humanas, a causa del cerebro que permitía sobrevivir en los más variados climas y situaciones, el mecanismo preferido fue la emigración hacia otros territorios donde encontrar condiciones más favorables de vida. Cuando en un asentamiento las cosas se ponían difíciles y faltaban los alimentos se desencadenaba una desnutrición. Durante un corto período sobrevivían a base de las reservas de grasa acumuladas, pero cuando estas se agotaban, el hambre ponía en marcha el estímulo suficiente para movilizar al grupo en busca de mejores condiciones de vida.

## CONDICIONES PARA EL ÉXITO DE UNA MIGRACIÓN

Pérdida de peso mantenido que constituye el estímulo para migrar	—————>	ADELGAZAMIENTO
Controlar los imperativos de satisfacer el hambre que distraería del objetivo final	—————>	ANOREXIA
Actividad muscular conservada y estimulada para moverse	—————>	HIPERACTIVIDAD
Autoconvencimiento de que se encuentra en perfectas condiciones para abordar la empresa	—————>	DISTORSIÓN IMAGEN CORPORAL
Determinación y eficacia en superar las dificultades de la ruta	—————>	PERFECCIONISMO
Evitar ser abandonado por el grupo	—————>	MIEDO A LA EXCLUSIÓN SOCIAL

Tabla 16.1. Las condiciones óptimas que deberían poseer nuestras antecesoras para garantizar el éxito en una migración huyendo del hambre serían las mismas que hoy día consideramos síntomas característicos de una joven con anorexia nerviosa. Según, S. Guisinger, 2003.

Durante la migración, los escasos alimentos que se recolectaban se reservaban para los guerreros, que eran los únicos que debían conservar las fuerzas para lograr resolver la situación: defendiendo de los peligros, aportando alimento con su esfuerzo cinético o encauzando una migración hacia terrenos con más abundancia de alimentos. De nuevo, una serie de adaptaciones en la fisiología de la hembra de la especie permitió la supervivencia en las peores condiciones de hambre y frío que en tantas ocasiones tuvieron que superar nuestros ancestros en sus largos nomadeos por todo el planeta.

¿ES LA ANOREXIA NERVIOSA UN RESIDUO EVOLUTIVO?

Estas adaptaciones constituyeron el fruto de pequeñas mutaciones que se fueron acumulando a lo largo de la evolución de nuestros ancestros. Esas ventajas permitían la supervivencia en las hambrunas de hace cientos de miles de años. Pero en el mundo opulento y estresante de hoy día, son la causa de esa epidemia que se denomina anorexia nerviosa y que afecta



mayoritariamente a mujeres jóvenes. Diversos estudios han identificado una serie de genes anorexigénicos, que son los que promovían las adaptaciones de supervivencia en nuestras antecesoras frente a situaciones difíciles y durante las largas migraciones. En la actualidad, muchas mujeres han heredado parte de ellos en sus genomas. Normalmente esos genes permanecen tranquilos, sin expresarse. Pero si se activan por alguna causa, en general situaciones que la joven percibe como una amenaza o por un adelgazamiento excesivo, los genes se expresan y desencadenan lo que hace miles de años era una respuesta adaptativa y hoy es una enfermedad crónica grave.

Según la teoría de la supresión reproductiva, la situación de estrés ambiental que padecían de vez en cuando nuestras antecesoras (acoso permanente de hordas de fieras, meses de condiciones climáticas durísimas con ciclones o sequías, períodos de convulsiones geológicas con terremotos y erupciones volcánicas) influía en sus centros neuroendocrinos. Se modificaban los niveles de algunas hormonas y se veían afectados el desarrollo sexual o la función reproductora. Las niñas de hoy perciben el estrés de un futuro difícil, unos estudios que creen que nunca van a superar, unas expectativas laborales inciertas, un miedo a las relaciones sociales, sobre todo con padres o con compañeros, un temor a no tener la preparación suficiente para enfrentarse a situaciones futuras como la maternidad o preocupación por no estar lo suficientemente atractivas según los patrones estéticos de moda para atraer y retener a una pareja. Los sistemas neuroendocrinos de las niñas actuales perciben todas estas situaciones de la misma forma que una de nuestras antecesoras percibía las catástrofes geológicas hace cientos de miles de años. Y sus sistemas neuroendocrinos reaccionan en consecuencia.

Hoy, cuando una joven se somete durante meses a una dieta absurda, sin control médico, su organismo pierde grasa y masa magra y entonces sus sistemas neuroendocrinos (que no son capaces de discriminar el origen de la falta de comida) interpretan que esa «hembra» está viviendo un período de privación de alimentos en el entorno y responden inhibiendo la función ovárica, como ya hemos visto, y desencadenando esa terrible alteración que es la anorexia nerviosa. Solo una pequeña proporción de hombres jóvenes desarrollan este problema.

## *Homo sapiens sapiens*

Los *Homo sapiens sapiens* arcaicos aparecieron durante el Pleistoceno, hace algo más de trescientos mil años, en algún lugar de lo que hoy es Etiopía. Desde ahí, nuestros más directos ancestros iniciaron la ocupación de todo el mundo.

Todos los seres humanos que habitamos actualmente el planeta pertenecemos a una sola especie: *Homo sapiens sapiens*. Numerosos datos de naturaleza paleoantropológica, arqueológica y genética confirman que nuestra especie surgió y evolucionó en África hace más de trescientos mil años. Los *Homo sapiens sapiens* eran cazadores recolectores y en ellos prosiguió la evolución del cerebro permitiéndoles un cumplimiento de las Fuerzas de la Vida con una gran eficacia. Su capacidad cerebral les permitió desarrollar tecnologías nunca antes vistas, ni siquiera en los neandertales.

Un fósil de ciento noventa y cinco mil años hallado en los yacimientos del río Omo, en Etiopía, muestra las características que identificamos en los seres humanos actuales, como un cráneo redondeado y un mentón que se proyecta hacia delante. Otro cráneo de ciento sesenta mil años hallado en Awash, Etiopía, también parece estar en las primeras etapas de la transición hacia el cráneo moderno. Algunas formas de transición más avanzadas se han encontrado en Laetoli, en Tanzania, que datan de hace unos ciento veinte mil años. Según los hallazgos paleoantropológicos, los primeros humanos modernos aparecieron en lo que hoy es Israel, hace unos cien mil años. No hay evidencias de la presencia de seres humanos modernos en Europa hasta hace entre sesenta mil y cuarenta mil años, a donde llegaron durante un corto

período templado en medio de la última glaciación. Recientes investigaciones han encontrado restos de seres humanos arcaicos en Marruecos, con una antigüedad de trescientos mil años.

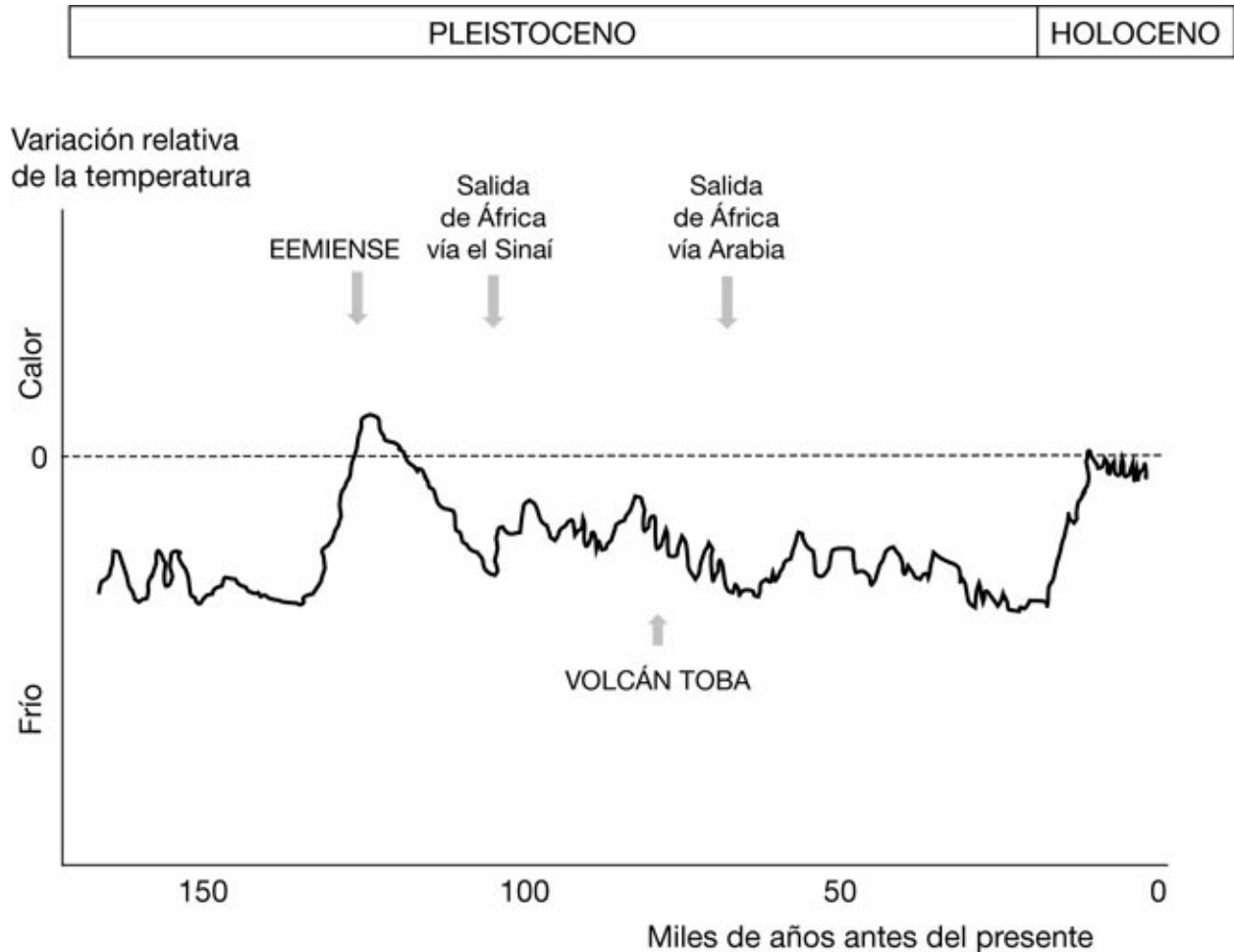


Figura 17.1. En los últimos ciento cincuenta mil años las temperaturas globales fueron inferiores a la media actual, con algunas excepciones. El Eemiense fue una etapa interglaciar, de calentamiento global, que duró entre ciento treinta mil y ciento diez mil años antes del presente. Fue la penúltima fase templada antes del Holoceno, que es el período interglaciar que disfrutamos en la actualidad.

Los datos genéticos corroboran, sin ninguna duda, nuestro origen africano. En 2005, National Geographic inició el denominado The Genographic Project, en el que se han utilizado técnicas avanzadas de análisis de ADN para intentar dilucidar dos cuestiones fundamentales referentes a la humanidad: dónde se originaron los seres humanos y cómo poblaron todo el planeta. En el estudio han participado cerca de un millón de personas de 140 países de todos los continentes. Los estudios de la variación genética sugieren

que África fue el origen ancestral de todos los humanos modernos, y que el *Homo sapiens sapiens* migró de África y sustituyó a las demás especies de *Homo* por todo el mundo. La mayor diversidad genética humana a escala global se encuentra entre los pueblos de cazadores recolectores de África, lo que sugiere su mayor antigüedad. Las variaciones genéticas se originan a lo largo del tiempo. Las poblaciones muy antiguas han tenido la oportunidad de acumular muchas mutaciones, mientras que las más recientes han dispuesto de menos tiempo para ello.

Se han utilizado sobre todo dos marcadores, como son el ADN mitocondrial, que se transmite solo a través de las madres (la Eva mitocondrial), y el ADN del cromosoma Y, característico de los padres (el Adán cromosómico). A la Eva mitocondrial, nuestra hipotética primera madre, se le ha dado una antigüedad promedio de ciento noventa mil años y el lugar en que vivió podría coincidir con el de la mayor diversidad genética mitocondrial, el cual se encuentra en África oriental. Es de notar que estos hallazgos coinciden con la evidencia fósil: los humanos modernos más antiguos se han encontrado en el este de África, en Etiopía, donde se dataron en una antigüedad de ciento noventa y cinco mil años. En cambio, el Adán cromosómico no ha producido hasta la fecha resultados tan concluyentes.

Los primeros fósiles de seres humanos modernos los encontró el geólogo Louis Lartet en 1868. Se trataba de cinco esqueletos hallados en la cueva de Cro-Magnon, cerca de Les Eyzies, en el suroeste de Francia. Tenían una antigüedad de entre veintisiete mil y veintitrés mil años, y eran de apariencia muy similar a los esqueletos de los seres humanos de la época. Los hombres tenían una estatura de entre 1,6 y 1,8 metros; sus huesos y su musculatura estaban menos desarrollados que en los neandertales. Los cromañones tenían rostros planos y pequeños, con barbillas puntiagudas y frentes amplias y elevadas. Su capacidad craneal era de unos 1.590 cm<sup>3</sup>, similar a la de los neandertales y muy superior a la de la gente de hoy. La capacidad actual de nuestro cráneo varía entre hombres y mujeres; por término medio, es de unos 1.300 cm<sup>3</sup>.

Hace un millón de años, nuestros ancestros del género *Homo* vivían en espacios abiertos, en el sur y el este de África, y se alimentaban de lo que conseguían mediante el carroñeo, la caza, la pesca y la recolección de todo tipo de vegetales. Mantenían un elevado nivel de actividad física y su alimentación era discontinua: largos períodos de hambruna interrumpidos por breves festines cuando se topaban con una provisión de alimentos, ya fueran los restos de un animal, una charca repleta de peces o un bosque de frutales. Para ellos, los principales retos eran obtener comida, procrear y cuidar de la prole, así como sobrevivir frente al ataque de predadores, los cambios climáticos bruscos, las conmociones geológicas (volcanes, terremotos) y la amenaza constante de virus, bacterias y, sobre todo, parásitos internos y externos. Como ocurre con todos los primates, nuestros ancestros vivirían en grupos pequeños, caracterizados por interrelaciones complejas de dominación y subordinación, lo que también generaría (como sucede hoy en las comunidades de simios) un elevado grado de estrés psicosocial.

Cuando se incrementó el tamaño y la complejidad del cerebro, aumentó la capacidad cognitiva, además de las habilidades técnicas (fabricación de utensilios y armas) y la resolución de problemas complejos (estrategias más eficaces de caza y organización social).

## FACILIDADES PARA EL MOVIMIENTO

A lo largo de cientos de miles de años, la evolución ha favorecido que aparecieran determinadas mutaciones que promueven una mayor eficacia muscular, sobre todo bajo las peores condiciones nutricionales. La supervivencia de nuestros ancestros exigía la posibilidad de contracciones musculares eficientes durante deficientes situaciones metabólicas. En las grandes sequías, cuando escaseaba el alimento, se incrementaba el gasto muscular necesario para encontrar la comida. En esas circunstancias se precisaba de unos músculos capaces de trabajar en condiciones de penuria energética. Nuestros ancestros habían acumulado una serie de mutaciones que promovían tales proezas y que permitían una forma de vida saludable con un elevado y constante nivel de actividad física. La condición natural de la especie humana, por lo tanto, sería el ejercicio físico continuo y de una cierta

intensidad. Ante esa práctica, los sistemas enzimáticos y transportadores que hemos adquirido a lo largo de la evolución de nuestra especie y que nos permiten obtener el alimento con eficacia (genotipo motor) funcionan a pleno rendimiento.

Es posible que, a causa de este diseño evolutivo, los seres humanos tengamos la obligación de superar un cierto umbral de actividad física diaria para mantener el normal funcionamiento de nuestro «genotipo motor». Neel denomina «síndromes por fallo de homeostasis genética» al fracaso de estos sistemas a causa del sedentarismo. Es decir, nuestra inactiva vida actual ocasiona una expresión inadecuada de estos genes motores paleolíticos. Cuando estos genes, que evolucionaron para permitir la adaptación a entornos que requerían grandes esfuerzos físicos para sobrevivir, se enfrentan al sedentarismo del ser humano moderno, se produce una merma de la capacidad de las rutas metabólicas bajo su control y de las propiedades contráctiles de los músculos. Por eso, la inactividad ocasiona a la larga una salud deficiente y una reducción de la longevidad. En cierta forma, el sedentarismo se asemeja a la pérdida de función que resultaría de silenciar la expresión de un gen.

La alimentación es inseparable del movimiento en todos los seres vivos. Para los primates y para cualquier mamífero (y por supuesto para nuestros antecesores), la obtención de alimentos está siempre unida al gasto energético muscular. Realmente, todos los animales seguimos una regla un poco absurda si la miramos bien: «gastar energía (movimiento) para conseguir energía (alimento) y conseguir energía (alimento) para gastar energía (movimiento)». Nuestros cuerpos fueron diseñados por la evolución para obtener comida mediante esfuerzo físico, ya se tratara de perseguir durante días a una presa para darle caza o caminar durante horas recolectando frutos del campo. El animal humano siempre ha seguido esta regla universal, que en la Biblia se expresa en forma de maldición: «Ganarás el pan con el sudor de tu frente». Desde un punto de vista darwiniano, esta idea indica que la supervivencia de nuestros ancestros, durante los millones de años de evolución, siempre dependió de un adecuado aprovisionamiento de alimentos, lo que siempre exigía un esfuerzo físico proporcional.

En la especie humana hoy se rompe esa regla general. Desde los albores de la civilización se ha tendido a obtener la energía de los alimentos con el menor esfuerzo muscular posible. Nuestro afán siempre ha sido inventar utensilios y artilugios ingeniosos para ahorrarnos el trabajo físico. Hoy la situación es tan extrema que el sedentarismo en las sociedades desarrolladas actúa en contra de nuestro diseño evolutivo y de nuestra salud. Por esta razón, cuando cada tarde salimos a caminar, trotar o realizar cualquier tipo de actividad física lo que estamos haciendo realmente es ponernos en paz con nuestro diseño evolutivo. Intentamos mover, aunque sea a destiempo, los músculos que no hemos utilizado para conseguir los alimentos consumidos a lo largo del día. Más información sobre las ventajas saludables de caminar o trotar se puede encontrar en mi libro *Razones para correr* (Ediciones B, 2015).

## LOS INICIOS DE LA COCINA

El cocinado de los alimentos es el hecho fundamental en la alimentación de la especie humana y en su forma de vida y de socialización. La acción de cocinar dio el último impulso a la evolución de nuestro cerebro hasta hoy.

Ya hemos avanzado que puede que en un principio los seres humanos usaran el fuego casual, prendido por un rayo, y lo conservaran encendido sin saber cómo producirlo. Posiblemente, las llamas solo se usaban como protección contra el relente de las noches de invierno y para defenderse de las fieras. Puede que el cocinado de los primeros alimentos fuera casual y se descubriera, por ejemplo, al recorrer los campos abrasados por un incendio reciente y encontrar entre las cenizas los cadáveres chamuscados de animales diversos. Al probar esta carne descubrirían que era más blanda, más fácil de cortar y de masticar con sus maltrechas dentaduras, y también de digerir. En cualquier caso, la cocina en sus inicios se circunscribía al asado de los alimentos, ya que la técnica del hervido, en agua o en aceite (fritura), requería recipientes elaborados especialmente para resistir el fuego y estos no llegarían hasta mucho tiempo después, hace apenas unos ocho mil años, como veremos

más adelante. Además, los cromañones utilizaron el humo de las fogatas en sus refugios para ahumar los restos de carne y permitir que duraran más tiempo sin corromperse.

No se sabe bien cuándo se domesticó el fuego hasta el punto de poder utilizarlo para el asado sistemático de algunos alimentos (carne, pescados, moluscos). La existencia de hogares permanentes y el dominio de las llamas parece ser una conquista del *Homo sapiens*, hace como mucho trescientos mil años. Los fósiles más antiguos que sugieren el uso culinario del fuego se encontraron en el yacimiento de Terra Amata, en la costa francesa mediterránea, datado en esa fecha. Se han hallado coprolitos (heces fósiles) que contienen granos de arena, carbón vegetal y fragmentos de conchas y moluscos. La arena y las conchas eran de esperar, ya que el yacimiento está frente a la playa, pero los restos de carbón sugieren que la comida se cocinaba antes de consumir. Posiblemente echaban las conchas cerradas entre las cenizas de la lumbre que usaban para calentarse. También se han encontrado restos de hogares y de moluscos, crustáceos y pescado, con signos de haber sido cocinados, en cuevas de la costa de Sudáfrica. Estos hallazgos han sido datados con precisión en ciento treinta mil años de antigüedad. El uso del fuego para transformar los alimentos mediante el calor resultó esencial en nuestra evolución: a partir de ese momento los seres humanos nunca dejaron de cocinar sus alimentos. Hay autores que afirman que los humanos, más que omnívoros, somos «cocinívoros» (atrevida traducción de «*coctivors*», el término que se usa en inglés).

El dominio del fuego y su utilización para el cocinado de los alimentos pudo contribuir a una mayor encefalización, ya que permitió disminuir, aún más, el tamaño del aparato digestivo. Según la hipótesis del «órgano costoso» que ya hemos descrito, una reducción de todos los elementos que intervienen en la digestión de los alimentos permitió destinar más energía para el desarrollo del cerebro.

El cocinado neutraliza muchas toxinas, como sucede con las legumbres o con algunas féculas y farináceos, como por ejemplo la mandioca, la yuca o el ñame. Estos alimentos no se pueden consumir en crudo, así que al cocinarse permiten disponer de nuevas fuentes de nutrientes.



El cocinado de los alimentos, así como su molienda y troceado, permite un menor trabajo de masticación. Un simio pasa de cuatro a siete horas al día masticando las hojas, raíces y tallos que constituyen su alimentación. Nuestra anatomía dental no ha evolucionado para desgarrar carne cruda ni para masticar tallos fibrosos durante horas. Nuestra dentadura, a consecuencia de convertirnos en cocinívoros, está diseñada para una dieta blanda, pulposa, con poca fibra, que sea fácil de masticar.

La comida cocinada aumenta la digestibilidad y hace que la alimentación sea de mayor calidad nutricional, pues se requiere menor trabajo digestivo para extraer sus nutrientes y su energía. Por ejemplo, las proteínas naturales tienen una estructura globulosa y empaquetada que hace que sean poco accesibles a las enzimas digestivas. Pero el calor despliega esas proteínas, las desnaturaliza. De esta forma, las enzimas pueden acceder mejor a ellas y su digestión y asimilación es más fácil. Se han realizado estudios muy interesantes en voluntarios que por diversas razones médicas tenían realizada una colostomía, es decir, que su intestino delgado estaba abierto hacia una bolsa colocada sobre la barriga. Se ha podido así analizar el contenido del final del intestino delgado en estos pacientes y compararlo con el del intestino grueso en personas normales, tras ingerir determinados alimentos. Los estudios demuestran que solo una fracción de las calorías de los almidones y proteínas ingeridos se absorbe directamente por el intestino delgado. El resto se pierde en el intestino grueso, donde sirve para alimentar a los millones de bacterias y bichos diversos que lo habitan. Los alimentos cocinados se digieren con más facilidad y se absorben en el intestino delgado en una mayor proporción. Con la misma cantidad de calorías ingeridas, el cuerpo consigue un treinta por ciento más de energía a partir de la avena, el almidón de patata o el trigo cocinados, en comparación con los mismos alimentos crudos. En los experimentos con animales, cuando se les administraba comida cocinada, ganaban más peso que con la misma cantidad de comida cruda. Es decir, cocinar los alimentos permite que parte del proceso digestivo se realice fuera del cuerpo, hace que la digestión sea metabólicamente más barata y que se precise un aparato digestivo de menor tamaño. Y ello contribuyó al crecimiento del cerebro.

Además, el fuego esterilizaba de bacterias y parásitos los alimentos de origen animal y hacía comestibles unas carnes, pescados y mariscos que, normalmente, ya estaban muy pasados y quizá contaminados. También el fuego mejoraba el sabor de casi todos los alimentos, excepto la fruta. Durante el cocinado se producen numerosos compuestos, como los de Maillard, que confieren al alimento sensaciones gustativas y olfativas agradables.

Ya hemos hablado de la acomodación de la especie humana al ambiente de humo constante durante las glaciaciones. Esta adaptación también confirió ventajas para metabolizar y asimilar diversos subproductos derivados del efecto del fuego sobre los alimentos. Por ejemplo, en 2011 se publicaron los resultados de un estudio que demostraba que las moléculas que se producen en el tueste del café pueden inhibir ciertas enzimas que producen algunas células tumorales, lo que explica el efecto beneficioso de esta bebida en la reducción del riesgo de padecer ciertos tipos de cánceres. Los seres humanos hemos desarrollado, por tanto, una adaptación evolutiva para tolerar los productos que se generan al someter los alimentos al calor, incluidos los ahumados. En el departamento de Fisiología de la Universidad de Extremadura estudiamos el pimentón de La Vera (Cáceres), que es un condimento que se elabora secando el pimiento con humo de la combustión de maderos de encina. Demostramos en alumnos voluntarios que el consumo moderado de pimentón de La Vera, entre otras ventajas saludables, aumentaba la expresión de los genes que regulan la síntesis de enzimas antioxidantes. Esto confería una mayor protección contra los radicales libres de oxígeno. Otro ejemplo es el de la acrilamida, una molécula que se produce en las frituras y en todos los alimentos sometidos a elevadas temperaturas. La administración de acrilamida a animales de experimentación produce cáncer. Pero no se ha demostrado ningún efecto similar en un consumo moderado y ocasional en seres humanos.

Finalmente, el cocinado de los alimentos contribuyó a incrementar la socialización que tanta importancia ha tenido en nuestra evolución biológica y cultural.

LA ÚLTIMA GLACIACIÓN

Los estudios paleoclimáticos muestran que hace unos ciento quince mil años finalizó el período cálido Eemiense y comenzó la última glaciación que ha sufrido el planeta. El desencadenante fue la excentricidad de la órbita de la Tierra que inició un nuevo ciclo de Milankovitch. Las temperaturas comenzaron a descender, las aguas frías polares y los icebergs llegaban hasta la latitud de Portugal. Los témpanos que venían del norte transportaban en su interior rocas arrastradas en la formación de los glaciares. Estas caían al fondo del mar cuando se fundía el hielo al llegar a las aguas más cálidas. El hallazgo de estas rocas en el fondo del mar, donde no tenían que estar, indica a los geólogos su transporte por medio de lo único que podía flotar en el océano hace cien mil años: los hielos. La enorme acumulación de agua helada en los polos y sobre las masas continentales redujo el nivel del mar en unos cincuenta metros respecto a los niveles actuales. A causa de las bajas temperaturas y la sequía disminuyeron las proporciones de gases invernadero (vapor de agua, CO<sub>2</sub> y metano) en la atmósfera, como indican los análisis realizados en las burbujas atrapadas en hielo fósil de Groenlandia y la Antártida. El enfriamiento no era constante, sino sometido a oscilaciones. Había períodos breves de agudización del frío que duraban uno o dos mil años (estadales) y se intercalaban breves fases de calentamiento brusco, de mil a mil quinientos años de duración (interestadales).

En una primera oleada, los *Homo sapiens sapiens* abandonaron África aprovechando un leve repunte de las temperaturas (un interestadial) que ocurrió hace unos cien mil años. La ruta elegida los llevó a subir a lo largo del valle del Nilo, donde a causa del momentáneo calentamiento abundaban la vegetación y los animales, para salir de África a través del Sinaí. Hay que insistir que no se trataba de una marcha organizada y sin pausa. Más bien era una progresión en los sucesivos asentamientos en los que llegaban a vivir durante varias generaciones hasta que algunos miembros de la tribu se iban unos kilómetros más al norte y se repetía el ciclo.

Hace unos ochenta mil años comenzó la segunda fase de la glaciación que duraría hasta hace unos veinte mil años. El frío intenso ocasionó la congelación de gran parte del agua del planeta. El norte de Europa estaba cubierto por hielo de un par de kilómetros de espesor. El nivel del mar descendió aun veinte metros más. Esta circunstancia permitió utilizar una vía

más corta a los *Homo sapiens sapiens* que seguían saliendo de África: cruzar a la península arábiga y, desde allí, a la India. El drástico descenso del nivel del mar convertía al estrecho de Bab el-Mandeb en fácilmente practicable para aquellas gentes, ya que emergían islas y arrecifes a corta distancia unos de otros.

Hace unos setenta y cuatro mil años ocurrió una catástrofe de dimensiones planetarias: la explosión del volcán Toba, en Sumatra, que pudo matar a gran parte de los seres humanos que comenzaban a colonizar Asia. Las cenizas fósiles se han identificado en estratos marinos a miles de kilómetros de distancia. Los gases sulfurosos llegaron hasta Groenlandia y quedaron atrapados en las burbujas del hielo, donde se han identificado. La India y el sureste asiático se cubrieron de cenizas y sufrieron la lluvia ácida ocasionada por el bióxido de azufre que el volcán expulsó hasta la atmósfera. Además, los gases y el polvo lanzados a esta desencadenaron un invierno volcánico, con un descenso de la temperatura de unos 5 °C y graves efectos para las plantas, los animales y las personas.

Se han evaluado las consecuencias de esta catástrofe mediante técnicas genéticas. Las personas que habitan hoy la India tienen una variabilidad genética mucho menor que la esperada en comparación con otros lugares del planeta. La explicación de esta gran uniformidad genética, según el genetista Oppenheimer, se debe a que la erupción del Toba redujo drásticamente la población de la India a menos de mil individuos, de los que proceden todos los habitantes actuales.

Un rastro de fósiles jalona el recorrido migratorio de nuestros antepasados. Los más antiguos se han encontrado en los lugares de origen, en la zona de Etiopía, Kenia o Tanzania, y en Israel, su lugar de paso. Se supone que llegaron a Europa hace unos cincuenta mil años, como lo demuestran los innumerables testimonios arqueológicos y algunos fósiles. Hace sesenta mil años se los sitúa en el suroeste asiático. Hace unos cuarenta mil años, aprovechando el bajo nivel del mar que dejaba al descubierto islotes y arrecifes coralinos a una distancia practicable por aquellos seres humanos primitivos, colonizaron primero Indonesia y luego Australia, así como la mayor parte de islas del Pacífico y el Índico. Y llegaron a Japón hace treinta mil años. Algunos individuos que colonizaron las tundras del norte de Siberia,

posiblemente siguiendo a los rebaños de los grandes herbívoros, cruzaron lo que hoy es el estrecho de Bering y entraron en América. Esto fue posible a causa de que hace unos treinta mil años se produjo un estadal que redujo mucho la temperatura del globo. El mar descendió hasta más de cien metros por debajo del nivel actual. Alaska y Siberia se conectaron a través de la tierra firme que formaba la llanura de Bering o Beringia. En Monte Verde, en el sur de Chile, se han datado restos de viviendas construidas con cuero hace catorce mil años. Algunos autores han calculado el ritmo de desplazamiento de estos primeros colonizadores americanos. A una velocidad media de dieciséis kilómetros por año, para ir desde el lago Baikal (Siberia) hasta el sur de Chile se emplearían menos de dos mil años. Los últimos estudios sugieren que pudieron utilizarse otras rutas alternativas para la colonización de América por los seres humanos, como una más al sur de Alaska, a lo largo del borde de la costa del Pacífico, a través de la cadena de islas Aleutianas. Son estudios muy recientes, pendientes de una confirmación, que podrían adelantar la fecha de colonización de América en más de cien mil años.

¿QUÉ SUCEDIÓ CON EL RESTO DE LOS HOMÍNIDOS?

¿Cómo es posible que no haya sobrevivido ninguna muestra de ningún homínido? Parece difícil de entender que por muy letales que fuéramos los seres humanos y a estos parientes lejanos los consideráramos como caza fácil, no quedara ni rastro de ninguno de ellos. ¿Qué sucedió para que ni en alguna selva recóndita o cordillera inaccesible persistieran algunos homínidos hasta nuestros días? En la actualidad, se proponen tres mecanismos para explicar esta incógnita.

Uno es el modelo de Reemplazamiento, posiblemente el mejor demostrado con evidencias científicas y que es el que venimos describiendo. Según este modelo, los seres humanos que surgieron en África fueron colonizando el resto del mundo, desplazándose al mismo tiempo que eliminaban directamente o provocaban de forma indirecta la extinción del resto de los homínidos. Las diferencias entre los diferentes grupos humanos (color de piel, forma de los ojos, capacidad para correr largas distancias, etc.)

solo serían adaptaciones particulares de un determinado grupo humano a sus peculiares entornos. La ventaja de este modelo es que los seres humanos formamos una sola raza con pequeñas variaciones.

El otro es el modelo de Continuidad regional. Todos los homínidos que poblaron el mundo hace millones de años fueron evolucionando cada uno en su región y entrecruzándose genéticamente con otros homínidos de otros lugares a lo largo de muchos miles de años de evolución. En este caso, las variaciones morfológicas de los distintos grupos humanos estarían causadas por las diferentes líneas evolutivas particulares. Según este modelo, no quedarían homínidos hoy porque todos fueron evolucionando a seres humanos, cada uno en su territorio. El inconveniente de esta teoría es que los seres humanos pertenecemos a diversas razas de orígenes evolutivos diferentes.

Como cada uno de estos dos modelos tiene una serie de puntos a favor y otros en contra, se ha propuesto un tercero, conciliador de ambos: el de Asimilación o Reemplazo parcial. En este modelo, los seres humanos que salieron de África, cuando llegaron a otras regiones, en algunas ocasiones eliminaron a los homínidos existentes y en otras, cuando el grado de evolución lo permitía, establecieron un cierto grado de entrecruzamiento genético con los residentes. Esto no siempre era posible. No hay que olvidar que especies diferentes pero genéticamente compatibles, como el caballo y el asno, pueden tener descendencia, aunque el resultado, el mulo, es estéril.

En cualquier caso, los seres humanos representamos la única especie que ha sobrevivido al largo camino de millones de años desde que nuestra rama evolutiva se separó de la del resto de los simios. Nuestras diferencias genéticas son tan pequeñas que demuestran que pertenecemos a una especie muy uniforme, con muy pocas variaciones. El misterio persiste en cómo, a pesar de las estrechas relaciones con el resto de los tipos de homínidos y de compartir muchas de las características morfológicas y fisiológicas que poseemos los seres humanos actuales, esas primeras especies se han extinguido por completo. Y la conclusión que podemos extraer de este hecho es que somos una especie muy frágil y nuestra propia extinción puede suceder si las condiciones medioambientales cambian lo suficiente.

## La consciencia

En las últimas etapas de evolución del *Homo sapiens sapiens* el cerebro desarrolló una capacidad extraordinaria que determinaría lo que hoy somos: la consciencia. En este capítulo abordaremos someramente los elementos fundamentales que conforman esta misteriosa función de nuestro cerebro.

En primer lugar aclaremos una cuestión semántica: ¿consciencia o conciencia? En español, «consciencia» siempre es sinónimo de «conciencia», pero no al revés. «Consciencia», según los diccionarios, es la capacidad del ser humano de reconocerse a sí mismo y lo que lo rodea, y reflexionar sobre ello; es un asunto que tiene que ver con la neurofisiología. «Conciencia» es la consciencia cuando se refiere al bien y al mal; es un asunto que tiene que ver con la moral, con nuestra educación y con las creencias religiosas de cada cual. Nosotros no vamos a referirnos a la conciencia, que depende en gran parte de la educación, de la religión y de los principios éticos y morales de cada cual. Vamos a tratar en exclusiva la consciencia, y más concretamente sus aspectos evolutivos y fisiológicos. Esta constituye la clave para comprender la evolución de la especie humana en los últimos miles de años y para la entrada del *Homo sapiens sapiens* en la cultura y en la historia.

La consciencia, por lo tanto, es el conjunto de facultades que nos permiten a los seres humanos reconocernos a nosotros mismos, saber que existimos, que estamos vivos como otras personas lo están, que formamos parte del universo, que tenemos un pasado, un presente y un futuro, y que,

inevitablemente, hemos de morir. No es lo mismo que el intelecto, aunque ambos se relacionen entre sí funcionalmente: la consciencia incumbe al campo de las emociones y la inteligencia, al de las percepciones.

Veamos un ejemplo. Caminamos por la calle al final de una mañana en la que apenas hemos probado bocado y nos llega el aroma de pan recién hecho. Ese estímulo, compuesto por las moléculas que escapan de la masa caliente, se percibe por los receptores olfativos, que mandan una señal a determinadas áreas cerebrales. Nuestro cerebro, hambriento, desencadena la respuesta instintiva de entrar en la panadería, comprar un bollo y comerlo, para así saciar el hambre. Es una función que, más o menos, resulta común a cualquier animal hambriento: también funciona en el perro abandonado que se detiene babeando de hambre en la puerta de la panadería atraído por los efluvios del pan caliente y a la espera de que alguien le tire un trozo. Pero mientras estamos esperando a que nos atiendan, ese aroma de pan recién hecho, a través de otras rutas diferentes y misteriosas, evoca recuerdos de nuestra niñez, de la cocina de la abuela que elaboraba una hogaza deliciosa de la que siempre nos daba un pedazo. Y nos embarga la tristeza de su reciente desaparición. Esa emoción, que nada tiene que ver con el hambre o las percepciones primarias, y que por supuesto no comparte el perro, desencadena en nuestro interior una tormenta de hormonas y neurotransmisores y crea un estado especial que denominamos emoción: eso forma parte de la consciencia.

Otro ejemplo. Alguien está escuchando en soledad una melodía que le resulta muy especial por diversas circunstancias vitales. Conocemos perfectamente cómo llegan las vibraciones sonoras al sistema auditivo y cómo el temblor de la membrana del tímpano y el de unos huesecillos del oído transforma las notas musicales en potenciales eléctricos, que cuando llegan a las neuronas de la corteza auditiva se transforman en sonido; todo eso es neurofisiología. Pero aún no podemos entender cómo se generan las sensaciones complejas que esa música desencadena en el sujeto que la escucha: los recuerdos de su amor de juventud, la añoranza o la felicidad de un momento inolvidable.

El sonido, los sentidos, la percepción de los estímulos del medio, la realización de operaciones matemáticas, la habilidad para manipular objetos con precisión... todas estas funciones son facultades del cerebro que pueden



explicarse mediante leyes físicas y químicas dentro de la fisiología y que hoy día pueden reproducirse en un ordenador o en una prótesis biónica. Pero la consciencia es una propiedad cerebral que aún no podemos explicar mediante la fisiología, ni se ajusta a las leyes de la naturaleza conocidas. La consciencia es diferente del conocimiento, del intelecto, del conjunto de facultades cognitivas, como los instintos, el aprendizaje, la memoria, el lenguaje, el razonamiento, etc. La consciencia, reitero, es la percepción de nuestra propia existencia, de nuestro ser individual en relación con el resto del universo.

La naturaleza de la consciencia ha sido un tema de interés desde la más lejana antigüedad. Disponemos de escritos de Hipócrates sobre este asunto. Todos los filósofos de cada época histórica y los teólogos de todas las religiones se han ocupado de definir la consciencia e incluso de utilizarla en provecho de sus dogmas. Pero la consciencia es un fenómeno natural y como tal podríamos encontrar algunas leyes de la naturaleza que lo explicasen. Hoy por hoy, la ciencia que más se aproxima a su estudio es la neurofisiología. Durante los últimos veinte años, los avances en las técnicas de imagen y en los métodos electrofisiológicos han permitido conocer más acerca del funcionamiento de nuestro cerebro que en toda la historia precedente. Y nos ha permitido calibrar la exacta dimensión de su complejidad, pero no ha sido capaz de explicar cómo surge la consciencia de la actividad electroquímica neuronal. Aunque no sabemos exactamente qué estructuras y mecanismos están implicados, sí que existen las pruebas de que determinadas lesiones y enfermedades del cerebro afectan específicamente a las propiedades de nuestra consciencia. Por eso podemos suponer que al menos una parte de la consciencia reside en el cerebro.

De todas formas quedan aún muchas incógnitas por resolver. ¿La consciencia se genera solo en el interior de la cabeza o depende de otras partes del cuerpo? ¿Tienen consciencia los animales o es algo exclusivo del ser humano? Hoy día estas cuestiones y muchas más son temas de debate, a veces con más tintes pasionales que científicos. El problema es que las percepciones y la actividad cerebral intelectual se pueden medir y cuantificar mediante diversas tecnologías. Podemos introducir unos electrodos en la corteza olfativa de una persona y medir los potenciales que generan los

estímulos olfativos del pan recién hecho. Pero no hay forma de medir la cantidad de añoranza y de amor por la abuela que evocan los aromas del pan. Las emociones complejas no pueden medirse ni cuantificarse, por el momento.

Los animales pueden sentir sensaciones y emociones simples en relación con las Fuerzas de la Vida, como también lo hacemos nosotros: hambre, ira, rabia, miedo, alegría, saciedad, placer, deseo sexual, etc. Incluso algunos animales pueden ejecutar acciones y mostrar comportamientos instintivos que nos hacen suponer que poseen un elevado nivel de consciencia. Todos conocemos sorprendentes historias de lealtad y fidelidad protagonizadas por perros. También nos asombran las habilidades que pueden exhibir algunos animales amaestrados o simios en sistemas experimentales. Incluso una rata aprende a resolver problemas complejos en un laberinto o a presionar ciertos interruptores para obtener comida. Pero desconocemos si el componente más complejo de las sensaciones y de las emociones se puede generar en el cerebro de un animal. Incluso en los comportamientos más complejos observados no se puede deslindar con precisión si el resultado obtenido es simplemente consecuencia de una respuesta instintiva automática o de un proceso más elaborado, fruto de un cierto grado de consciencia.

¿Cómo y cuándo surgió la consciencia? ¿Se produjo a partir de facultades no conscientes? ¿Qué ventaja proporcionó para la supervivencia y reproducción? De acuerdo con la hipótesis que venimos planteando a lo largo de las páginas precedentes, la única respuesta acorde es que la consciencia es una facultad que se desarrolló porque permitía a los *Homo sapiens sapiens* un mejor cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. En consecuencia, en el último tramo de la evolución que nos condujo hacia los seres humanos, se fueron creando algunas estructuras exclusivas de nuestro cerebro. Estas nos diferencian rotundamente de cualquier otro animal, incluidos los simios, y del resto de los homínidos, incluidos nuestros parientes más próximos, los neandertales. Parece razonable pensar que estas estructuras cerebrales tan exclusivas son las responsables de una función tan especializada como es la consciencia humana. Pero a pesar de los grandes avances en todos los campos del conocimiento y de la tecnología seguimos sin disponer de una teoría científica que explique de una manera convincente cómo nuestro cerebro

alberga tales potencialidades extraordinarias. Es posible que la explicación que ansiamos llegue de la mano de la moderna física cuántica y, ¿por qué no?, de una fisiología cuántica.

## EVOLUCIÓN DE LA CONSCIENCIA

No se tiene una idea clara de si las plantas experimentan sentimientos y emociones, aunque algunos autores, como el profesor Stefano Mancuso, lo afirman. Lo que puede despertar algunos problemas inéditos de «conciencia» a los vegetarianos estrictos.

La adquisición de una estructura como el cerebro permitió a los animales desarrollar un nivel elemental de consciencia. El cerebro de todos estos es capaz de controlar mediante el hipotálamo todas las funciones básicas corporales: temperatura, respiración, latido cardíaco y circulación, funcionamiento digestivo y renal, etc. En el cerebro de cualquier animal se pueden generar las sensaciones y emociones básicas como el hambre o la saciedad, el miedo, la ira, la agresividad, la seguridad, la soledad, la compañía, el deseo sexual o el placer. Esa información elaborada genera unas respuestas adecuadas que van a permitirle detectar dónde hay comida (nutrición), encontrar una pareja (reproducción), esconderse en caso de peligro (defensa) o buscar la compañía de sus semejantes (socialización).

	<i>Gramos de cerebro</i>	<i>Coefficiente encefalización</i>
Rata	2	0,4
Perro	64	1,2
Elefante	4.200	1,3
Ballena	5.000	1,8
Chimpancé	450	2,4
Delfin	1.500	3,6
Humano	1.400	7,5

Tabla 18.1. Tamaño absoluto y relativo (Coeficiente de encefalización) del cerebro de algunos mamíferos.

El nivel de consciencia aumentó en los mamíferos y sobre todo en los primates a causa del desarrollo de una nueva estructura: la corteza cerebral. Se trata de una fina capa de células nerviosas que recubre todo el cerebro y que aumentó en superficie desde los 0,8 cm<sup>2</sup> de un mamífero insectívoro hasta los 7.400 cm<sup>2</sup> de una ballena. También lo hizo en espesor, aunque en menor proporción, desde los 0,5 mm en ratones hasta los 3 mm en seres humanos. Lo que determinó el mayor grado de inteligencia fue el llamado «coeficiente de encefalización», que indica la proporción entre el tamaño cerebral y el número de neuronas en la corteza.

Como se muestra en la tabla, en cuestiones cerebrales el tamaño no es lo importante. La mayor eficacia funcional viene determinada por la proporción entre el tamaño global del cerebro y la densidad celular de su córtex. Disponer de una tenue corteza cerebral permitió a los mamíferos que, además de todas las funciones que podían realizar los animales de niveles inferiores, dispusieran de herramientas emocionales para desarrollar comportamientos complejos e interactuar socialmente con los miembros de su grupo: crear aliados, reconocer a rivales, aceptar las jerarquías, servir al macho o hembra alfa, devolver favores, crear coaliciones, planificar conspiraciones y entender el estatus propio y el de los demás. Es evidente que la complejidad de estas respuestas no es la misma en una vaca que en un chimpancé; todo depende de su coeficiente de encefalización.

Los seres humanos son los indudables ganadores, ya que tienen de todo: un cerebro relativamente grande, una corteza de gran espesor, una elevada densidad celular. Un cerebro humano contiene 30.000 neuronas por mm<sup>3</sup> y 15.000 millones de neuronas corticales. Cerebros de mayor tamaño, como el de los elefantes, solo contienen 10.500 millones de neuronas. El cociente de encefalización humano está muy por encima que el de cualquier otro animal. Es posible que en esa mayor corteza cerebral, entre otras estructuras, se asiente la consciencia típicamente humana.

¿Pero los animales tienen consciencia? Ese es un asunto de fuerte debate y con hondas implicaciones emocionales que ha llegado hasta el punto de someter a perros a sofisticadas técnicas de exploración cerebral, con el fin de intentar averiguar qué son capaces de sentir. Es evidente que la mayor superficie y densidad de corteza cerebral faculta para experimentar

sentimientos y respuestas emocionales más elaboradas y complejas que las que puede experimentar un ratón. Pero ni siquiera los chimpancés o los delfines se pueden acercar a los niveles de consciencia que poseemos los seres humanos.

A los animales les falta una dimensión: solo son conscientes en la dimensión espacial, pero son incapaces de ser conscientes en la temporal. Un chimpancé no sabe qué es ayer, hoy o mañana y mucho menos qué es el año que viene o el pasado. Esto no se puede confundir con que todos los animales (insectos y reptiles incluidos) sean capaces de percibir el paso del tiempo. Ya lo mencionamos al hablar de la atmósfera. Un oso o una gallina tienen dispositivos internos, fundamentalmente en la glándula pineal, con capacidad para detectar variaciones en la intensidad y la duración de la luz del Sol, y de ahí conocer el transcurso del día y generar respuestas automáticas. Cuando una gallina percibe que la luminosidad va disminuyendo se va acercando a su nidal para pasar la noche. Estos dispositivos de relojes internos permiten a muchos animales captar los cambios en las estaciones mediante los estímulos del aumento o disminución de las horas de luz diurna. También detectan los cambios estacionales. Cuando un oso nota que los días se van haciendo más cortos, que bajan las temperaturas y que escasea el alimento, se le activa un mecanismo neurohormonal automático y comienza a buscar una osera donde encerrarse para hibernar.

El factor tiempo es importante en este asunto de la consciencia. Las emociones complejas requieren ser capaces de percibir el paso del tiempo, evocar recuerdos del pasado y proyectar nuestra vida hacia un futuro. No se conocen pruebas científicas que demuestren que los cerebros de algún animal, ni siquiera los simios más cercanos, puedan ejercer tales habilidades.

## LOS SERES HUMANOS

El cerebro humano en su conjunto solo es un órgano más que nos proporciona una ventaja de supervivencia en un determinado entorno: decidir qué hacer cuando nos enfrentamos a una amenaza, aunque esta sea inédita. La mente humana es capaz de organizar el conocimiento acerca del mundo y relacionarlo con las Fuerzas de la Vida: comida, reproducción, comunicación

y defensa, en una manera mucho más compleja que cualquier otro animal. En un entorno hostil e impredecible, la mente ejerce un trabajo continuo para resolver cualquier imprevisto que surja y la originalidad es que todas estas operaciones las realiza en las dos dimensiones: espacial y temporal.

Pero el cerebro humano, además, puede realizar otras funciones que no están presentes en el resto de los animales como la memoria, la planificación y flexibilidad cognitiva, el pensamiento abstracto, el establecimiento de comportamientos adecuados e inhibición de los inadecuados y el aprendizaje de reglas.

### LA MÁQUINA ANTICIPATORIA

Pero quizá la característica más notable de la corteza prefrontal del cerebro humano sea, como hemos adelantado, su capacidad para elaborar simulaciones y modelos no solo en la dimensión espacial, sino también en la temporal.

Daniel Gilbert, de la Universidad de Harvard, afirma que el cerebro humano es una especie de máquina anticipatoria cuya principal actividad radica en construir el futuro. Para ello, sobre los datos sensoriales y emocionales del pasado y del presente, imagina objetos y episodios que no existen en la realidad, establece relaciones causales entre unos y otros, para de esta forma poder pensar en el futuro que protagonizará el propio sujeto. Parece que evaluar el pasado y vislumbrar el porvenir mediante la elaboración de predicciones aproximadas y anticipar los planes de actuación tiene una enorme ventaja en relación con las Fuerzas de la Vida. Un ejemplo. Un joven está tranquilamente sentado en su casa. Comienza a pensar en que desearía concertar una cita con Ana, de la que está muy enamorado. Quiere que todo salga a la perfección. Nuestro cerebro crea una situación imaginaria en un espacio y un tiempo determinados. Se imagina el restaurante al que irán, elegirá una mesa discreta, piensa en si a Ana le gustará el vino tinto o el blanco y así irá acumulando detalles en su simulación mental anticipatoria para que todo salga como desea. Esta facultad para construir escenarios y situaciones imaginarias como ensayo para tener éxito frente a una situación real también la usaban nuestros ancestros cuando se preparaban para cazar un mamut. Imaginaban la escena y todos los detalles necesarios para tener éxito

con el menor riesgo para sus vidas. O cuando el joven paleolítico enamorado imaginaba el apetitoso pernil que regalaría a su amada si lograba cazar el jabalí que llevaba acosando desde hacía varios días.

Calvin cree que la clave está en el movimiento, que incluye las dos dimensiones: moverse es desplazarse por un espacio durante un tiempo. Al final, lo que pensamos tiene como destino la acción, ya sea cazar un mamut (nutrición) o encontrar pareja (reproducción). Nosotros tenemos que movernos en el universo, y la mente es la herramienta que determina la forma más eficiente de hacerlo. Lejos de constituir una mera combinación de sensaciones y recuerdos, los pensamientos, como alguien dijo, son movimientos que aún no han tenido lugar.

Hay numerosas pruebas de esta actividad anticipatoria; una de las más sorprendentes es el humor. Mientras alguien nos cuenta un chiste, nuestro cerebro recoge la información que se nos proporciona y automáticamente va elaborando un futuro, de tal forma que adelantamos el final de la historia por nuestra cuenta. Y nos desencadena la risa cuando el chiste termina de una manera totalmente inesperada, en desacuerdo con nuestra propia previsión. Algo similar ocurre con los juegos de los niños en los que experimentan con una serie de datos del mundo de los adultos y se entrenan para proyectar simulaciones de futuro.

## LAS RELACIONES SOCIALES

Ya hemos comentado que una de las fuerzas que ha dirigido la evolución del cerebro ha sido la socialización. El cerebro humano, y en menor medida el de los simios, muestra una elevada capacidad para el manejo de las relaciones sociales, lo que ha constituido una de las bases sobre las que se asienta lo que hoy somos como especie. A esta propiedad se la ha denominado «teoría de la mente», término confuso que fue propuesto por el primatólogo David Premack cuando, al estudiar un grupo de chimpancés, descubrió que eran capaces de deducir los estados mentales del resto de los individuos del clan. Es una facultad que permite intuir lo que los demás están pensando, deducir sus intenciones, sus motivos, los planes de otros individuos. Saber lo que están pensando los otros miembros del grupo proporciona indudables ventajas de

supervivencia y reproducción. Permite formar alianzas para buscar comida, neutralizar a los contrincantes peligrosos, asumir las jerarquías, ser aceptados en el grupo, consolidar amistades, defenderse con eficacia, formar pareja y reproducirse. Estas facultades que ya poseían los simios fueron potenciadas en el cerebro humano.

Imaginemos a un cazador paleolítico que regresa a la gruta de su clan, hace cien mil años; o a un ejecutivo de una multinacional que asiste a un cóctel de la empresa, hoy. El comportamiento en cualquiera de los dos sujetos es el mismo. Exploran con detalle las caras, la forma de vestir, los gestos, las posturas, la dirección e intensidad de las miradas de todas las personas. Advierten quién está junto a quién, quién habla con quién, qué actitudes tienen unos para con otros, sus olores, su tono de voz... Todos esos datos y muchos más están penetrando a través de los sentidos y se almacenan en el centro de la memoria del hipocampo, llegan a la amígdala, que gestiona el contenido emocional que estos conllevan, y finalmente toda la información es transmitida a la corteza prefrontal, que analiza todos los recuerdos y emociones y los conecta con experiencias pasadas. Ahí sale a relucir el *affaire* que vivió con la jefa de ventas y la violenta discusión con el encargado de inversiones que tuvo en la última reunión; o, remitiéndonos al antepasado, los recuerdos de la última cacería de mamuts, en la que salvó la vida al hijo del jefe del clan, y los deseos que se despiertan al contemplar a la joven hembra a la que ronda desde hace meses. Todo ello, una vez procesado, se traduce en emociones de felicidad, deseo sexual, miedo, rabia, envidia, alegría, hambre, etc.

Gran parte de esta habilidad se debe a unas neuronas especializadas que también poseen los simios y que ya hemos mencionado. Son las llamadas «neuronas espejo». Estas se activan cuando vemos a otra persona realizando una determinada tarea o experimentando alguna emoción. Se ponen en marcha tanto si observamos a alguien fabricando una punta de flecha de obsidiana como si lo vemos sufrir por el dolor que le causa la fractura de la pierna a causa de la embestida de un bisonte. Estas neuronas permiten dos acciones que han alcanzado su mayor expresión en el cerebro humano: la imitación y la empatía. Nos facultan para emular y copiar las acciones complejas que otros



llevan a cabo, como fabricar una herramienta. También nos permiten experimentar como propias las sensaciones y emociones que están sintiendo aquellas personas que vemos. Son la base de la compasión.

## EL CEREBRO OCIOSO

Cuando los seres humanos fueron asentándose en entornos seguros, domesticaron el fuego y fabricaron utensilios, ropas, albergues, armas, etc., que les permitían una existencia relativamente cómoda en ese entorno particular y los hacía menos vulnerables a los avatares de la selección natural, el cerebro, que nunca deja de funcionar, pudo dedicarse a otros menesteres. Es curioso que este mismo fenómeno se dé en los animales que nos sirven de mascotas. El cerebro (de menos de cien gramos) de un perro que vive en nuestra casa, protegido de los peligros, bien alimentado y recibiendo estímulos complejos (el sonido de la televisión, el tráfico, el ascensor, las conversaciones, etc.), desarrolla otras potencialidades que no ejercería nunca en la vida salvaje de manada.

El cerebro humano no cesa de funcionar nunca. Si no se tiene que preocupar de resolver problemas de supervivencia, comienza a tratar de solucionar otros problemas, a intentar comprender otros aspectos del mundo que le rodea; a ser más consciente de su propia existencia. Y llega incluso a ser capaz de inventarse mundos y seres que carecen de existencia real. El ser humano es el único animal capaz de elaborar mitos y transmitirlos. Si no tiene que resolver problemas reales, se los inventa. Una vez que fuimos capaces de construir vallas seguras y un fuego protector durante la noche y dejamos de temer el ataque de un tigre dientes de sable, las emociones se tradujeron en, por ejemplo, dedicarnos a contar historias de miedo sobre feroces tigres.

Por eso algunos autores sugieren que la consciencia se desarrolló cuando se redujo el trabajo cerebral empleado en el estricto cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Sería la consecuencia de una cierta ociosidad cerebral. Piero Scaruffi señala que este cerebro ocioso acabó desarrollando la consciencia en su plenitud mediante la incorporación de cuatro elementos esenciales: las herramientas, el lenguaje, el arte y las emociones.

## HERRAMIENTAS

El cerebro proporcionó una capacidad extraordinaria: transformar cualquier cosa en algo provechoso tras comprender las leyes generales que gobiernan el universo y, en consecuencia, construir tecnología de acuerdo a esas leyes. Para estos menesteres, el cerebro se ha servido del truco de copiar lo que ya existe en la naturaleza, a través de la contemplación cuidadosa de los fenómenos naturales, que se adaptan para fabricar herramientas y útiles ingeniosos. Por ejemplo, se dice que nuestros ancestros aprendieron a cazar por medio de trampas observando la técnica de las arañas. Si nos paramos un poco a reflexionar, nos daremos cuenta de que no hemos logrado inventar nada que no tenga su correlato en la naturaleza: el sonar que utilizan los submarinos es similar al que usan los delfines. La universalidad de las leyes de la naturaleza, de la física y de la química, junto con una actitud constructora como la del cerebro proporcionaron a nuestros ancestros posibilidades ilimitadas de adquirir conocimientos.

La evolución del cerebro nos convirtió en una especie fabricante de herramientas, y estas a su vez contribuyeron a modelar la mente. No somos la única especie que fabrica utensilios, pero sí la única cuyas creaciones pueden modificar los patrones de conocimiento. Una simple araña teje una tela y debe siempre adaptarse a las circunstancias, ajustar su patrón de vida para vivir en el entorno de la herramienta fabricada. Todas las especies de arácnidos fabrican su red siempre con las mismas características. Los chimpancés se sirven de un palito para extraer termitas de un tronco, como lo vienen haciendo desde hace millones de años y exactamente a como lo seguirán haciendo. Pero el ser humano es capaz de modificar la estructura y funcionalidad de las herramientas que fabrica en función de las necesidades de cada momento. Cada nuevo utensilio, ya sea el fuego o Internet, produce un cambio en la mente de los humanos que lo utilizan. Tras el dominio del fuego, las noches frías y peligrosas ya no volvieron nunca a ser iguales. Tras la invención de Internet nuestra forma de adquirir conocimientos y de relacionarnos con otras personas ya no fue la misma. Las herramientas han contribuido a desarrollar la mente y la consciencia, ya que ellas cambian el entorno en las que el cerebro

debe operar. Las herramientas han evolucionado desde una rueda hasta un coche siguiendo las reglas de un guion darwiniano, y nuestra mente ha evolucionado con ellas.

## LAS EMOCIONES

Las emociones se desarrollaron como un elemento más de la evolución para conseguir un mejor cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Este asunto ya lo adelantó Darwin en un libro escrito en 1872 titulado *La expresión de las emociones en el hombre y en los animales*. Las emociones tuvieron un valor evolutivo, puesto que ayudaban a los organismos y a sus genes a sobrevivir y a reproducirse; por eso evolucionaron. Los humanos no somos los únicos seres vivos con emociones, pero somos aquellos en los que estas evolucionaron más, tanto en los aspectos cuantitativos como cualitativos.

Ya sabemos que todos los organismos son capaces de sentir emociones en relación con las Fuerzas de la Vida y sus compensaciones: hambre, placer, miedo, dolor, soledad, ira, saciedad. Pero las emociones primarias que nos permitían la supervivencia se transformaron en otras más sofisticadas, en respuesta a retos específicos. El sentimiento del que podíamos llamar «miedo previsor» permitió a los seres humanos proyectar en el futuro sus peores experiencias y así prevenir con eficacia los peligros. El sentimiento amoroso facilitó establecer vínculos duraderos de pareja y proteger a las crías para que pudieran superar ese período tan crítico en la vida humana como es la infancia. La capacidad única de proyectar en el futuro experiencias pasadas, agradables o desagradables, nos proporciona también momentos de bienestar. Por ejemplo, un antecesor nuestro transitaba habitualmente por un lugar peligroso en compañía de un amigo, lo que le proporcionaba un sentimiento de tranquilidad, de seguridad, que él almacenó en su hipocampo asociado a una emoción de bienestar, de felicidad. Meses después, cuando él recorría en soledad ese mismo camino recordaría con agrado y añoranza la seguridad que le proporcionaba la presencia de su amigo. Nuestro cerebro nos permite ir estableciendo vínculos emocionales con los diversos sucesos, favorables o desfavorables, que nos van ocurriendo a lo largo de la vida.

## LA CREACIÓN ARTÍSTICA

La primera manifestación de la consciencia específicamente humana es el arte, y de ello hablaremos con detalle más adelante. El arte, como manifestación de la consciencia, nos liberó de la atadura del presente: mediante la pintura, la escultura o la música pudimos expresar los relatos idealizados relacionados con las Fuerzas de la Vida. No existe temática artística que no se asiente en ese fundamento. Los animales tienden a vivir en el ahora, reaccionando simplemente a cada estímulo en cada momento. Solo los seres humanos tenemos un nivel de consciencia capaz de proporcionarnos la facultad de pensar en términos de pasado y acerca del futuro. Y esa extraña cualidad, como veremos, la comenzaron a reflejar nuestros antepasados en el arte.

## EL LENGUAJE

El lenguaje fue evolucionando a consecuencia de la evolución de las estructuras encargadas de producir sonidos (órganos de fonación) y de las estructuras cerebrales capaces de captarlos, interpretarlos y controlarlos. El producir sonidos y gestos proporcionaba una ventaja de supervivencia. Pero la evolución al lenguaje humano no se debió exclusivamente a la existencia de un órgano diferente, ni fue solo el resultado de un cerebro más complejo. El lenguaje típicamente humano apareció para expresar un nuevo modo de pensar: el pensamiento simbólico. Algunos autores opinan que el nivel de consciencia del ser humano se desarrolló asociado al lenguaje. Se basan en que el lenguaje requiere de intencionalidad o implicación (*aboutness* es el término que utilizan en inglés), que es un elemento esencial de la consciencia típicamente humana.

El lenguaje se desarrolló al servicio de la nueva forma de reproducción, de la exclusividad sexual, la relación de pareja, el amor. Fue imprescindible para la coordinación precisa de las cacerías de los grandes herbívoros, para planificar y llevar a cabo las grandes migraciones. Mejoró notablemente las posibilidades de defensa al permitir una comunicación más precisa de señales

e información que los simples gritos y gruñidos. También ayudó a la cohesión social y a la manifestación de nuestras emociones, permitiendo la risa, el sollozo, los lamentos.

Además de la estricta función de supervivencia, el uso del lenguaje adquirió una nueva complejidad y se empleó en otras actividades. El lenguaje y la seguridad ociosa permitieron construir narraciones, contar historias en el grupo, así como crear y difundir mitos que permitían construir y transmitir nuevos modelos del mundo. También facilitaron compartir estos modelos con los demás. Esas actividades ayudaban en la supervivencia y fomentaban la socialización y el desarrollo de la consciencia.

Del lenguaje derivó la expresión gráfica. Los seres humanos comenzaron a almacenar recuerdos fuera de su cerebro: figuras, pinturas, calendarios, etc. Y así seguimos en la actualidad. Es lo que yo estoy haciendo en estos momentos mientras tecleo y guardo mis recuerdos en el disco duro de mi ordenador. Ya no pintamos los muros de las grutas o las paredes de los abrigos rocosos, pero escribimos y colocamos imágenes en libros, vídeos, Facebook o Twitter.

Lenguaje, grafismo y consciencia permitieron los comienzos de la transmisión cultural al siguiente grupo de descendientes. Cada generación se puede beneficiar de la experiencia de la anterior y así se produce una aceleración de la evolución cognitiva. Es el inicio de los memes (unidades de información cultural) como alternativa a los genes.

## LA FELICIDAD

La felicidad es una experiencia subjetiva, con componentes emocionales y cognitivos, que constituye un fin último para los seres humanos. Estudiosos de todos los tiempos y de todas las ramas del saber, desde Aristóteles, o incluso antes, argumentan que perseguir la felicidad es el fin supremo de la vida. Estudios psicológicos han mostrado que la sensación subjetiva de felicidad está compuesta por factores emocionales y cognitivos. Básicamente, esta experiencia aparece cuando tenemos bajo control todos los detalles relacionados con nuestra supervivencia y reproducción. Somos felices tras una comida en casa de nuestra madre rodeados de nuestros familiares; somos

felices cuando encontramos a aquella otra persona con la que queremos formar una pareja, y lo somos aún más cuando nacen nuestros hijos y los vemos crecer con salud; somos felices cuando nos sentimos seguros en la vida, en nuestro trabajo, en nuestra casa, en nuestro barrio o en nuestra ciudad; y cuando estamos en paz con nosotros mismos. Si analizamos esta cuestión con honestidad y suficiente amplitud de miras, veremos que no existe felicidad sin relación con las Fuerzas de la Vida, incluso en las formas más excelsas de la felicidad, aquellas relacionadas con motivaciones de naturaleza espiritual.

También sabemos en qué parte del cerebro se asienta el mecanismo que desencadena la sensación de felicidad. Análisis recientes mediante sofisticadas técnicas de imagen revelan que se asocia a una zona de materia gris (neuronas) localizada en una pequeña área del lóbulo parietal superior, en una porción de cerebro situada detrás y un poco por encima de las orejas.

## El universo inventado

Una de las funciones esenciales de nuestra consciencia es la de inventarse un universo a medida. El mundo que nos rodea, nuestra casa, nuestro trabajo, el aspecto, el olor y los sonidos de nuestros familiares y amigos, de las ciudades y de los campos, el océano azul, el Sol, las nubes, la Luna y las estrellas que brillan en los cielos nocturnos; todo eso y el resto del universo no existen en realidad tal como nosotros lo percibimos. El mundo que nos rodea solo es un artificio creado por nuestra consciencia para cumplir con mayor eficacia con las Fuerzas de la Vida.

La realidad exterior es en gran parte, si no en su totalidad, una construcción artificiosa de nuestra consciencia. Esto que ahora parece estar de moda no es nada nuevo. En los Vedas, escritos hace más de dos mil quinientos años, se dice que la realidad es «maya», término sánscrito que significa engaño o ilusión. El debate sobre la fiabilidad de los sentidos continuó en el mundo griego hacia el año 500 antes de Cristo con el pensamiento de Heráclito y Parménides. Casi un centenar de años más tarde, Platón no haría gala de tantos recelos como Parménides hacia las informaciones que nos proporcionan los sentidos, pero sí manifestaría su escepticismo hacia la realidad de la percepción mediante el mito de la caverna.

En la Edad Moderna, con el idealismo, renació la desconfianza hacia la información que nos proporcionan nuestros sentidos. El idealismo más extremo se plasmó en la obra del clérigo y filósofo irlandés George Berkeley, quien llegó a afirmar que lo material no existe. En su obra *Tratado sobre los principios del conocimiento humano*, publicada en 1710, propone que los objetos existen solo cuando son percibidos; las flores por tanto están en el jardín solo mientras haya alguien para verlas. Se le atribuye a él mismo o a

alguno de sus discípulos la famosa paradoja del árbol que al caer en medio de un bosque no hace ruido si no hay nadie allí para escucharlo. Para explicar la regularidad y el orden de las imágenes que nos ofrecen nuestros sentidos, Berkeley defendía la existencia de Dios: «Siempre que miro, veo esta mesa, y mi casa está en el mismo lugar; pero no porque tales cosas materiales existan realmente, sino porque Dios hace que yo tenga esas imágenes ordenadas de una manera concreta». Giambattista Vico, filósofo napolitano, escribió en 1725 una obra titulada *Principios de ciencia nueva (Scienza nuova)*. En ella afirma que nosotros creamos los olores al oler, los colores al ver, los sonidos al oír y los sabores al degustar. La desconfianza hacia la información que proporcionan nuestros sentidos alcanzó su culmen con Kant, el idealista más radical. Afirma en sus textos que la realidad no se encuentra fuera de quien la observa: los colores, olores y sabores no están en los objetos, sino en la mente. En su libro *Crítica de la razón pura* (1781) afirma que la realidad, en gran medida, se construye por el aparato cognitivo y resalta la importancia activa del observador.

Numerosos fisiólogos, filósofos, físicos y psicólogos contemporáneos, entre ellos, F. J. Rubia Vila, apoyan este movimiento al que hoy se denomina «constructivismo» y que asegura que la realidad es una construcción artificial generada por quien la observa. Otro de los líderes constructivistas es Robert Lanza, médico e investigador estadounidense que ha expuesto su punto de vista en un libro con el mismo título que su teoría: *Biocentrismo* (2012). El primer principio de esta teoría dice que todo lo que percibimos como realidad es un proceso que involucra a nuestra consciencia. Y se plantea preguntas como ¿podría existir el universo si no existieran la vida y una consciencia que lo percibiera?, ¿existe algo realmente ahí fuera independiente de nuestra consciencia?

Los físicos cuánticos también se interesan sobremanera en este asunto. Afirman que la consciencia crea la realidad, que existe una relación íntima entre consciencia y el mundo físico y material. En un artículo de la revista *Nature* titulado «*The mental Universe*» (El universo mental), el canadiense R. C. Henry afirma que la nueva física reconoce que es el observador quien crea la realidad. Como observadores estamos personalmente involucrados con la creación de nuestra realidad personal. El universo es solo una construcción



mental. El físico *sir* James Jeans escribió: «La corriente de conocimiento nos está llevando hacia una realidad no mecánica. El universo empieza a parecerse más a un gran pensamiento que a una gran máquina». Se cierra el bucle y la más moderna física cuántica se reencuentra con el misticismo más antiguo. Buda proclamaba cuatrocientos años antes de Cristo que «somos lo que pensamos, todo surge de nuestros pensamientos, con nuestros pensamientos construimos el mundo».

En las páginas siguientes se abordan los fundamentos fisiológicos y evolutivos de este interesante concepto y su repercusión en nuestra evolución y en nuestra historia.

## EL INVENTO DE LA TRANSDUCCIÓN

Cada especie de ser vivo tiene un nivel de consciencia que le permite construir el mundo que le rodea según sus necesidades. Esta cualidad es esencial para sobrevivir. El truco consiste en que los seres vivos percibimos el mundo exterior a través de nuestro mundo interior. Vamos a ver cómo funciona esto explicándolo mediante un poco de fisiología.

Para realizar un intercambio adecuado de materia y energía con el medio externo y mantener su orden, los seres vivos necesitan obtener información acerca de todos los cambios físicos y químicos que ocurren en el entorno que los rodea. Y esta habilidad ya surgió en las primeras células vivas, que aparecieron en el planeta hace miles de millones de años. La eficacia y precisión de estos sistemas de detección fueron evolucionando en intensidad a la vez que crecía la complejidad de los seres vivos que los utilizaban. El mecanismo básico que desarrollaron las primeras células para saber qué es lo que había en el exterior fue la «transducción de señales». Según los diccionarios científicos, se denomina transducción a la acción por la cual un tipo de señal o de energía se transforma en otra de diferente naturaleza. Y aquí reside la clave para comprender por qué nuestra percepción del mundo no se corresponde con la realidad: es una percepción convertida en otra señal de diferente naturaleza. Vamos a analizar este asunto con una cierta calma.

Ya los primeros seres vivos, como las bacterias, desarrollaron hace miles de millones de años unas proteínas en sus membranas (receptores) que reaccionaban frente a determinadas sustancias presentes en el agua en la que nadaban (elementos tóxicos o moléculas nutritivas, por ejemplo). Esos dispositivos persisten activos en las bacterias de hoy día. La información captada por esas proteínas se transducía en cambios en la estructura electrónica y en la conformación de complejos moleculares que daban lugar a una transformación en la polaridad de la célula (por ejemplo, permitiendo la entrada de iones sodio o calcio) y a la producción de unas moléculas denominadas «segundos mensajeros» (por citar uno, el cAMP) que llevaban la información a donde se necesitase dentro de la célula. De esta forma, se obtenía la respuesta celular más adecuada: entre otras, se activaba o no la contracción de un flagelo que movía a la bacteria en una determinada dirección, hacia el estímulo si era reconocido como comida o alejándose de él si era considerado un peligro. Es decir, hace tres mil millones de años los seres vivos inventaron la transformación de una señal procedente del exterior en otro tipo de señal diferente, pero que era de más utilidad para el organismo en cuestión para nutrirse, defenderse, relacionarse y reproducirse.

Las plantas poseen mecanismos, parecidos a los descritos, que las facultan para la recepción de cambios en su entorno y para elaborar respuestas complejas que permitan su supervivencia. Son capaces de detectar desde dónde llega la luz del Sol y orientar el crecimiento de las ramas y las hojas en esa dirección. Pueden también percibir la gravedad terrestre y dirigir el crecimiento de las raíces a favor de esta, para que se hundan en la tierra. Tienen la habilidad de captar la ausencia de humedad y cerrar los estomas o poros para evitar la pérdida de agua. Algunas plantas se pliegan si las tocas; otras activan ingeniosas trampas para atrapar insectos que luego digieren.

Los parámetros a los que responden los seres unicelulares y las plantas son aquellos imprescindibles para que puedan cumplir con las Fuerzas de la Vida, como la temperatura, la humedad, la luz del Sol, la composición química del medio, la gravedad, el campo magnético, etc. Y las respuestas que se generan apenas requieren elaboración, dependen solo del automatismo de los sistemas moleculares involucrados. Al no disponer de un sistema nervioso, no podemos imaginar que perciban de alguna manera el mundo exterior, excepto a

través de las variaciones automáticas en la estructura y la actividad de determinadas moléculas que se activan o se inhiben y ponen en marcha las reacciones adecuadas frente a cada estímulo. Algunos estudios sugieren que en las plantas también puede existir una especie de sistema nervioso, con sus mensajeros correspondientes. La verdad es que me costaría admitir que un tomate pueda sufrir cuando percibe que me acerco con un cuchillo.

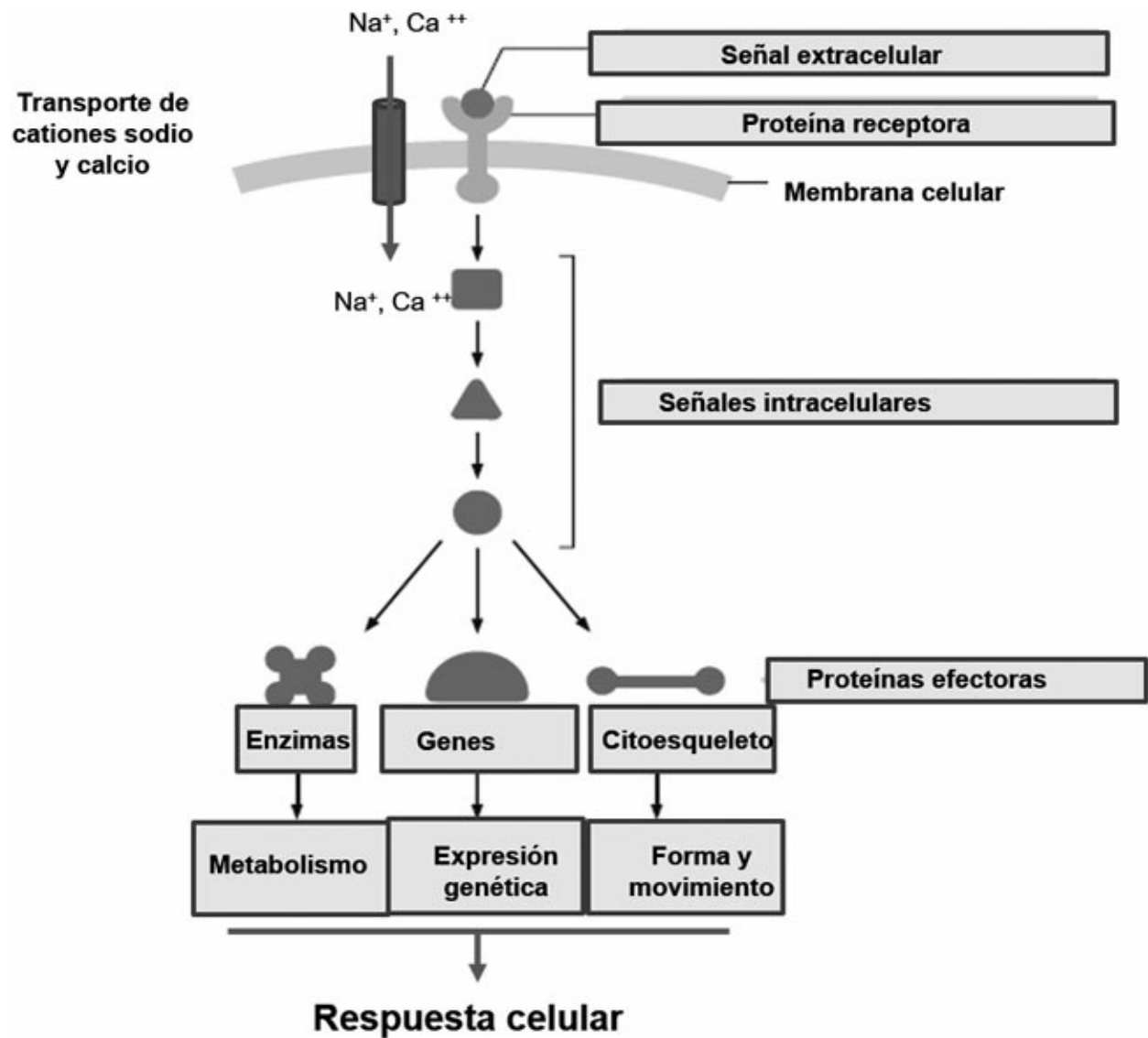


Figura 19.1. El mecanismo general de señalización y respuesta en organismos unicelulares ocurre en cinco etapas. 1.º, interacción de la señal (física o química) con su receptor; 2.º, transducción de la información en cambios de estructura de una proteína; 3.º, generación de señales o segundos mensajeros que transmiten la información por toda la célula; 4.º, cambios en la maquinaria enzimática, genética o microtubular, y 5.º, producción de la respuesta adecuada al estímulo.

Los animales que poseían ya un sistema nervioso adquirieron un equipamiento completo de receptores para captar aquellas variaciones que eran de interés para mantener su orden interno y sobrevivir. Desarrollaron órganos de los sentidos, como el gusto y el olfato, para captar estímulos químicos, termorreceptores para las variaciones en la temperatura, el oído (y sus variantes) para captar las vibraciones del aire (o del agua), los ojos para captar la luz y los magnetorreceptores para percibir las variaciones locales en el campo magnético terrestre.

El mecanismo es el mismo desarrollado por las bacterias: la transducción de señales. Los órganos de los sentidos están compuestos por cientos o miles de células, y cada una de ellas posee moléculas capaces de reaccionar ante un estímulo específico y desencadenar las mismas etapas que se han descrito para las bacterias. Veamos, por ejemplo, lo que sucede en la visión. Cuando los fotones procedentes del Sol llegan a las células de la retina (conos y bastones) interactúan con unas moléculas receptoras. La fototransducción se produce cuando un fotón interactúa con la rodopsina de los bastones y las opsinas de los conos. Estas moléculas cambian su estructura y activan una compleja cascada de reacciones enzimáticas y bioquímicas. Se cierran las proteínas canales para los iones positivos (cationes sodio y calcio), y esto hace que predominen los iones negativos dentro de las células de la retina, que se vuelven más electronegativas que en su estado de reposo. Mediante mecanismos complejos este estado genera una señal eléctrica que se transmite a través de las vías ópticas hacia el cerebro. Un fotón de radiación solar se ha transducido en un impulso nervioso, en un cambio de polaridad eléctrica de una neurona.

En todos los animales, excepto los mamíferos, esta información se procesa en una estructura cerebral básica compuesta de un tronco encefálico capaz de informar al animal de su situación física en un espacio concreto, su hábitat, y de señalarle dónde están otros animales, ya sean presas, predadores o amigos. Estos cerebros elementales permiten una cierta elaboración de la señal para construir respuestas automáticas, reflejas.

Los mamíferos, como el resto de los animales, también disponen del equipamiento completo de receptores, como el tacto, el gusto, el olfato, el oído, la visión, la termorrecepción y la magnetorrecepción, que les permiten

captar todos los cambios químicos, físicos o biológicos interesantes que suceden en su entorno. La señal se transduce mediante mecanismos similares a los descritos, en señales eléctricas que se transmiten al cerebro. Esta información se procesa en un cerebro ya más complejo, compuesto de un sistema límbico, con áreas como el hipocampo, que cumple una función muy importante en el aprendizaje y la memoria; la amígdala, que gestiona las emociones; el tálamo, que es el que recibe y controla tanto la información sensorial que llega del exterior como la del interior del propio organismo, y el hipotálamo, que integra los dos grandes sistemas reguladores, endocrino y nervioso, para controlar todos los parámetros y funciones del organismo. La novedad en los mamíferos es que toda la información se integra en una parte nueva de este órgano: la corteza cerebral.

Los seres humanos poseemos los mismos sentidos que el resto de los animales para captar los cambios físicos y químicos del entorno, acción que realizamos mediante los mismos mecanismos que estos. Unos están menos desarrollados que en los animales y otros más, ya que la mayor o menor capacidad de cada sentido depende de su utilidad para la supervivencia de cada especie en particular. Los primates tenemos menos afinado el olfato, ya que en el medio selvático en el que evolucionaron nuestros ancestros este sentido era menos importante que la visión. Lo contrario, por ejemplo, sucede en un cánido, en el que un olfato muy desarrollado le permite regresar a su guarida o perseguir a una presa sin que perciba por la vista ninguno de ambos objetivos. Pero los seres humanos carecemos de la capacidad de detectar algunos estímulos, habilidades que sí están presentes en algunos animales. Por ejemplo, los detectores para los rayos infrarrojos que poseen algunos reptiles los faculta para percibir el calor de las presas. El sistema de la línea lateral de los peces puede detectar los movimientos y las presiones del agua circundante. El mecanismo de detección del campo magnético terrestre de ciertos insectos y aves les permite orientarse. El sistema sonar de los murciélagos hace que, mediante la producción de sonidos de alta frecuencia, registren el eco de esas señales y de esa manera sepan orientarse a ciegas en el espacio.

Las características físicas y químicas del mundo exterior son variables, depende de cómo las perciba cada individuo mediante los estímulos sensoriales que le llegan a través de sus receptores específicos y que son reinterpretados por determinadas áreas de su cerebro. ¿Cree usted que una hormiga percibe el avión que la sobrevuela a gran altura?

Los órganos de los sentidos transforman las sensaciones en potenciales eléctricos nerviosos, todos de la misma amplitud. Un mayor grado de luz no produce potenciales eléctricos más grandes; nuestro sistema nervioso no transmite información en modulación de amplitud (AM). El grado de estimulación se transforma en trenes de potenciales: a mayor intensidad de estímulo, mayor número de potenciales por segundo. Es decir, las señales se transmiten al cerebro en un código de modulación de frecuencia (en FM). Como los impulsos nerviosos tienen la misma amplitud, la señal se codifica en el número de estos potenciales por segundo que llegan a áreas específicas del cerebro. Las salvas de potenciales que arriban al bulbo olfatorio se interpretan como olores, ya lleguen a través de los nervios olfatorios o mediante descargas artificiales de un electrodo implantado. A través de esas ventanas abiertas al mundo externo que son los sentidos, cada especie animal, cada individuo, se construye un mundo a su conveniencia. Los seres humanos, además, somos conscientes del mundo y de nuestra ubicación espacial y temporal en él. Veamos cómo se elabora este universo a la carta.

## EL COLOR Y LAS FORMAS

Usted pensará que nada de lo que acaba de leer en los párrafos precedentes tiene sentido. Está viendo este libro que tiene entre sus manos, las cuales también ve. ¡Todo eso es real, no es una invención! ¿O sí lo es? Vamos a analizar el asunto con un cierto detalle.

Imaginemos la luz de una vela encendida en una habitación oscura. ¿Tiene brillo y un color amarillo cuando no hay nadie en la habitación? La llama solo es un gas muy caliente que emite fotones, es decir, diminutos paquetes de energía electromagnética. Pero los fotones son solo partículas energéticas sin color ni luminosidad por sí mismos. No hay nada visual ni coloreado en la llama de una vela. Pero si esos fotones u ondas electromagnéticas miden entre

cuatrocientos y setecientos nanómetros de longitud de onda y van a dar contra la retina de un ojo, su energía activa algunos de los ocho millones de células receptoras (conos y bastones), las cuales generan un impulso eléctrico que en la corteza occipital del cerebro se interpreta y recrea como un objeto con una cierta forma y que emite una luz amarillenta en algún lugar de lo que denominamos mundo exterior. Es decir, no existe ninguna luz amarillenta en la habitación si nosotros no estamos. Ni siquiera hay habitación. Solo un conjunto de fotones y pulsos electromagnéticos.

Usted está sentado cómodamente en un parque de su ciudad, a su lado dormita su perro y en los columpios juegan sus hijos o sus nietos. Usted percibe los árboles, las flores y sus colores. Si mira al cielo ve su color azul y las nubes blancas que flotan empujadas por el viento. Observa a los niños que se divierten en los columpios. Ve moverse los coches en la calle cercana. La verdad es que nada de eso existe tal y como usted lo ve. Y mucho menos como lo percibe su mascota.

Los ojos del perro que está sentado a su lado reciben los mismos fotones que los suyos, pero la imagen de ese parque y de esos niños jugando es muy diferente en el cerebro del animal. Este posee una retina que solo permite una visión bicromática, por lo que verá la escena con colores diferentes a los que distingue usted. Además, usted, gracias a su consciencia, le añade a la situación la doble dimensión espacio y tiempo, así como los contenidos emocionales, que engloban desde los recuerdos del pasado, de cuando los nietos eran más pequeños, hasta las proyecciones del futuro, de cómo serán cuando crezcan y se hagan mayores. El perro es incapaz de plantearse esas representaciones temporales pasadas y futuras.

En conclusión, las imágenes de las cosas solo existen dentro de nuestro cerebro. Esa es la única ubicación donde las imágenes visuales son percibidas y reconocidas. El arcoíris no existe si no hay nadie para verlo. Tampoco lucen la Luna y las estrellas si nadie las mira. Pero aunque cerremos los ojos durante la noche estrellada seguimos imaginando el resplandor de los astros, y nuestro cerebro interpreta que siguen brillando, ya que aceptamos que otras personas pueden estar mirando al cielo y suponemos qué es lo que ven. Son meras

construcciones mentales. Y es muy posible que usted y yo no veamos la Luna exactamente de la misma forma y color. Cada cual construye su personal forma de ver el universo: es un universo a medida.

## EL SONIDO

Cuando los objetos se mueven en el aire o en el agua ocasionan una vibración de las moléculas del medio en el que están. Esas vibraciones se desplazan como ondas por cualquier medio: aire, agua u objetos sólidos. El viejo árbol que cae en mitad del bosque origina un empuje sobre las moléculas del aire más próximas y las hace vibrar. Esta vibración se va transmitiendo como una onda a las moléculas vecinas hasta que el impulso pierde fuerza y la onda se apaga. El árbol al caer o un niño al llorar (vibración de las cuerdas vocales de la laringe) lo único que producen es el movimiento ondulatorio de las moléculas del aire que los rodea.

Captar las vibraciones del aire (o del agua) siempre ha tenido interés. La evolución fue diseñando diversos mecanismos para detectarlas, hasta llegar al oído humano. Cuando las vibraciones de las moléculas del aire chocan contra una membrana que hay en el fondo de nuestro oído, el tímpano, la hacen vibrar y esta vibración se transduce, a través de un mecanismo complejo, en cambios eléctricos en las células del oído que generan series de potenciales de acción. Estos impulsos nerviosos llegan por los nervios auditivos a una zona del cerebro, la corteza auditiva, y allí las simples vibraciones del aire se transforman en esa sensación compleja que es el sonido. Por lo tanto, ninguna vibración suena a no ser que exista un oído para escucharla: el árbol no produce sonido al caer en nuestra ausencia. Cuando se formula esta paradoja, nuestra consciencia simula en el espacio y en el tiempo que si estuviéramos allí, al lado del árbol que cae, sin duda escucharíamos el ruido que produciría. Pero la realidad es que el universo real es absolutamente silencioso, aunque lleno de vibraciones.

## EL TACTO



Sabemos que la materia, formada por átomos, es esencialmente un vacío. ¿Cómo es que tocamos las cosas y percibimos su dureza o blandura? ¿Qué sucede si palpamos algo con la punta de los dedos? Sentimos presión, contacto con algo duro, liso o rugoso, denso, frío o caliente. La sensación de presión está causada por el hecho de que la energía electromagnética de los átomos que forman lo que tocamos se repele con la energía electromagnética de nuestros propios átomos en la piel de los dedos. Esta repulsión detiene la penetración de los dedos en lo que tocan, deforman la superficie de nuestra piel y esta deformación activa unos receptores táctiles. La deformación mecánica de estas células se transduce en potenciales de acción, que llegan por los nervios a toda la corteza cerebral, donde se elaboran todas las sensaciones que cada estímulo táctil genera en nuestro cerebro: rugosidad, lisura, aspereza, dolor, frialdad, calor... Además, nos permite detectar en qué lugar del cuerpo se ha producido el estímulo táctil, aunque tengamos los ojos cerrados. Nuestro cerebro nos permite la ilusión de palpar el vacío de la materia.

## EL GUSTO

Comemos y bebemos a través de la boca. Por eso en toda la cavidad oral y sus alrededores existen una serie de receptores capaces de determinar algunas de las características químicas (sabores) y físicas (sensaciones táctiles y térmicas) de todo lo que penetra en nuestra boca. Esto permite controlar que lo que entra en nuestro interior sea bueno, nos vaya a nutrir y no nos cause daño. Pero como pasa con el resto de las sensaciones, las moléculas que forman las porciones de materia viva (animal o vegetal) que constituyen nuestros alimentos carecen de sabor. Son solo estructuras químicas. Cuando determinadas moléculas presentes en los alimentos se unen a receptores específicos situados en la pared de la boca y en la lengua (papilas gustativas) generan una señal química que se transduce en salvas de potenciales de acción que llegan a las áreas específicas del cerebro. Es este órgano el que se inventa si algo es salado, dulce o amargo, para que la información sobre la composición química de lo que ingerimos nos sea de provecho.

## EL OLFATO

¿A qué huele el mundo? A nada; es inodoro, a no ser que exista un receptor específico como el olfato que cree esa sensación irreal que es el olor. Como el resto de las sensaciones, los olores son una invención de nuestra consciencia para que podamos detectar e interpretar la presencia de determinadas moléculas en el aire que nos rodea. Las sustancias volátiles penetran en nuestras fosas nasales e interaccionan con los receptores olfativos. Esta señal se transduce en impulsos nerviosos que van por los nervios olfatorios hasta llegar a la corteza cerebral olfativa, donde se genera esa sensación tan compleja que es el olfato.

## EL PAPEL DE LA CONSCIENCIA

El físico y filósofo Alan F. Chalmers afirma que la experiencia perceptiva que tiene un ser vivo cuando ve un objeto o una escena no depende solo de las imágenes captadas por la retina, sino también de la experiencia, el conocimiento, la educación, las expectativas, las creencias y el estado interno general del observador. Nuestra percepción es activa y recreamos una gran parte de la realidad al contemplarla. Y, como también sucede a nivel cuántico, la observación y el observador modifican lo observado. Es evidente que cuando dos personas escuchan una sonata de Schubert, sus tímpanos perciben las mismas vibraciones del aire, sus receptores auditivos se estimulan de una manera similar y mandan trenes de potenciales de acción a sus áreas cerebrales auditivas. Pero las experiencias personales, los estados diferentes de consciencia, hacen que la percepción sea cualitativamente distinta: una se aburrirá de manera soberana y otra se emocionará hasta las lágrimas.

Numerosos científicos pertenecientes a diversos campos, como el físico estadounidense R. Lanza o el neurofisiólogo español F. J. Rubia, manifiestan que la realidad exterior es en gran parte una construcción de nuestra consciencia. Cada animal, cada persona tiene una percepción del mundo circundante diferente a la de otro, incluso dentro de la misma especie. Pero entonces, ¿cómo podemos utilizar un lenguaje común para describir realidades diferentes? Por la convención de adjudicar un determinado vocablo a un

determinado objeto o situación. Por ejemplo, si hemos acordado utilizar el vocablo azul para definir la sensación visual que originan en la retina los fotones que emite una gran masa de agua en un día soleado, todas las personas denominarán azul a esa sensación visual, aunque sus cerebros generen sensaciones diferentes frente a ese mismo estímulo retiniano. No todos vemos el mismo azul. Es muy posible que nos sintiéramos asustados, como en la más intensa película de terror paranormal, si de pronto fuéramos capaces de percibir el mundo tal como lo está percibiendo la persona que tenemos al lado.

Resulta evidente, según la hipótesis que venimos utilizando en todo el libro, que cualquier característica desarrollada por la evolución en los seres vivos se debe a que les confiere una ventaja de supervivencia y de reproducción. Pero ¿cómo es posible que percibir el mundo de una forma diferente a como es en realidad nos proporcione ventajas de supervivencia? El matemático y físico Chetan Prakash formuló un teorema a este respecto: según la evolución por selección natural, un organismo que perciba la realidad tal cual es nunca tendrá más ventajas que un organismo de la misma complejidad que perciba una realidad ajustada a sus necesidades para una mejor adaptabilidad y supervivencia. Hay dos posibilidades esenciales: la codificación adaptativa y la reconstrucción espacio temporal.

### 1. La codificación adaptativa.

La evolución nos ha proporcionado esta facultad de percibir solo lo que nos es más beneficioso para nuestra supervivencia y de la manera más útil posible. Esto último significa que nuestro cerebro codifica la información que le llega desde los órganos de los sentidos y le confiere atributos inventados, pero que son de utilidad para nuestra supervivencia.

Me van a permitir que, con las debidas reservas, recurra al socorrido ejemplo del ordenador. Si la pantalla que ahora mismo contemplo reprodujera la información real que le está llegando a mi PC a través de la fibra óptica, se llenaría de millones de ceros y unos que pasarían a gran velocidad. Yo me quedaría sin saber qué hacer, ya que esa información no me diría nada. Pero el PC posee unos misteriosos artilugios electrónicos y microchips que son capaces de transformar (quizá mejor, «transducir») esa información binaria de

ceros y unos en códigos de formas, colores y sonidos que me proporcionan una información útil. Nuestro cerebro opera igual. Si nuestra retina detectara y transmitiera a este todos los fotones tal como le llegan, la información visual recibida sería tan inútil para nuestra supervivencia como si recibiéramos ceros y unos. Pero nuestro cerebro dispone de sus propios chips y circuitos neuronales que son capaces de codificar esas señales en formas y colores, aunque no existan realmente en el mundo exterior.

## 2. La reconstrucción espacio temporal.

¿Dónde surge el sabor del chocolate? ¿Qué determina la emoción que despierta la sensación táctil de la caricia de la persona amada? La diferencia de los seres humanos con respecto al resto de los animales, incluidos los simios, es que nuestro ordenador cerebral es de última generación y radicalmente diferente al de los demás seres vivos. Esta supermáquina evolutiva no solo es capaz de falsear la percepción real para que nos sea útil, sino que además lo hace en un contexto espacio temporal. Somos capaces de construir nuestras percepciones del mundo en tiempo real, en ese mismo instante. Estamos recibiendo continuamente estímulos diversos desde el mundo exterior. Algunas de estas informaciones se descartan: no se tienen en cuenta para que no ocupe demasiado espacio de computación cerebral. El resto de la información la procesamos continuamente, la contrastamos con nuestras áreas de memoria y la proyectamos hacia atrás y hacia delante en el tiempo y en el espacio.

La ficción emocionante del olor del pan que elaboraba nuestra abuela se crea cuando unas simples moléculas volátiles que surgen de la masa caliente interaccionan con otras de nuestras células olfativas y estas mandan potenciales de acción a las neuronas de las áreas olfativas. Pero nuestro cerebro no solo reconstruye la ficción de los olores, también dota a estos de un contexto emocional viajando en el tiempo (nuestra niñez) y situándolos en un espacio (la cocina de la abuela). Pero además reconstruimos la realidad aunque no la estemos percibiendo. Mientras comemos ese bollo de pan, nuestra abuela no está delante de nosotros, pero nuestra consciencia la

reproduce e incluso es capaz de evocar en nuestra mente movimientos y secuencias complejas de visiones, sonidos, olores y sabores que solo existen en nuestros más recónditos archivos de memoria.

Todo ello es una complejísima elaboración artificial de nuestra consciencia fruto de la evolución de esa herramienta prodigiosa que es nuestro cerebro y que, sin lugar a dudas, nos confirió unas enormes ventajas de supervivencia al permitirnos un más eficaz cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. La prueba es que estamos aquí.

## La evolución cultural

El aumento de las potencialidades del cerebro y el procesamiento de la energía fuera del propio cuerpo modificaron los mecanismos de evolución de la especie humana. Poco a poco fueron entrando en juego otras posibilidades que modelaron y, en ocasiones, se impusieron al impulso de la evolución biológica. Es la evolución cultural.

Ya hemos reiterado, quizá en exceso, que toda la vida y su evolución se basan en la capacidad de los seres vivos para procesar la energía: captarla del ambiente (fotones solares, alimentos, suelo) y utilizarla (metabolismo) para mantener su orden interno y sobrevivir y reproducirse. Todo el procesamiento de la energía se realiza en el interior del ser vivo. En las plantas, los fotones solares penetran en la intimidad de sus cloroplastos y allí se realizan las complejas reacciones de las fotosíntesis. En los animales, los alimentos penetran en su interior, donde son digeridos y asimilados. La energía que contienen se almacena (como grasa) o se utiliza para generar el trabajo celular. Pero el ser humano, gracias a su mayor inteligencia, ha conseguido una ventaja extraordinaria que no disfruta ningún otro ser vivo: la capacidad de procesar energía fuera de su propio organismo; es la energía extrasomática.

La primera y más importante de las formas de energía extrasomática es el fuego. No es ni más ni menos que el aprovechamiento de la energía de los fotones solares acumulada, por ejemplo, en las partes secas de los vegetales, como la madera. En cuanto nuestros ancestros fueron capaces de una primera domesticación del fuego comenzaron a percibir sus efectos beneficiosos. Los

protegía de los depredadores y del frío, permitía las innovaciones tecnológicas (cerámica, metalurgia), aumentaba la socialización y modificaba los patrones de nutrición mediante el cocinado de los alimentos.

La segunda forma de procesar energía extrasomática tiene que ver con los vestidos, que permitían aportar calor al cuerpo, fundamentalmente evitando la entrada del frío y conservando el propio calor corporal. La fabricación de prendas abrigadas y cálidas tuvo una gran importancia durante los miles de años de glaciación que constituyeron la última etapa de nuestra evolución.

La tercera es la domesticación de los animales. La ganadería es una forma de almacenar la energía de los fotones solares en alimentos, como la carne, la leche o los huevos. La ganadería supuso un aumento de las reservas energéticas en comparación con la energía que proporcionaba la azarosa caza. También la domesticación de los animales permitió utilizar su energía muscular para realizar el trabajo agrícola o de transporte de personas o mercancías.

La cuarta forma es la domesticación de las plantas. Las técnicas agrícolas permitieron acumular grandes cantidades de energía solar en forma de cultivos de diversas plantas y almacenar los excedentes de energía de manera sencilla en silos y graneros.

La quinta es la utilización de la energía eólica, mediante los molinos, y de la acuática, mediante norias y embalses que proporcionaban la fuerza de pequeños saltos de agua.

Todas estas formas de energía extrasomática se fueron desarrollando gradualmente y han permanecido casi inalterables durante miles de años hasta hace poco. Todas las personas que tengan mi edad pueden recordar cómo en su niñez los campos se araban mediante el esfuerzo de un animal, que tiraba del arado, y el de un agricultor, que iba detrás. Las cosas se transportaban en carretas de tracción animal, la mies se segaba a mano con la hoz y el heno con la guadaña. El trigo se trituraba en molinos de viento y muchas herrerías aprovechaban la fuerza de pequeños saltos de agua para mover sus utensilios. Y en muchos hogares se hacía la comida y se calentaban en invierno quemando troncos de madera en un lar o mediante la combustión de carbón vegetal en braseros.

Hace dos siglos se comenzó a sacar la energía de lo que podríamos denominar (con mucha liberalidad) «fotones fósiles». Primero en forma de carbón o turba, que eran los vegetales que habían quedado enterrados por cataclismos de la corteza terrestre y permanecieron bajo grandes presiones durante millones de años. Luego llegó el uso del petróleo y sus derivados, así como del gas, también combustibles producidos a partir de vegetales fósiles. Finalmente llegaron otras formas de energía extrasomática, como la nuclear.

La capacidad de procesar energía fuera del organismo permitió a los seres humanos dar un giro a su tendencia evolutiva, sobre todo en los últimos miles de años. Dio comienzo así la llamada evolución cultural, que traería la civilización, la escritura, la historia y la tecnología.

#### SELECCIÓN NATURAL Y SELECCIÓN CULTURAL

Antes del desarrollo de la inteligencia y de la utilización de la energía extrasomática, el único mecanismo que impulsaba la evolución de los homínidos era la selección natural. Los individuos diferían en sus características genéticas (variabilidad) que, a veces, les proporcionaban unas ventajas de supervivencia y reproducción en un determinado entorno (aptitud diferencial). Se nutrían de manera más adecuada, se defendían mejor, se reproducían más y transmitían a algunos de sus descendientes sus ventajosas características genéticas (herencia). Con el tiempo, esas mutaciones beneficiosas se extendían a toda la población, lo que permitía la diversificación de los grupos de individuos que habitaban entornos variados. Las adaptaciones complejas evolucionaban gradualmente a lo largo del tiempo mediante la suma de pequeñas ventajas provechosas que se iban sumando en las sucesivas generaciones. Por ejemplo, un individuo australopiteco sufrió hace cuatro millones de años una pequeña mutación que le produjo una anomalía en su articulación en la cadera. Resulta que esta anomalía lo facultaba para permanecer erguido sobre las dos patas más tiempo que sus congéneres. Esto le permitía alimentarse mejor y advertir con más antelación la llegada de predadores. En consecuencia, se reprodujo más y algunos de sus descendientes heredaron esa mutación ventajosa, que al cabo de varias generaciones se universalizó en la tribu.



Con el aumento de la capacidad cerebral y los usos extrasomáticos de la energía nació la cultura. A partir de ese momento, los cambios en las aptitudes para cumplir con las Fuerzas de la Vida dejaron de depender exclusivamente del azar de diversas mutaciones genéticas que conferían una discreta ventaja de supervivencia en un entorno determinado. Desde entonces, si los seres humanos querían alimentarse mejor se esforzaban en diseñar trampas más eficaces, controlar mejor el fuego, someter algunos animales y finalmente domesticar algunas plantas. Para defenderse mejor, crearon armas más eficaces y elaboraron sistemas defensivos, como el fuego, las empalizadas de madera o las murallas de piedra. Para protegerse de las inclemencias del tiempo y poder cuidar mejor de sus recién nacidos y así garantizar una mejor reproducción, fueron mejorando la calidad de sus viviendas, desde una simple choza de barro con techo de ramas hasta una edificación de piedra con tejado. A partir de entonces, la especie humana fue capaz de dirigir con su cerebro su propia adaptabilidad, y las ventajas adquiridas no necesitaban transmitirse a sus hijos a través de los genes: se enseñaban mediante el aprendizaje. De esta manera, los descendientes incorporaban a su cerebro los conocimientos que les permitían una mayor ventaja en cualquier medio o condición climática.

Y además, esto se producía a una gran velocidad. Mediante la evolución biológica las cosas sucedían con mucha lentitud. Si se precisaban unos colmillos más largos y más afilados para cazar mejor a sus presas, la transformación sucedía mediante mutaciones genéticas ventajosas que se acumulaban a lo largo de cientos de miles de años de evolución. En la evolución cultural las cosas sucedían con más rapidez. Imaginemos que a un antecesor nuestro se le ocurría, mientras estaba cazando, una idea para mejorar el alcance y precisión de su lanza. Desarrollaba el proyecto en cuanto llegaba al poblado o gruta, se lo mostraba al resto de los cazadores y, en pocos días, todos los miembros de la tribu habían incorporado esa mejora a sus armas. El cambio había sucedido en muy poco tiempo y aún era susceptible de rápidas mejoras.

La teoría de la selección natural se sustenta en lo que se denomina la «transmisión vertical»: los hijos heredan algunas de las características genéticas de los padres. En la evolución cultural también se da este traspaso vertical: los padres enseñan a sus hijos lo que ellos saben. Pero en los grupos humanos primitivos ya se daba la transmisión cultural desde otros individuos no parientes, como podían ser el experto en fabricación de puntas de flecha o la anciana conocedora de las propiedades de las hierbas medicinales. Esta «transmisión trasversal» adquirió gran importancia para la evolución cultural.

Por otra parte, la evolución biológica es ciega: las mutaciones son aleatorias, sin propósito específico, y en ocasiones resultan ventajosas para la supervivencia de esa especie en un entorno determinado, pero en otras no. Una mutación que mejorara la capacidad de regular la temperatura del cuerpo en ambientes cálidos confería una mejor adaptación a los climas calurosos y húmedos, pero resultaba ineficaz para sobrevivir en lugares fríos. Sin embargo, en la evolución cultural la transmisión es intencional. Se enseñaba y se aprendía aquello que era útil para resolver un determinado problema y también los procedimientos para aplicar las mejoras necesarias al diseño original según cambiaban las circunstancias ambientales. Se transmitía, por ejemplo, la técnica de cómo confeccionar abrigo de piel de bisonte, usados en las estaciones frías, pero también la de elaborar vestidos de pieles más finas para las épocas más cálidas. Mediante esos mecanismos la cultura comenzó a evolucionar a lo largo del tiempo. No se trataba de una herencia genética, como las características biológicas, sino de una herencia social a través de la imitación (neuronas espejo), el aprendizaje y otras formas de transmisión cultural no genética.

La evolución cultural comenzó a aplicarse a cualquier tipo de cambio: creencia, conocimientos, costumbres, tecnología, instituciones sociales, formas de lenguaje, prácticas ceremoniales, herramientas, arte, música, ideas, creencias, mitos... La evolución biológica, mediante los sucesivos cambios genéticos, había conseguido desarrollar adaptaciones tales como las dentaduras, los ojos y las alas a lo largo de centenares de millones de años. La evolución cultural consiguió mediante la transmisión cultural crear artilugios como los martillos, las cámaras de fotografía y los aviones en solo unas decenas de miles de años. La evolución cultural copió en numerosas ocasiones

la evolución biológica para proporcionar una solución similar a un problema parecido. La actuación conjunta de las dos fuerzas, biología y cultura, fue lo que permitió el éxito de nuestra especie, que colonizó casi todo el planeta en muy poco tiempo, como ninguna otra especie había podido hacerlo.

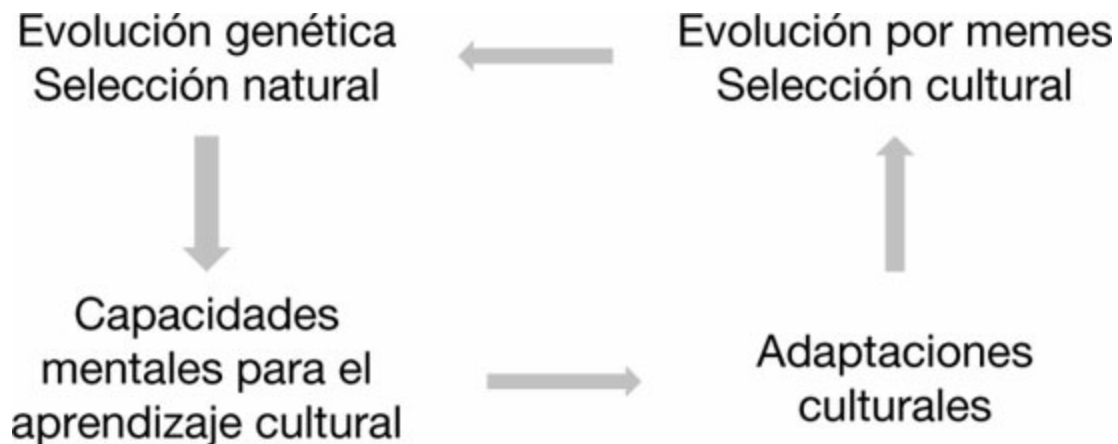


Figura 20.1. Los mecanismos de evolución biológica y cultural están interconectados y en muchas ocasiones actúan de manera conjunta.

En 1976, Richard Dawkins escribió al final de su famoso libro *El gen egoísta* unas páginas sobre estos aspectos de la evolución cultural y definió el concepto de «memes». Lo que los genes eran a la evolución biológica, los memes lo eran a la evolución cultural. La eficacia del término estriba en sus similitudes fonéticas y gráficas con «genes» y con «memoria». En la evolución biológica los genes son replicadores que hacen copias de sí mismos para transmitir las características de los padres a los hijos. Los memes son unidades de transmisión cultural, son los replicadores de la herencia cultural. Dawkins señala que estos ítems culturales (manera de afilar un hacha de piedra, técnica para construir un recipiente de barro, forma de coser una piel para hacer un abrigo, etc.) pueden comportarse como parásitos o como virus, transmitiéndose de la mente de unas personas a las de otras con las que entran en contacto.

El neurofisiólogo William Calvin calificó el cerebro como un sistema evolutivo: en sus estudios lo denominó la «máquina darwiniana» y acuñó el concepto de código cerebral, que permite la reproducción, selección y transmisión de pensamientos y que sería el equivalente al código genético. Los circuitos cerebrales actuarían como máquinas copiadoras. Pero copian de una manera darwiniana, es decir, introduciendo numerosos cambios que continuamente crean variantes. Los genes se replican a sí mismos y lo hacen introduciendo numerosos errores, que son la base de la variabilidad genética sobre la que opera la selección natural. Los memes también se copian a sí mismos y, de igual manera, en el proceso introducen cambios, lo que permite la innovación en los diseños y la propia evolución cultural.

Otros autores sugieren que el cerebro adquirió su completo desarrollo cuando fue capaz de procesar «memes»: ideas, eslóganes, creencias religiosas, leyes, ideologías, etc. Cuando los memes invadieron el cerebro surgió la mente. El cerebro creó los memes y estos conformaron el cerebro. La mente personal de cada individuo se crea poco a poco a medida que es invadida por memes. Ya apuntamos que el cerebro es una especie de computador que nace con un *hardware* de fábrica y que va almacenando memes a lo largo de toda su vida. De la misma forma que el cuerpo es una máquina capaz de procesar genes, el cerebro es un artilugio con capacidad para acumular y procesar memes.

Nacemos con un cerebro provisto solo con el *hardware* básico. Carece de programas que le permitan interactuar con el mundo exterior: a los pocos días de nacer un bebé ve solo sombras imprecisas y apenas oye, solo ruidos confusos. Pero desde el nacimiento comenzamos a recibir estímulos del mundo exterior, fotones que llegan a nuestra retina, vibraciones del aire que alcanzan nuestro tímpano, olores, sabores y tactos que estimulan nuestros receptores correspondientes. Al principio esos estímulos son solo como los ceros y unos de un ordenador, carecen de significado para nuestro cerebro. En los primeros días de vida se va llenando nuestro cerebro de programas, del *software* que transduce esas señales en códigos que nos permiten interpretar e interactuar con el mundo exterior. Durante los primeros años de vida el cerebro de un niño crea 24 millones de nuevas conexiones entre neuronas cada minuto. Ese es el momento vital en el que este órgano está más receptivo, durante ese

enorme crecimiento de las conexiones entre neuronas y de la instalación del *software* necesario. Luego, en la adolescencia y hasta los dieciocho años, se produce una especie de poda de aquellas conexiones menos empleadas, o menos beneficiosas, para así reforzar las conexiones más útiles. Este mecanismo de recorte optimiza la disposición de nuestro cerebro para interaccionar con el entorno y permite el aprendizaje de nuevas habilidades.

Nuestra capacidad mental, en todos sus aspectos, resulta de la acumulación de memes a lo largo de toda nuestra vida. El cerebro humano es una red de más de cien mil millones de neuronas interconectadas entre sí. Cada una de estas manda sus conexiones a otras miles y a su vez recibe conexiones de otras tantas, lo que produce cifras astronómicas para el número de conexiones que posee un cerebro humano. Estos nexos se crean según las experiencias y la información que recibe el cerebro; es lo que se denomina neuroplasticidad. Con la información que se recibe continuamente algunos circuitos se debilitan y otros se refuerzan. Cualquier cosa que estemos haciendo, pensando o sintiendo en cualquier momento está ocasionando modificaciones físicas y funcionales en el cerebro. Por esa razón la consciencia individual varía con la etapa de la vida de cada individuo, desde el nacimiento hasta la vejez.

No todo el mundo está de acuerdo con este asunto de los memes y su analogía con los genes. El choque procede de dos puntos de vista hostiles: el de las ciencias biológicas y el de las sociales. E. O. Wilson, fundador de la sociobiología, defendió una teoría alternativa que ponía en primer plano el hecho de que la mente, el instrumento mediante el cual se adquiere y se transmite la cultura, es un producto de la selección natural diseñado para producir conductas adaptativas en ambientes adecuados. Según esta teoría, que recoge el libro *Genes, Mind and Culture*, publicado en 1981, la mente humana está configurada como un instrumento que permite dar respuesta a necesidades biológicas y dicha configuración se sustenta sobre una base genética.

De todas formas, si los cambios culturales no requieren de replicadores culturales (memes), al menos deben ocurrir cambios culturales adaptativos. Hace ciento cincuenta mil años nuestros antecesores no introducirían ningún

cambio en el diseño de una punta de lanza si ello no permitiera una ventaja para cazar o para defenderse. Hoy ningún fabricante introduce cambios en sus productos si no está convencido de que van a aumentar con ello las ventas.

## LA NUEVA SÍNTESIS EVOLUTIVA

Ya hemos visto que la teoría moderna de la evolución establece que los organismos evolucionan mediante pequeños cambios genéticos aleatorios que son favorecidos por la selección natural. Pero los avances genéticos logrados en los últimos años han mostrado que puede haber algo más. En noviembre de 2016 se reunió en Londres un grupo de expertos bajo los auspicios de la Royal Society of London y la British Academy para debatir sobre las nuevas tendencias en biología evolutiva, que ya habían sido adelantadas un año antes en una publicación titulada *The extended evolutionary synthesis* (La síntesis evolutiva ampliada).

La nueva propuesta que se está debatiendo en todo el mundo introduce nuevos factores determinantes de la evolución biológica, que se suman a los ya conocidos. Uno de ellos es la epigenética, que constituye el conjunto de mecanismos por los cuales una serie de condicionantes ambientales, como el grado de estrés, la composición de la dieta o la exposición a venenos, a las enfermedades infecciosas o a los parásitos, pueden cambiar la expresión de algunos genes sin llegar a modificarlos. Estas modificaciones también se pueden transmitir a la descendencia.

Los cambios epigenéticos son más flexibles que los cambios genéticos. Además, no resultan aleatorios, sino que suceden en respuesta a un determinado estímulo ambiental. Por ejemplo, la cantidad y la calidad de la comida que una mujer recibe cuando está embarazada puede influir en la expresión de determinados genes de su hijo, que no solo permiten una mejor adaptación durante el período fetal a un ambiente pobre en nutrientes, sino que pueden ampliar sus efectos en la edad adulta. A veces los cambios epigenéticos que son beneficiosos durante el desarrollo embrionario de un individuo no lo son luego, cuando nace y se hace adulto. Hay numerosos ejemplos muy bien estudiados. Así, se sabe que la desnutrición de la madre embarazada hace que el feto exprese genes de resistencia a la insulina. Estos

confieren ventajas de supervivencia al embrión durante esa etapa de desarrollo en condiciones de desnutrición materna y da como resultado bebés que suelen nacer con bajo peso. Se ha demostrado que esta condición es la causa de diabetes y problemas cardiovasculares en la edad adulta; es el llamado «fenotipo ahorrador». Muchos de estos cambios epigenéticos llegan a transmitirse a los descendientes de tal forma que se puede heredar ese gen desbloqueado que permite adaptarse de manera más adecuada a las nuevas situaciones ambientales.

La nueva síntesis contempla la posibilidad de otras formas de herencia que afectan la evolución además de la genética y la epigenética. Considera la importancia del comportamiento y del simbolismo; este último solo relacionado con el ser humano. En este sentido, es interesante considerar el mecanismo conocido como «construcción del nicho», un proceso por el cual un organismo altera su entorno o el de otras especies para conseguir una ventaja de supervivencia o de reproducción. Se trata de un tipo de herencia que podríamos llamar ecológica. Y por lo que hemos visto en las páginas precedentes ha tenido una gran importancia en la evolución de los humanos. Una de las consecuencias de la evolución cultural ha sido la capacidad de la especie humana de modificar el entorno en los aspectos geológicos, de la flora y de la fauna para obtener mayores beneficios en relación con las Fuerzas de la Vida.

## Pintores, chamanes y escultores

Hace unos cincuenta mil años, los *Homo sapiens sapiens* comenzaron a llenar las profundidades de las cuevas y las paredes de los abrigos rocosos con pinturas de una gran calidad artística, a fabricar estatuillas de piedra y hueso fieles a los modelos que representaban, a decorar sus herramientas y útiles de caza y de pesca con bellas siluetas de animales, a enterrar a sus muertos mediante complejos ritos funerarios.

Durante la fase final de la última glaciación, el frío no fue uniforme en el planeta y, por tanto, afectó de manera diferente a los seres humanos que por esas fechas ya habían colonizado casi todos los continentes.

Nos señalan los paleoclimatólogos que en Europa se alcanzaron temperaturas medias de hasta 15 °C inferiores a las actuales. Se produjo una gran acumulación de hielo sobre las masas continentales, de varios kilómetros de espesor en algunas zonas del norte de Europa. Esta situación provocó la desaparición de la megafauna del Pleistoceno (mamuts, bisontes, rinocerontes lanudos, etc.), que en aquellas condiciones constituían la fuente principal de alimento para nuestros ancestros.

El secuestro del agua en forma de hielo redujo drásticamente los océanos en más de 120 metros por debajo de su nivel actual. Emergieron numerosas montañas marinas y arrecifes. Las grandes islas asiáticas, Filipinas, Borneo, Java y Sumatra, así como Nueva Guinea, Australia y el resto de Oceanía estaban unidas entre sí o relativamente cercanas. Ello permitió la colonización de numerosos territorios insulares. La región de Beringia, situada entre Siberia



y Alaska, volvió a emerger. América y Asia quedaron unidas mediante una planicie helada que permitió el paso de los seres humanos caminando sobre suelo firme.

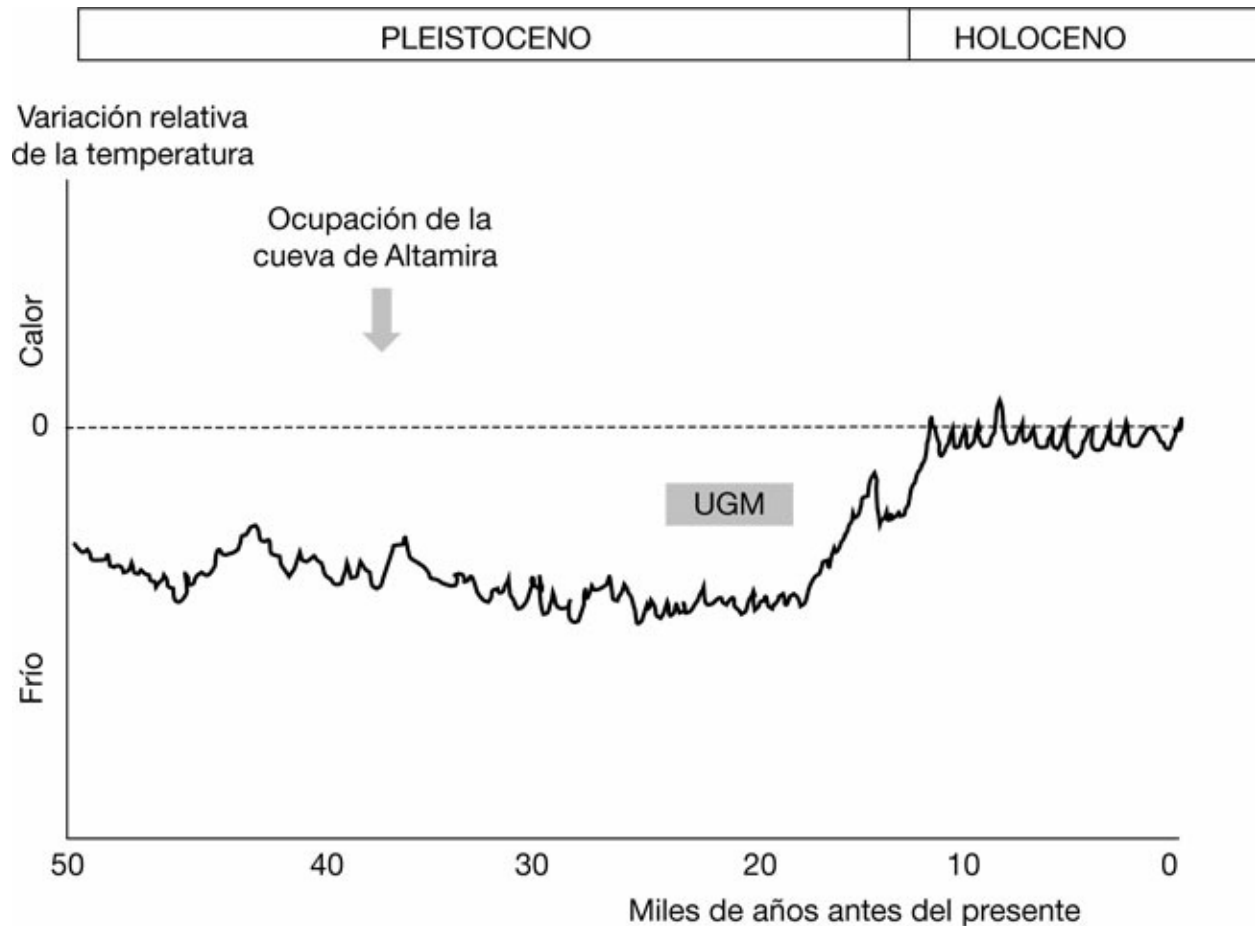


Figura 21.1. Hace unos cincuenta mil años comenzó la tercera fase de la última glaciación. Fue especialmente dura, con temperaturas globales de 8 °C menores que las temperaturas medias actuales. Finalizó con un período agudo de frío que duró desde hace veintitrés mil años hasta hace diecinueve mil años, en el que se alcanzaron temperaturas medias de 10 °C por debajo de las actuales: es el llamado Último Máximo Glacial (UMG).

El secuestro helado de la mayor parte del agua del planeta ralentizó el ciclo hidrológico, lo que condujo a una sequía global e incrementó la aridez de zonas del planeta que antes estaban pobladas de selvas. Los estudios de sedimentos y de paleobotánica muestran que esto ocasionó la desaparición de multitud de plantas y provocó una hambruna de siglos en numerosas regiones. En África se produjo una reducción de las selvas tropicales y un aumento de la extensión del desierto del Sahara.

## EL ARTE PALEOLÍTICO

A lo largo de las páginas precedentes ya se ha reiterado que la evolución no promueve comportamientos y capacidades que no sirvan a una mejora de la nutrición, la reproducción, la defensa o la sociabilidad. Desde este punto de vista, las pinturas, figuras y demás manifestaciones artísticas que surgieron casi de repente (en términos geológicos) hace cincuenta mil años tuvieron que tener un valor adaptativo.

Los objetos que fabricaban nuestros ancestros paleolíticos tenían exclusivamente una utilidad práctica. Servían para resolver alguna situación ambiental. Un ejemplo es la modificación en la técnica empleada para fabricar armas y utensilios. Hasta entonces, los homínidos predecesores fabricaban herramientas llamadas «reductivas», es decir, le iban quitando lo que sobraba a la materia prima utilizada, ya fuera sacar lascas de un trozo de sílex hasta afilarlo, aguzar un palo para hacer una lanza o limar un cuerno para hacer un cuchillo. Pero los *Homo sapiens sapiens* comenzaron a fabricar herramientas de las llamadas «compuestas o adictivas», es decir, utilizaban diversos elementos ya elaborados que juntaban y con los que componían un utensilio que resultaba mucho más eficaz. Por ejemplo, sujetaban una punta de piedra a un palo largo para conseguir una lanza, ataban un cuchillo de sílex a un mango de hueso para cavar con menos esfuerzo o fabricaban un martillo con una roca sujeta a un cuerno. Estos objetos de uso cotidiano se elaboraban con diversos materiales, como la piedra, la madera, el hueso o el marfil. Eran perforadores, cuchillos, buriles, raspadores, arpones, agujas, lanzas, propulsores y azagayas.

Pero además de conseguir una mayor utilidad y perfección técnica, nuestros ancestros comenzaron a decorar sus herramientas con diversos motivos que podríamos calificar de artísticos, como signos geométricos o animales estilizados. Estas decoraciones en las armas y los utensilios debían de estar al servicio de una mayor eficacia a la hora de cumplir su misión: conseguir comida o defenderse de los predadores. En este caso, tendríamos otra prueba más del arte al servicio de las Fuerzas de la Vida: los *Homo sapiens sapiens* podían grabar en su lanza o en su cuchillo el animal que

deseaban cazar o del que esperaban defenderse. Estos dibujos también podrían servir para señalar una jerarquía, la propiedad personal o la pertenencia a un clan, del arma o la herramienta.

## LA CAZA Y LA MAGIA

Durante los siglos y milenios que duraban los más inclementes períodos glaciares, el clima fluctuaba severamente y, en consecuencia, las plantas y los animales de los que se nutrían nuestros ancestros aumentaban o disminuían. A veces estas fluctuaciones se extendían a lo largo de milenios; otras veces duraban tiempos más cortos, de siglos. Las condiciones de vida podían llegar a ser muy duras y la alimentación esencialmente se reducía a la carne de los animales que cazaban, a los peces que lograban atrapar bajo las aguas heladas y a algunos frutos que recolectaban en los breves períodos de bonanza. Es posible que en muchas ocasiones la única alimentación vegetal la consiguieran de la masa de hierba a medio digerir extraída de los aparatos digestivos de los herbívoros que cazaban y que ponían a fermentar. Esta técnica culinaria la siguen practicando algunos esquimales hoy en día con los líquenes y la hierba a medio digerir que obtienen de las panzas de los renos.

En estas épocas de frío, nuestros ancestros habitaban en grutas y, en determinados lugares, pintaban sus paredes con diversos motivos. Los más frecuentes eran los animales que les servían de comida, solos o superpuestos, estáticos o en movimiento: bisontes, caballos, ciervos, jabalíes, cabras y toros. Con menor frecuencia aparecían también elefantes, renos, mamuts, osos y rinocerontes. En ocasiones pintaban peces, reptiles y aves. El estilo era muy diverso e incluía siluetas, dibujos, figuras realzadas y polícromas; a veces el relieve se lo daban aprovechando los resaltes de las rocas y también así conseguían captar la expresividad, los gestos característicos del animal. Alguna de estas obras tiene gran calidad artística.

Nuestros antecesores que habitaban más al sur utilizaron refugios contruidos con ramas o huesos de mamuts y pintaron sus animales sobre paredes rocosas. Durante un tiempo se pensó que la expresión artística de los cromañones se circunscribía a ciertas regiones de Europa, sobre todo en el sur de Francia y el norte de España. Pero el descubrimiento de pinturas de

animales y huellas de manos, idénticas a las halladas en las cuevas europeas, en grutas de la isla de Célebes (o *Sulawesi*, en Indonesia) ha globalizado el arte prehistórico. Allí se encuentran pinturas de gran calidad, de bóvidos y cerdos típicos de aquella zona y también figuras humanas y siluetas de manos. Estos hallazgos dieron al traste con la pretendida explosión creativa paleolítica eurocéntrica. Es un misterio cómo estas manifestaciones surgieron al mismo tiempo y con las mismas características técnicas en lugares tan distantes como pueden ser las cuevas de El Castillo, en Cantabria (España), y las cuevas de la isla de Célebes (Indonesia). Hace cuarenta mil años, ningún artista era capaz de viajar desde el norte de España hasta Indonesia en el tiempo que duraba una sola vida. Además de las pinturas también se han encontrado en diversos lugares algunas figuritas de animales, de cuerpo entero o solo sus cabezas, realizadas en hueso y en piedra.

Todas estas manifestaciones artísticas no eran un pasatiempo para llenar el vacío de las largas y frías noches glaciales o para fabricar un juguete para niños. Estaban al servicio de la utilidad, de una mejor alimentación, y formaban parte de una caza mágica, algo así como atrapar en piedra el espíritu del animal. Posiblemente también tenían una función docente, para informar e instruir, y se usaban para enseñar a los más jóvenes los secretos y estrategias de la caza y que aprendieran a reconocer a los animales, a interpretar sus huellas y a entender su comportamiento. Se trataba, por lo tanto, de una expresión simbólica compleja al servicio de hacer más eficaz la nutrición.

## EL EROTISMO GRABADO EN PIEDRA

La otra Fuerza de la Vida a la que nuestros antecesores se dedicaron con pasión, como lo demuestran sus pinturas y esculturas, fue el sexo y la reproducción.

Las esculturas en madera, piedra, terracota, asta o marfil tienen como temática, sobre todo, las figuras de mujeres de anatomías obesas, con pechos exuberantes y nalgas abundantes en contraste con las extremidades y la cabeza, que son diminutas, y las caras sin relieves. Estas venus abundan en Eurasia. Son símbolos de la fertilidad que resaltan la importancia de poseer un buen

contenido de reservas adiposas para la fecundidad femenina, como ya se ha tratado. A veces se han encontrado estas venus pintadas en las paredes de algunas grutas.

También se relacionan con la fertilidad las numerosas representaciones de vulvas, como abstracción máxima del órgano femenino reproductor, que con más o menos detalle decoran numerosas cuevas paleolíticas. Las vulvas aparecen grabadas sobre rocas o pintadas, solas, aisladas o en compañía de otros símbolos y signos abstractos. En el abrigo de La Ferrassie y en el abrigo de Castanet (Dordoña), ambos en Francia, se hallan algunos ejemplos. Son vulvas aisladas grabadas en piedra. Un caso singular es el de la cueva de Tito Bustillo (Asturias, España), donde hay un conjunto pictórico con tal cantidad de especímenes de vulvas, con características anatómicas tan variadas y precisas, que más parece que el pintor fue inventariando desde ese peculiar punto de vista a las mujeres de la tribu. A esa gruta se la ha denominado «el santuario de las vulvas».

El falo del macho de la especie también suele estar representado en abundancia. Hay pinturas que representan a hombres de cuerpos estilizados pero que exhiben un erecto y desmesurado pene, como el que se encuentra en la cueva de Peñascosa, en Albacete (España). También hay numerosos menhires fálicos, muy abundantes en Portugal, y múltiples representaciones fálicas en piedra o en hueso encontradas en diversas localizaciones de Francia y Alemania. Dentro de este contexto erótico reproductor, habría que destacar el falo esculpido en piedra, datado en veintiocho mil años, encontrado en la cueva de Hohle Fels, en Ulm (Alemania). Su tamaño de veinte centímetros de largo y tres centímetros de grosor así como su exquisito pulimentado hacen suponer que estaba destinado a algún uso erótico muy específico.

## LOS CHAMANES

Uno de los requisitos en cualquier tribu o grupo humano con creencias espirituales o mágicas es la existencia de un guía o chamán. Parece que también disponemos de pruebas gráficas de su existencia en la prehistoria. Abundan las figuras híbridas formadas por la fusión de rasgos humanos y animales, imágenes de aspecto grotesco. Estas representaciones están

ejecutadas de un modo descuidado y tosco, si se las compara con las de animales de la misma época. Se observa, sobre todo, la inclinación a plasmar rostros indeterminados. Hay numerosos ejemplares de estas figuras híbridas. Una de las más características se halla en el santuario de Trois-Frères (Ariège, en el Pirineo francés): una figura que presenta extremidades humanas y numerosos rasgos animales. Tiene la cabeza barbada con cornamenta de reno y ojos de lechuza, hocico de felino, cola de caballo y sexo de forma humana. Su posición destacada sobre el resto de las pinturas de animales de la misma cueva muestra que se le otorgó un rango superior respecto a las otras figuras representadas. Otro ejemplar relevante se encuentra en la profundidad de la cueva de Lascaux, en Montignac (Dordoña, Francia). Reproduce una escena, lo cual no suele ocurrir en el arte paleolítico, en la que aparece un hombre con el falo erecto y cabeza de pájaro. La representación es absolutamente esquemática y se reduce a un tronco alargado con las extremidades en forma de palos acabados en líneas. Contrasta con el bisonte que hay al lado, porque en este se aprecia el detalle del pelaje y se capta la masa volumétrica expresada a través del contorno de las rocas. El animal se desploma herido con el vientre abultado ante el hombre. Este acusado contraste entre la figura humana y la del animal será constante a lo largo de todo el Paleolítico. La escena ha sido interpretada como un ritual mágico.

Se cree que estas extrañas imágenes muestran a personas ataviadas con máscaras y atributos animales para realizar ceremonias rituales. Representan al chamán de la tribu, un intermediario entre las fuerzas ocultas de la naturaleza y los hombres. Probablemente, a este personaje se le atribuían unos poderes fuera de lo común que le permitían establecer la necesaria comunicación con las energías que rigen el universo y así favorecer la caza, proteger de los peligros y promover la reproducción. Solían ser personas de edad avanzada, con frecuencia mujeres, que por sus muchos años vividos habían acumulado conocimientos y experiencia, y eran capaces de interpretar los cambios climáticos, las costumbres de los animales y sus migraciones, el crecimiento y propiedades de las plantas, sus usos medicinales. Se tenía en cuenta a los espíritus de la naturaleza, del agua, de los bosques, de la lluvia, del Sol y de la Luna. Es indudable que los primeros sentimientos religiosos,

los primeros cultos espirituales, las primeras deidades dieron pie a objetos naturales o artificiales a los que se les adjudicaban las facultades de proporcionar beneficios de supervivencia y de reproducción.

Muchas imágenes son signos, de difícil y discutible interpretación, con formas muy variadas, que integran conjuntos homogéneos o mezclados con animales o seres humanos y ofrecen un variado repertorio gráfico: puntuaciones en serie, líneas cortas verticales u oblicuas, rectángulos con cuadrículas en su interior, óvalos abiertos o cerrados, con una línea central en el sentido del eje máximo (vulvas), etcétera. Si en el caso de los animales se ignora el porqué de las representaciones, en el de los signos el problema de su interpretación es aún mayor, debido a su esquematismo y abstracción.

En las dos grutas más significativas del arte paleolítico, Lascaux y Altamira, situadas en Francia y España, respectivamente, hay símbolos geométricos trazados en rojo junto a figuras de animales. Abundan, sobre todo, las líneas paralelas, que se entrecruzan en cuadrículas, y las formas circulares. En España, aparecen signos y motivos abstractos en las cuevas de la cornisa cantábrica, como en El Castillo, Las Chimeneas y La Pasiega, en Cantabria, y en el sur de la Península, como en La Pileta (Málaga), donde hay un verdadero muestrario de líneas curvilíneas, redondas y serpentiformes.

## EL MISTERIO DE LAS MANOS PINTADAS

Además de las figuras de hombres y mujeres, en esta época aparecen numerosas pinturas de manos en colores rojo y negro. Estas representaciones están hechas mediante dos métodos diferentes. Uno de ellos consistía en la difusión de los pigmentos soplándolos a través de una caña sobre la mano, que se usaba como plantilla. El resultado obtenido era la impresión en negativo de la mano, que queda silueteada con un halo de pintura de límites imprecisos. En el segundo método, por el contrario, el resultado se obtenía mediante la huella de la palma impregnada de pintura y presionada sobre la roca, lo que proporcionaba una imagen en positivo de la misma. Son más abundantes las manos en negativo que en positivo; asimismo, es más abundante la representación de la palma izquierda que la de la derecha. Las manos se distribuyen a lo largo de las paredes de las cuevas a modo de frisos, en grupos

o aisladas. Los ejemplos de formas aisladas, como ocurre en Gargas (Pirineo francés) o en la cueva de El Castillo (Cantabria, España), adquieren una impresionante fuerza mágica y, por supuesto, evocadora. También se han encontrado manos pintadas idénticas a las pirenaicas y cántabras en las cuevas de la isla indonesia de Célebes.

## LOS RITOS FUNERARIOS

Los enterramientos rituales demuestran que los ancestros que los practicaban ya eran capaces de constatar el hecho de la muerte hasta el punto de exaltar la memoria de los muertos y, probablemente, confiar en la pervivencia de sus espíritus en algún tipo de comunidad de difuntos. Es el comienzo de la creencia en la prolongación de la vida más allá de la muerte, la esperanza de llegar a un lugar especial, donde se satisfacerían para siempre todas las necesidades en relación con las Fuerzas de la Vida o donde se accedería a un estado que no requiriese tales cumplimientos.

Los ritos funerarios aparecieron durante el Paleolítico medio. Es posible que los neandertales enterraran a sus muertos en tumbas sencillas y sin ajuar funerario. Las sepulturas se realizaban, con preferencia, en fosas, y los individuos se enterraban en posición fetal. Pero fue el hombre de Cromañón, nuestro antecesor más directo, quien comenzó a enterrar a sus muertos con rituales complejos en los que se ataviaba al difunto con su ajuar, adornos y los atributos de que había gozado en vida: dientes de animales, conchas, collares, flores, armas, etc.

Hace cuarenta mil años un enterramiento ritual en el lago Mungo en Australia, en el que el cadáver está espolvoreado con abundante cantidad de polvo ocre rojo, demuestra que en ese y otros lugares ya existían en nuestros ancestros un rudimentario interés religioso. En Europa, la inhumación ritual más antigua e indiscutible es la de un chamán enterrado hace unos treinta mil años en la actual República Checa. En el yacimiento de Sungir, en Rusia, bajo una gran losa de piedra sobre la que se había colocado un cráneo de mujer apareció el cadáver de un hombre de unos cincuenta años que había sido depositado, en el momento de su enterramiento, sobre un lecho de brasas incandescentes. Veinte brazaletes hechos con colmillos de mamut cubrían sus



brazos y sobre su pecho se había colocado un collar de dientes de zorro y un colgante de piedra. En Grimaldi (Liguria, Italia) existe la llamada cueva de los Niños, donde se encontraron los restos de una mujer adulta y de un adolescente. La posición forzada de los esqueletos indica que fueron enterrados juntos, metidos en un saco de cuero. Otro hallazgo sobrecogedor fue el del enterramiento triple descubierto en una fosa poco profunda en Dolní Věstonice (República Checa), que acoge los restos de tres individuos de entre diecisiete y veintitrés años. Todos estaban orientados con la cabeza hacia el sur. El del centro correspondía a una mujer con graves malformaciones y con vestigios de un feto en las proximidades de su pelvis. El de su izquierda, depositado boca abajo, tenía uno de sus brazos apoyado en la joven, como si estuviera protegiéndola. Tanto él como su compañero, colocado al otro lado de la mujer, presentaban signos de muerte violenta. En el momento del enterramiento, la estructura había sido cubierta con maderos y posteriormente incendiada y tapada con tierra.

## LA REVOLUCIÓN PALEOLÍTICA

Se han propuesto numerosos mecanismos para explicar esta explosión de creatividad que sucedió hace unos cuarenta mil años, en plena glaciación. Pero todo son especulaciones sin ninguna base científica. Hay opciones para todos los gustos. En primer lugar, hay que considerar que para millones de habitantes del planeta que practican alguna religión esto se debe a que un ser superior (un dios) infundió algún tipo de activador espiritual (el alma) que confirió al ser humano todos aquellos atributos que nos diferencian de los animales.

Recurriendo a mecanismos genéticos más convencionales como las mutaciones espontáneas aleatorias que han gobernado toda la evolución biológica, parece poco probable que en tan poco tiempo se produjeran tales cambios genéticos que proporcionaran un nuevo recableado neuronal o el desarrollo de un nuevo *software* que permitiera realizar al cerebro tareas que antes no hacía. Debemos tener en cuenta que esas pequeñas mutaciones a lo largo de varios millones de años permitieron el ascenso desde las escasas habilidades del *Ardipithecus ramidus*, hace seis millones de años, similares a

las de un chimpancé actual, hasta los toscos útiles de piedra del *Homo habilis*, hace tres millones de años. O más tarde a las herramientas un poco más elaboradas del *Homo ergaster*, hace un millón de años, o incluso a las que era capaz de elaborar el *Homo sapiens neardenthalensis*. Pero de lo que estamos hablando es de una transformación global y cuantitativa de la mente de nuestros ancestros hace cincuenta mil años.

Otra posibilidad es la llamada hipótesis del síndrome del sabio. En este caso se propone que las manifestaciones artísticas que surgen en plena glaciación no tienen por qué ser el resultado de un avance en las capacidades de la totalidad de la población, sino en la de unos pocos individuos que desarrollaron esta especie de anomalía de creatividad. La hipótesis surge de la comparación con lo que sucede con el síndrome del sabio (*savant syndrome*) que explica las manifestaciones mentales extraordinarias (artísticas, de cálculo o mecánicas) que se presentan a veces en individuos aquejados de algún grado de deficiencia mental, fundamentalmente en niños. Según esta teoría, las manifestaciones artísticas solo serían meros «accidentes cognitivos» y no el resultado de una evolución general de la población.

Insisto: son numerosas las teorías propuestas, pero ninguna de ellas tiene un refrendo científico que la sustente. Es indudable que nuestros ancestros adquirieron esas habilidades tecnológicas y artísticas y desarrollaron una nueva, bella y eficaz tecnología porque lograron una mayor capacidad de socialización, de intercambio de conocimientos y de materiales, una mente capaz de imaginar un mundo inmaterial poblado de espíritus a los que rendir culto y el creer en la posibilidad de una vida más allá de la muerte. Solo dos aspectos de nuestra evolución reciente podrían proporcionar los medios para fomentar esa mayor socialización. Vamos a comentar ambos.

## EL LENGUAJE

Todos los animales son capaces de emitir sonidos, más o menos elaborados, con lo que transmitirse la información necesaria para su supervivencia. Son sonidos elementales (rugidos, bramidos, trinos, aullidos, etc.) al servicio de las Fuerzas de la Vida: indicar la presencia de alimento, anunciar los deseos o disponibilidad para reproducirse, advertir de algún peligro o reunirse con el

resto de los animales. Por ejemplo, una comunidad de chimpancés mantiene relaciones sociales mediante gestos y voces (gruñidos, aullidos, ronroneos, etc.) que son suficientes para permitirles sobrevivir en el entorno selvático en el que habitan. Incluso desarrollan un cierto aprendizaje por el método simple de la imitación (neuronas espejo).

Pero la capacidad de emitir sonidos modulados, las palabras, requiere, como mínimo, un sustrato anatómico a tres niveles. Por una parte, una estructura de la laringe y del llamado hueso hioides con una disposición anatómica capaz de emitir una gran variedad de sonidos y de modularlos en una gama amplia de características. Por otra, debe existir un adecuado sistema auditivo capaz de descodificar los sonidos del lenguaje. En tercer lugar, además del oído y sus componentes, tiene que haber unas áreas cerebrales que interpreten los sonidos que reciben y controlen los músculos que intervienen en la emisión de estos.

A partir de fósiles de neandertales y de especies anteriores como el *Homo antecessor* de Atapuerca se deduce que el género *Homo* ya poseía la capacidad anatómica de modular sonidos desde hace un millón de años. Ya hemos señalado que estos parientes próximos eran capaces de la elaboración de herramientas y armas con un cierto grado de complejidad, pero sus expresiones simbólicas son escasas y muy rudimentarias. Los homínidos como el *Homo antecessor*, el *Homo heidelbergensis* y los *Homo sapiens neanderthalensis* serían capaces de pronunciar palabras para designar personas, objetos, animales y plantas aunque la ausencia de un pensamiento sintáctico obligara a que estas se acompañaran de gestos para indicar las acciones. Sería como en los diálogos de las películas clásicas sobre el Lejano Oeste cuando el jefe indio, que apenas conocía alguna palabra en inglés, decía: «Yo, búfalos, allí». Y se golpeaba el pecho y apuntaba el dedo en una dirección para expresar que él había visto búfalos por aquellas montañas. Pero ya este lenguaje no sintáctico favorecía una mayor socialización e incrementaba las posibilidades de transmisión de conocimientos útiles para la supervivencia, como la caza, la fabricación de utensilios, la recolección de plantas o el hacer fuego.

El lenguaje articulado y de estructura sintáctica, con sujeto, verbo, predicado y complementos, es exclusivo del *Homo sapiens sapiens*, pues no depende del aparato fonador, sino de la estructura cerebral que controla el habla. Es un extraordinario instrumento de comunicación, ya que, a diferencia de los gritos y gruñidos de los simios, nuestro lenguaje articulado y sintáctico permite elaborar un número infinito de frases, acompañadas de una gama enorme de entonaciones que nos faculta para transmitir una gran cantidad de información y sutilezas sobre el mundo y nosotros mismos.

Harari apunta a que, ya desde sus inicios, uno de los usos fundamentales del lenguaje fue estar al servicio de los cotilleos cotidianos de la tribu, lo que afianzaba la socialización del grupo. Permitía comentar quién dormía con quién, aunque también servía para alertar sobre un león merodeando por el poblado. La prueba más clara de la vinculación del lenguaje humano al chismorreo es que hoy el noventa por ciento de la comunicación a través de los extraordinarios medios de que disponemos (teléfono, correo electrónico, redes sociales de Internet, prensa, televisión, radio, etc.) se centra en el más simple y llano cotilleo, mientras que un cinco por ciento se emplea en transmitir historias inventadas (cine, novelas, series de televisión) y solo otro cinco por ciento se utiliza para proporcionar información de interés cultural o relacionada con nuestra supervivencia. Los animales se comunican para informar, advertir, seducir, etc., sobre cosas que existen en el entorno en el que se encuentra el rebaño o grupo de animales. Pero otra de las características fundamentales del lenguaje humano es la de transmitir información sobre cosas que no existen, que nunca hemos visto, oído, olido o tocado.

No existe ninguna prueba que directamente demuestre que nuestros antepasados cromañones fueran capaces de comunicarse de una manera similar a como lo hacemos nosotros hoy día; ni que los neandertales no lo hicieran. Pero se puede deducir si consideramos que los genetistas han demostrado la lentitud a la que ocurren los cambios genéticos en una determinada especie. Se calcula que en los últimos cincuenta mil años de evolución nuestro genoma ha cambiado en menos de un 0,01 por ciento de sus genes. Todos los datos paleoantropológicos y genéticos obtenidos a partir de fósiles de cromañones sugieren que la adquisición del lenguaje sintáctico no estaba entre el cometido de los pocos genes modificados. Se han propuesto

algunos genes relacionados con el lenguaje, pero la cuestión es confusa. Uno de los candidatos más prometedores es el que codifica la síntesis de la proteína FoxP2; pero este gen también está presente en el ratón y estos animalitos solo hablan en las películas de dibujos animados.

El lenguaje articulado tuvo una gran importancia como vehículo para el desarrollo de la socialización y el aprendizaje. Y estos fueron mecanismos importantes para el avance tecnológico, el desarrollo de la espiritualidad y la mentalidad mágica y religiosa y, por ende, para la creación artística.

## LA FEMINIZACIÓN DE LOS MACHOS

Características como la tolerancia social y la cooperación en el grupo fueron decisivas para que nuestros ancestros pudieran superar la dureza de los miles de años de glaciación, promover una mayor socialización y desarrollar el arte, la magia y las innovaciones tecnológicas. A estas cualidades contribuyó una modificación importante que experimentó el ser humano: la feminización de los machos. Diversos estudios sugieren que el auge repentino de las manifestaciones artísticas y culturales coincidió con un descenso en los niveles de testosterona, la principal hormona masculina, que condujo a una feminización de los machos de la especie. Los neurotransmisores y las hormonas que transmiten la agresividad, el dominio social y sexual y otras conductas similares no fosilizan, pero ejercen efectos sobre numerosos tejidos: por ejemplo, determinan un mayor desarrollo de las masas muscular y ósea.

Esto se ha podido estudiar en una de las manifestaciones más características de los niveles de testosterona, como es el tamaño y la forma del cráneo y la estructura facial. Sabemos que en todos los mamíferos hay notables diferencias entre las cabezas y las caras de los machos y de las hembras, cuya causa es hormonal. Para verificar esta hipótesis se realizó un amplio estudio en más de 1.400 cráneos fósiles arcaicos y modernos: trece ejemplares de entre doscientos mil y noventa mil años, 41 fósiles datados entre treinta y ocho mil y diez mil años y 1.367 unidades modernas procedentes de individuos de todos los continentes. Los resultados fueron esclarecedores: se observó una reducción significativa en la masculinidad

craneal y facial desde los cráneos más antiguos hasta los actuales. Los fósiles más modernos mostraban estructuras faciales más pequeñas y redondeadas, con arcos supraciliares menos pronunciados. Este dato de los arcos supraciliares, que a mayor tamaño sugieren mayor efecto de la testosterona, es de especial interés: se reducía su tamaño significativamente entre los fósiles de noventa mil y treinta mil años de antigüedad.

Todo indica que, entonces, se produjo un descenso de la testosterona en los machos, lo que redujo la agresividad y mejoró la conducta social, proporcionándoles un temperamento más sociable que les permitió mayor cooperación y mayor capacidad de aprendizaje entre unos y otros. Algo parecido se ha comprobado que sucede en nuestros parientes lejanos, los chimpancés. Los bonobos machos, que son muy sociables y poco agresivos, tienen niveles de testosterona inferiores a los machos de chimpancés, los cuales expresan mayor agresividad y competitividad y se enzarzan en peleas constantes durante el ascenso de los andrógenos en la pubertad. Además, los machos bonobos tienen caras más redondeadas y menores arcos supraciliares que sus primos los chimpancés; es decir, son más femeninos.

Estas características de menor agresividad pudieron ser seleccionadas en un período corto de tiempo. Es algo parecido a lo que los ganaderos hacen al escoger los machos más dóciles del rebaño, cuando van descartando los de mayor agresividad y solo permiten la reproducción a los mansos. Al cabo de unos pocos años, en la ganadería no hay peleas ni peligro de ataques al propio dueño.

El frío extremo, la escasez de alimentos, el incremento demográfico, la caza cooperativa, la convivencia continua en espacios cerrados durante cientos de miles de años debieron de ocasionar frecuentes situaciones de gran violencia y falta de cooperación. Pero fueron esas mismas circunstancias las que permitieron el aislamiento o la eliminación de aquellos individuos más agresivos y antisociales que ponían en peligro la convivencia y la supervivencia del grupo. Poco a poco, milenio a milenio fueron evolucionando temperamentos más cooperativos, permitiendo una mayor proximidad física, que favorecía la transmisión de las innovaciones artísticas y tecnológicas a partir de modelos y maestros. Transcurridos unos pocos milenios, la mayoría

de los machos de la especie tuvieron menores niveles de testosterona y de agresividad, por lo que lograron mayores niveles de sociabilidad y cooperación. Y así la especie prosperó.

## LA DULCE ADAPTACIÓN AL FRÍO

Nuestros ancestros debieron de desarrollar mecanismos de defensa frente a las situaciones climáticas extremas que soportaron durante la última glaciación. ¿Cómo no se les congelaban las extremidades a aquellos que habitaban el norte de Europa bajo tanto frío? Por muy bien que tuvieran protegidos los pies, las manos y la cara con pieles durante sus largas jornadas de caza sobre terrenos helados estaban expuestos a las congelaciones. Estudios recientes ponen de manifiesto que nuestros ancestros, en especial aquellos que habitaron regiones de clima especialmente frío del norte de Europa, tuvieron algunas ayudas adaptativas para sobrevivir a esas difíciles condiciones. No solo sirvieron sus habilidades para cazar animales y confeccionar abrigo y botas con sus pieles; también algunas adaptaciones metabólicas vinieron en su ayuda.

Investigaciones recientes han explicado la capacidad que tienen algunos animales para sobrevivir al frío. Por ejemplo, la rana de la madera de Canadá permanece congelada entre la hojarasca del bosque hasta que llega la primavera y con el calor se descongela y vuelve a la vida. ¿Cómo consiguen este prodigio? Este batracio recurre a reducir la actividad de la hormona insulina, cuya misión es bajar la glucosa en la sangre, y aumentar la del glucagón, que hace crecer la glucosa en la sangre (y en los líquidos biológicos) más de tres veces por encima de su valor normal. Esta y el resto de los azúcares son capaces de bajar el punto de congelación de los líquidos en los que están disueltos: son anticongelantes naturales. Mediante este mecanismo hormonal y metabólico muchos animales que viven en climas fríos previenen los riesgos de congelación de sus tejidos: las altas cuotas de glucosa evitan que se formen las finas agujas de hielo que romperían las células y ocasionarían la muerte (necrosis) de los tejidos más expuestos al frío.

Esto se asocia a otra cuestión interesante que, aparentemente, no tiene nada que ver con el asunto que estamos tratando. ¿Por qué razón la prevalencia de diabetes tipo 1, la llamada juvenil o insulino dependiente porque estas personas carecen de insulina en su organismo, es tres veces más elevada en los países del norte de Europa que en el resto del continente o del mundo? ¿Por qué muchos de los casos de diabetes tipo 1 se inician durante los meses de invierno?

Un mecanismo parecido al de los animales adaptados a sobrevivir en climas fríos pudo estar operativo en nuestros ancestros, los que se asentaron en el norte de Europa que permaneció permanentemente cubierto de hielo durante los miles de años que duró el llamado Último Máximo Glacial. En aquella época la esperanza de vida era breve, casi no llegaba a los cuarenta años de edad, y la alimentación se basaba casi exclusivamente en la carne y el pescado, en unos escasos vegetales y en nada de alimentos dulces. En tales condiciones, una disminución de la insulina ocasionaba un aumento de la glucosa en la sangre y en los líquidos corporales. La hiperglucemia evitaba las congelaciones, sin causar grave daño a la salud. Pero con el aumento de la esperanza de vida y los cambios en la alimentación, la diabetes tipo 1 se ha convertido en una enfermedad grave que requiere tratamiento. Hoy día, la facilidad de disponer de inyecciones y de artilugios eficaces para administrar la insulina humana artificial, una adecuada alimentación y la práctica regular de ejercicio físico permiten controlar con eficacia este problema.

Al parecer, esta característica de reducir la insulina para que aumente la glucosa en respuesta a un frío intenso y así proteger frente a las congelaciones está asociada a algunas mutaciones genéticas. Un conjunto de variaciones del ADN que se heredan juntas (haplotipo), relacionado con el padecimiento de diabetes tipo 1 alcanza a entre un cuarenta y un cincuenta por ciento de la población de los países escandinavos y menos de un veinte por ciento en el resto de Europa. Solo hay una región en el sur de Europa en la que este haplotipo y la prevalencia de diabetes alcanza niveles escandinavos: Cerdeña. Una posibilidad, entre otras, es que eso se deba al asentamiento de vikingos, que durante sus correrías hacia el sur ocuparon esta isla hace mil años y transmitieron parte de sus genes de predisposición a la diabetes a los lugareños.



## LOS SERES HUMANOS HACE VEINTICINCO MIL AÑOS

Se calcula que hace veinticinco mil años solo unos pocos millones de seres humanos habitaban por todas las regiones del planeta, dispersos en miles de pequeñas tribus separadas unas de otras por muchos kilómetros y, a veces, por barreras geográficas insalvables, cada cual con su propio lenguaje y su propia cultura, creencias y tradiciones. Eran nómadas, cazadores recolectores, que andaban en continuo desplazamiento dentro de su territorio. Las tribus vecinas competían por los recursos y por las mujeres, en ocasiones luchaban entre sí, pero también establecían contactos amistosos y comerciales, incluso se reunían para cazar juntas o para celebrar determinadas festividades.

Esta norma de vida fomentaba la creatividad y el bienestar. Cada tribu fabricaba sus herramientas, sus lanzas y cuchillos, reparaba las ropas y el calzado con unos patrones propios, sabía poner trampas para cazar, disfrutaba de una gran variabilidad dietética, que incluía prácticamente cualquier tipo de animal o vegetal susceptible de ser comido y digerido. Esto garantizaba un aporte nutricional completo, aunque sus miembros no comieran mucho. Estudios antropológicos actuales en poblaciones primitivas de cazadores recolectores muestran que se nutren normalmente de más de doscientos tipos de alimentos diferentes. Sin embargo en nuestra sociedad desarrollada, cada vez nos alimentamos de una mayor cantidad de menor número de alimentos distintos. Es lo que yo denomino «el embudo alimentario», que constituye uno de los más graves problemas nutricionales de las sociedades desarrolladas: ingerimos más cantidad de una menor variedad de alimentos. Esto ocasiona la paradoja de que haya obesos desnutridos. Este problema del embudo alimentario es hoy más acusado en los extremos de la vida: adolescentes y ancianos. Si queremos tener una alimentación ajustada a nuestro diseño evolutivo debemos de consumir la mayor variedad posible de alimentos diferentes.

La tribu estaba regida por la más anciana o por un chamán que ejercería sus funciones de orientación sobre la base de creencias animistas. Normalmente se trataba de mujeres, como ha sugerido la antropóloga Helen Fisher. La esperanza de vida de los hombres en la prehistoria era muy breve, muy inferior a la de las mujeres, a causa sobre todo de su mayor exposición a

las muertes por accidentes y predación. De forma habitual, los clanes prehistóricos estaban regidos por viejas mujeres sabias. Como señala Harari, nuestros antecesores ya eran capaces de creer que la gran piedra que se erguía sobre la colina al lado de la aldea tenía deseos y necesidades, que había que llevarle alimentos, que podía premiarlos o castigarlos y proporcionarles o no una caza abundante. Las personas podían comunicarse con los espíritus o fuerzas inmateriales que regían todas las manifestaciones de la vida que rodeaba a la tribu. Solo había que saber cómo hacerlo, y quien tenía las claves para lograrlo era el o la chamán.

A esos espíritus representados en la gran roca de la colina se le pedían favores siempre relacionados con las Fuerzas de la Vida: buena caza, alivio de enfermedades, curación de heridas, fertilidad. Comenzaron a narrarse mitos e historias al amor de la lumbre en las largas noches de invierno. Los mitos cohesionaban a la tribu y potenciaban la disciplina y la socialización. Por aquí deben de andar los fundamentos de lo que luego se convertiría en la religión: convencer a la gente para que se comporte de una manera determinada con la promesa de una recompensa (satisfacción de todas sus necesidades y felicidad) en otra vida.

Harari sugiere que elaborar mitos e intentar que toda la gente los crea y los acepte constituye uno de los fundamentos de la fase final de nuestra evolución. Esto confiere un poder extraordinario a los *Homo sapiens sapiens*, pues permite que millones de individuos que ni se conocen ni se verán nunca cooperen, trabajen y luchen en una misma dirección. Ya veremos que esta es la clave para lo que luego vendrá: creación de imperios, religiones, leyes, progreso cultural y tecnológico, etc., hasta llegar al estado actual de nuestra especie.

## Los ganaderos megalíticos

Hace veinte mil años nuestros antepasados dejaron de pintar paredes, aumentaron su movilidad y se hicieron nómadas. Aprendieron que era más útil domesticar y tener encerrados a unos cuantos animales que arriesgarse a la incierta y peligrosa caza: nació la ganadería. No abandonaron su espiritualidad, ni la magia, ni los sentimientos religiosos y funerarios, sino que estos se acrecentaron, haciendo que se dedicaran a edificar numerosas construcciones de piedra y barro, desde simples monolitos hasta enormes estructuras megalíticas.

El final de la última glaciación comenzó hace unos veinte mil años con la fusión de la mayor parte de los casquetes de hielo en el hemisferio norte. No se conocen los factores que desencadenaron este calentamiento global progresivo, pero pudieron intervenir hechos astronómicos que incrementaron la radiación solar, sobre todo en verano. De cualquier forma, se comenzaron a fundir los hielos, lo que redujo la capacidad de reflejar al espacio gran cantidad de la energía solar. También cambiaron las corrientes marinas y los regímenes de vientos. Los datos proporcionados por los análisis de los hielos fósiles de Groenlandia y de la Antártida indican que también se produjo un aumento del CO<sub>2</sub> y de otros gases invernadero (metano, vapor de agua), lo que también contribuyó al calentamiento global. Del estudio de los corales fósiles y de los sedimentos marinos se deduce que el deshielo produjo una elevación del nivel de los océanos de unos 120 metros en diez milenios.

En el hemisferio norte, los veranos comenzaron a ser más cálidos y los inviernos menos fríos, hecho que dio pie a la expansión de la vegetación y el aumento de la vida animal. Aumentaron las selvas tropicales y se redujeron las sabanas y los desiertos. Se incrementó la vegetación y los bosques en las

latitudes medias y altas. Los seres humanos comenzaron a recorrer extensos territorios en busca de comida formando pequeños grupos de cazadores y recolectores.

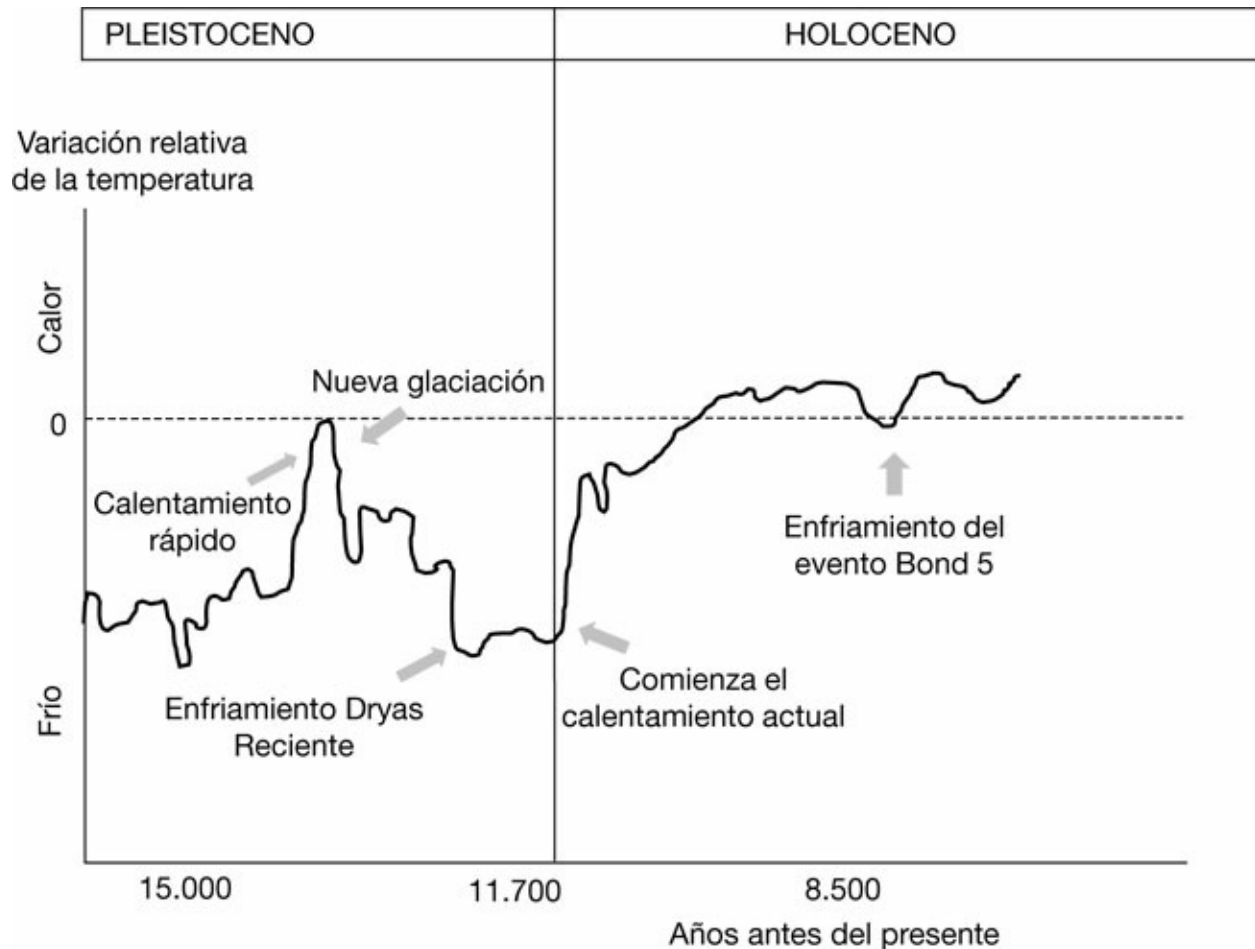


Figura 22.1. Entre los veinte mil y los diez mil años antes del presente, el clima del planeta pasó por cuatro fases que se sucedieron con gran rapidez en términos geológicos. Hace diecinueve mil años, llegó el final de la gran glaciación. Le siguió un brusco y breve calentamiento global que perduró unos tres mil años (desde hace quince mil hasta hace trece mil años) durante el cual las temperaturas medias del planeta llegaron a ser similares a las actuales. Continuó una nueva y breve era glacial, a la que se denomina Dryas reciente, que duró desde hace trece mil hasta hace once mil ochocientos años. A partir de esa fecha, el planeta entró en el último período interglacial del Cuaternario, el Holoceno, que es donde nos encontramos en la actualidad.

## EL FINAL DE LA GLACIACIÓN

No hay datos que sugieran que ya hubieran logrado domesticar animales hace veinte mil años, excepto el lobo. Los estudios genéticos sugieren que este fue domesticado muy pronto. Perro y lobo divergieron genéticamente hace unos cuarenta mil años, en plena glaciación. Posiblemente fueron domesticados a partir de crías de lobos capturadas, alimentadas y criadas en los refugios o campamentos humanos. Luego el proceso se completó con la selección de los individuos menos agresivos y más sociables como reproductores, y la eliminación de los más conflictivos. Su utilidad simbiótica con los humanos fue muy provechosa para ambos. El perro servía para la defensa y ayudaba en la caza; a cambio obtenía refugio y alimentación cerca de los seres humanos.

La mejoría paulatina del clima, sobre todo en determinadas áreas como Oriente Medio, permitió el asentamiento de numerosos grupos humanos. Era un paso obligado para salir de África a través de la península del Sinaí. Muchos de ellos se establecían en la zona, otros proseguían su emigración al resto del mundo. Es posible que ya comenzara a consumirse el primer alimento elaborado, que indudablemente fue el pan.

Precisamente hallazgos arqueológicos en un yacimiento en el norte de Israel conocido como Ohalo II muestran que las comunidades que vivían allí hace veinte mil años ya cultivaban cebada y trigo. Se trata de un primitivo asentamiento de cazadores, pescadores y recolectores situado en el denominado mar de Galilea, donde se encontraron seis chozas, una tumba, restos bien conservados de animales y plantas, así como collares de perlas del Mediterráneo y utensilios de piedra. El sitio está situado nueve kilómetros al sur de la moderna ciudad de Tiberíades y fue descubierto en 1989, cuando las aguas de este lago retrocedieron debido a una sequía.

En Ohalo II se han encontrado hierbas comestibles, trigo, cebada silvestre y avena loca, así como las primeras hojas de hoz, raspadores de sílex y una herramienta muy rudimentaria para moler el cereal. También se hallaron piedras planas con zonas quemadas sobre las que pudo cocerse una masa de pan.

Por otro lado, se tienen datos arqueológicos de otros primeros asentamientos, como es el caso del poblado de chozas de huesos de mamut encontrado en Ucrania en 1965. Un granjero se topó con un fósil de este animal y las posteriores excavaciones hallaron cuatro chozas construidas con

un total de 149 huesos de mamuts, de más de quince mil años de antigüedad. Se encontró además una especie de mapa grabado en un hueso, los restos de un tambor hecho con parte de un cráneo de mamut, con líneas y puntos pintados en rojo, adornos de ámbar y conchas fósiles. Estos restos constituyen las primeras pruebas de un asentamiento prehistórico atribuido a los cromañones.

#### CALENTAMIENTO BREVE Y RÁPIDO

Hace unos catorce mil quinientos años se produjo un calentamiento brusco denominado Bölling-Allerod. Las temperaturas se mantuvieron elevadas algo más de mil años hasta el trece mil antes del presente. En el transcurso de este período cálido se intercalaron algunos intervalos fríos de muy breve duración. Se produjo un aumento del calor y la humedad. Los desiertos reverdecieron y crecieron los bosques por todas partes, produciéndose una abundancia de ríos y lagos.

Esta bonanza climática permitió que numerosos grupos de individuos se desplazaran hacia oriente y colonizaran el Creciente Fértil, que en aquella época era un auténtico paraíso en el que abundaba el agua, los vegetales y los animales. Esto dio lugar a la llamada cultura Natufiense, que, entre catorce mil y diez mil años antes del presente, ocupó los territorios de Siria e Israel y que es probablemente una de las primeras culturas seminómadas conocidas. Eran cazadores recolectores que vivían en aldeas permanentes y en campamentos temporales. Recogían trigo silvestre para alimentar al ganado. Construían chozas y graneros de piedra, como han dado fe los morteros, con sus manos de piedra, que se han encontrado. Hace diez mil años, Oriente Medio estaba salpicado de pequeñas aldeas; una de ellas era Jericó, considerada la ciudad más antigua del mundo.

#### LA GLACIACIÓN DRYAS

Todos los paleoclimatólogos coinciden en que hace trece mil años, tras el breve calentamiento del Bölling-Allerod, el hemisferio norte volvió a sufrir una nueva glaciación, que se denomina Dryas reciente (*Younger Dryas*).

Uriarte detalla que su nombre deriva de la *Dryas Octopelata*, planta de pálidas flores amarillas, típica de la tundra, que hizo de nuevo su aparición en las tierras meridionales de Europa, en donde desaparecieron los árboles y fueron sustituidos otra vez por una vegetación muy pobre. Las temperaturas del invierno europeo durante el Dryas reciente volvieron a ser muy bajas y de nuevo llegó el hambre y el frío: ni plantas, ni caza, ni leña.

Por otro lado, todo el norte del continente americano estaba cubierto de hielo. Se redujeron las plantas y la escasez de alimentos y la predación humana redujo el número de herbívoros. Además, por esas fechas, un gran meteorito impactó en la zona de Ohio, formando lo que se denomina el estrato Clovi, rico en hierro. Esto precipitó la extinción en América de grandes mamíferos y ocasionó una enorme mortandad del resto de las plantas y animales.

Este breve período glacial, del que se desconocen las causas que lo desencadenaron, terminó abruptamente hacia el once mil setecientos antes del presente. Fue cuando comenzaron a aumentar las temperaturas hasta el día de hoy, el inicio del período interglaciar en el que ahora vivimos: el Holoceno.

## LOS CONSTRUCTORES DEL FRÍO

Es como si la historia se repitiera. En plena glaciación del Dryas reciente nuestros antepasados comenzaron a construir gigantescos monumentos en piedra: los megalitos. ¿Qué provocó que unos cazadores, recolectores y ganaderos dejaran de pintar cuevas y de elaborar figuritas de diosas obesas y se dedicaran a erigir colosales monumentos? ¿Religión, astronomía, magia, punto de encuentro? Es un misterio más. Y además comenzaron pronto y a lo grande: doce mil años antes del presente y con el gran recinto de Göbekli Tepe, que es la primera evidencia de una construcción a gran escala. Este complejo está en Sanliurfa, en el sureste de Turquía, una región muy próxima a las fuentes del río Éufrates, en lo que denominamos el Creciente Fértil. Su antigüedad precede en más de siete mil años a Stonehenge o a las pirámides de Egipto.

Hace doce mil años, en plena glaciación del Dryas reciente unos cazadores recolectores que no conocían ni el metal ni la cerámica comenzaron la construcción de este enorme recinto megalítico. Sus dimensiones abarcan aproximadamente trescientos metros de largo por otros tantos de ancho. Tiene una estructura compleja formada por círculos y grandes pilares de piedra; los más altos tienen más de tres metros de altura y varias toneladas de peso. Intercaladas, hay columnas en T, talladas con figuras de gran calidad que representan cocodrilos, jabalíes, zorros, lobos, serpientes, arañas, escorpiones, asnos, leones, reses, personas y una gran cantidad de buitres. Se alternan zonas de culto con numerosas habitaciones. Los estudios arqueológicos no han podido demostrar que se utilizaran como viviendas, aunque una construcción de tal magnitud debió de ocupar a mucha gente durante mucho tiempo. Y de pronto, hace unos diez mil años, la construcción completa fue deliberadamente enterrada. En ello pusieron tanto empeño y trabajo como en su construcción.

Antes de su descubrimiento arqueológico, Göbekli era una mera colina de tierra (un tepe) en mitad del campo. Gracias a este voluntario enterramiento la edificación que escondía ha llegado hasta hoy en excelentes condiciones de conservación.

Son numerosas las grandes y pequeñas construcciones que abundan por todos los continentes y cuyas fechas de inicio se datan hace unos nueve mil años. Es curioso que muchas de estas construcciones coincidieran en el tiempo y sus características fueran similares en lugares separados por miles de kilómetros de tierra y de mar. Hay infinidad, como es el caso de Rujm el-Hiri, un monumento megalítico consistente en círculos concéntricos y un túmulo central localizado en los Altos del Golán, en Israel, y datado en esos años. En el fondo del Mediterráneo, cerca de la costa de Haifa, se hallan las ruinas de una construcción también de nueve mil años de antigüedad. Consta de un círculo de grandes piedras y se han encontrado docenas de esqueletos en sus tumbas, entre la arena. Abundan restos de animales salvajes, semillas, uvas silvestres e incluso los gorgojos que parasitaban el grano almacenado. El análisis del polen y de los restos fósiles de plantas sugiere que la construcción se encontraba en un terreno pantanoso.



Quiero resaltar una manifestación megalítica de gran importancia y que se encuentra muy cerca de donde yo resido habitualmente. Se trata de los megalitos de Évora (Portugal), también pertenecientes a esta época. Existen más de diez agrupaciones megalíticas, más de cien menhires aislados, dólmenes y construcciones megalíticas. El recinto o crómlech de los Almendros es el mayor monumento megalítico de la península ibérica y uno de los más antiguos del planeta; más de dos mil años más viejo que Stonehenge, en Gran Bretaña. Cerca de este crómlech, y relacionado con él, se halla el conocido como menhir del Monte dos Almendros, que tiene la forma de un huevo alargado y un báculo o cayado grabado en bajorrelieve en la parte superior. A partir del crómlech, el menhir indica el nacimiento del Sol en el solsticio de verano, el día más largo del año.

Hace unos siete mil quinientos años prosiguieron las construcciones de megalitos atlánticos en España, Portugal, Gran Bretaña, Irlanda, Francia y, en el Mediterráneo, en Italia, Malta y Cerdeña. Es curioso constatar que no existen megalitos en las zonas donde miles de años antes florecieron las pinturas murales.

No tenemos una idea clara de con qué fin se erigieron estas impresionantes construcciones. Muchos de sus detalles y orientaciones permiten atribuirles motivos astronómicos, para la observación y medida objetiva de los movimientos de los astros principales, como el Sol, la Luna y Venus. Posiblemente tuvieran connotaciones religiosas funerarias. Pero desde el punto de vista que analizamos en este libro, estas construcciones, como cualquier otra actividad humana, tuvieron que ver con las Fuerzas de la Vida.

## LOS CALENDARIOS EN PIEDRA

Todo agricultor o ganadero, toda persona que viva de lo que produce la tierra, sabe la importancia de conocer con detalle en qué época del año se encuentra. La siembra o la trashumancia son actividades que no se pueden dejar al albur de unas lluvias adelantadas o retrasadas que nos confundan y nos induzcan a sembrar o a trasladar el ganado en el momento incorrecto. O unas nevadas precoces al principio del otoño que nos hagan pensar que ya estamos en invierno. Hoy eso no ocurre porque tenemos el calendario, que permite saber

en qué estación del año estamos y en qué momento de cada una de ellas, con lo que el agricultor y el ganadero pueden hacer sus previsiones de siembra o pastoreo con bastante precisión. No digamos ya en la actualidad, que cada campesino puede obtener información del tiempo, hora a hora, mediante el teléfono móvil que lleva en el bolsillo.

Pero ¿cómo sabían hace nueve mil años cuándo tenían que sembrar o subir y bajar el ganado de los prados de las montañas? Necesitaban poder medir el paso del tiempo, predecir la llegada de las estaciones, y esto solo se puede hacer mediante la observación del movimiento de algunos astros como el Sol, la Luna o el planeta Venus. ¿Y cómo podían nuestros ancestros hace miles de años disponer de un calendario? Podemos imaginar que cada tribu, cada aldea tendría un pequeño indicador, un monolito discreto o una gigantesca construcción, según las circunstancias, que indicaría el paso de las estaciones y señalaría cuándo se deberían emprender las diferentes tareas agrícolas o ganaderas. La tradición señalaría que no se podía sembrar el trigo hasta que la sombra del monolito no cubriera determinada señal, a pesar de unos días de lluvias adelantadas; o hasta que los primeros rayos del Sol al amanecer no entraran por una determinada ventana del templo e iluminaran la figura del tótem del clan. Lo mismo serviría para subir al ganado a las alturas antes de que el calor abrasase los pastos en el llano y traerlos de vuelta antes de que llegaran las nieves.

## LA DOMESTICACIÓN DE LOS ANIMALES

Durante los primeros milenios de bonanza climática tras el fin de la glaciación, nuestros antepasados se repartieron por todo el mundo constituyendo clanes de pequeño tamaño de cazadores recolectores, con mucha movilidad. Podemos imaginar cómo era su forma de vida por similitud a lo que ocurre en algunas tribus que aún hoy continúan viviendo exclusivamente de la caza y de la recolección, sin practicar la agricultura ni la ganadería. Diversos estudios etnográficos sobre estas poblaciones primitivas actuales sugieren que la alimentación de los habitantes de los primeros milenios tras la glaciación se caracterizaba por la diversidad de alimentos y la gran variedad de fuentes de nutrientes: insectos, reptiles, cualquier vegetal

comestible, carne y pescado. Los estudios cuantitativos realizados en más de doscientas poblaciones de cazadores recolectores de todo el mundo han demostrado que en la mayoría de estos grupos (sesenta por ciento) las plantas representan el 35 por ciento, o menos, de la dieta. Solo un dos por ciento de esas poblaciones estudiadas derivan un 66 por ciento o más de su alimentación de los vegetales. La proporción más frecuente es de entre un 16 y un 25 por ciento de alimentos procedentes de las plantas y de entre un 65 y un 85 por ciento de los derivados de los animales terrestres y acuáticos.

La dieta de nuestros ancestros seguía unos patrones muy similares a estos. En los huesos fósiles se ha medido su contenido en el isótopo del nitrógeno  $\delta^{15}\text{N}$ , que refleja la cantidad de carne consumida por el animal u homínido al que pertenecieron. Los contenidos en  $\delta^{15}\text{N}$  en los esqueletos de *Homo sapiens* (neandertales y cromañones) son mucho más elevados que los encontrados en huesos fósiles de la misma antigüedad de herbívoros como el bisonte, el caballo o el antílope, pero similares a los hallados en los de carnívoros de la misma época, como lobos o zorros árticos. Todos estos estudios sugieren una gran dependencia de alimentos de origen animal entre nuestros ancestros.

Los *Homo sapiens* completaban su dieta con frutos silvestres y con miel, el único dulce natural. Solían capturar peces y animales pequeños mediante trampas cada vez más ingeniosas. Es curioso que para estas técnicas de caza también copiaran a los arácnidos. Hay una gran abundancia de imágenes de la araña y de su tela, a la que consideraban posiblemente una deidad maestra en el arte de atrapar presas.

Con la mejora de las condiciones climáticas debió de aumentar la densidad de la población y la caza se hizo más difícil, ya que se agotaban enseguida los recursos en los alrededores de los emplazamientos de los clanes. Es posible que, incluso en los últimos siglos de la época glacial del Dryas reciente, cuando el frío intenso iba cediendo, nuestros ancestros aprendieran a retener entre ramas y troncos de árboles a algunas presas que lograban atrapar vivas cuando eran apenas unas crías. Los animales así encerrados en toscos corrales cerca de sus viviendas constituirían una reserva de alimento siempre disponible.

Con estas técnicas se mejoró el cumplimiento de la primera de las Fuerzas de la Vida, la nutrición, ya que permitía tener alimentos permanentemente a disposición de sus hambrientos pastores. Ya no dependían de unas cacerías azarosas y llenas de peligros. Este invento, como siempre, copiaba lo que ya existía en la naturaleza y pudo surgir de la observación de lo que hacen las arañas con sus telas: enredan en ellas a sus presas manteniéndolas vivas hasta que llega la ocasión de devorarlas. La ganadería transformó la biosfera, promovió el desarrollo de la humanidad y afectó a la evolución de la especie humana. Numerosos estudios genéticos y arqueológicos sugieren dos procedimientos esenciales utilizados por nuestros antepasados para iniciarse en la ganadería.

Uno es el procedimiento comensal. Fue el primero porque no requiere una intervención humana directa. Ocurrió por el acercamiento espontáneo de determinados animales a las proximidades de los asentamientos humanos, de los que obtenían comida o protección. El primer animal domesticado por este procedimiento fue el jabalí (*Sus scrofa*), hace más de ocho mil años, que daría lugar al cerdo. Seres humanos y cerdos tenemos un sistema digestivo y alimentario muy parecido y podemos nutrirnos de los mismos alimentos. Aún hoy, en pleno siglo XXI, vemos cómo los jabalíes salen de las manchas boscosas para hacer incursiones nocturnas a los contenedores de basura de las poblaciones.

El otro procedimiento fue el llamado método del apresamiento. La caza escaseaba en el entorno de los poblados humanos. Cada vez había que desplazarse más lejos en peligrosas jornadas de varios días para conseguir comida. Así que se optó por encerrar en corrales a algunas crías que lograban capturar tras matar a su madre o animales que quedaban enredados con vida en las trampas. Luego siguieron el procedimiento intuitivo de domesticación, dejando como reproductores a los animales más dóciles, más fáciles de manejar y sacrificando a los más ariscos. Mediante este procedimiento comenzó, hace unos diez mil años, la ganadería de ovejas, cabras, vacas, cebús, caballos, llamas, camellos y asnos.

EL SEDENTARISMO

Las sociedades de cazadores recolectores tienen que tener una forma de vida nómada, en continuo movimiento. Llegan a un valle abundante en frutos y en animales y allí se asientan durante un tiempo. Pero inevitablemente los frutos acaban escaseando en los alrededores del campamento y los animales desaparecen huyendo de su voracidad predatoria. Entonces no les queda otro remedio que desmontar las chozas, cargar con sus pertenencias e ir a buscar otro valle virgen en el que volver a encontrar alimento.

La ganadería permitió tener el alimento a mano y permanentemente sin necesidad de desplazarse, pero también exigió estar atento a su cuidado. Había que proteger a los animales de los depredadores, alimentarlos, atender los partos y cuidar de las crías. Esto requería no separarse del rebaño, por lo que los ganaderos comenzaron a fabricar chozas más duraderas y confortables. De esta manera comenzaron a florecer las primeras aldeas.

## LA REVOLUCIÓN LÁCTEA

La leche comenzó a utilizarse como alimento en cuanto se tuvo ganado accesible y lo suficientemente domesticado como para que se dejara ordeñar. Es impensable el ordeño sistemático de animales salvajes. No obstante, la incorporación de la leche a la alimentación de los adultos humanos no resultó tan fácil, ya que para la mayoría de los animales mamíferos, incluido el *Homo sapiens sapiens*, la capacidad de digerir la leche desaparece del intestino tras el destete.

La leche, además de proporcionar proteínas, grasas, vitaminas y minerales, es de los pocos alimentos de origen animal que contienen abundantes hidratos de carbono, en este caso, lactosa. La lactosa (glucosa y galactosa) solo existe en la leche, ningún otro alimento animal o vegetal contiene este disacárido. Pruebas genéticas demuestran que la leche debió de ser un alimento de importancia solo en la alimentación de nuestros antepasados más recientes, hace unos diez mil años. Analicemos este asunto. Un gen localizado en el cromosoma número 1 codifica la síntesis de la lactasa, que es la enzima capaz de digerir la lactosa, el azúcar de la leche. Al nacer, este gen se encuentra activado en las células del aparato digestivo para permitir la lactancia, pero en la mayoría de los mamíferos, nosotros incluidos,

esta enzima se desactiva cuando cesa la lactancia y, por lo tanto, desaparece la actividad lactasa del intestino. Ya que el organismo adulto, en condiciones naturales, no va a consumir leche nunca más, el intestino se ahorra el esfuerzo de fabricar una enzima innecesaria.

A nuestros primeros antecesores ganaderos, que no podían digerir el azúcar de la leche, su consumo les producía lo que hoy se llama intolerancia a la lactosa. Pero en algunos de nuestros antecesores se produjo una mutación del gen de la lactasa, de tal forma que no se inactivaba tras el cese de la lactancia y permitía poder digerir la lactosa de la leche a lo largo de toda la vida. La persistencia de la lactasa es una manifestación del fenómeno general de la «neotenia», que, como ya hemos visto, consiste en la pervivencia en el adulto de algunas características propias de la infancia. Esta mutación se afianzó en aquellas poblaciones que dependían más de la leche como alimento, tal es el caso de Europa y norte de Asia, donde las condiciones climatológicas y la mayor cantidad de hierba verde favorecen el desarrollo del ganado y donde, además, algunos de los componentes de la leche, como el calcio y la vitamina D, son más necesarios, ya que la insolación es menor y cuesta más fabricar nuestra propia vitamina D. Esta vitamina se fabrica en gran cantidad por acción de la radiación ultravioleta que actúa sobre un precursor, de origen vegetal, cuando este circula por las arterias y venas de la piel. En las poblaciones del norte de Europa, de baja insolación, consumir leche era fundamental para la adecuada osificación de los huesos. El resultado es que más del setenta por ciento de las poblaciones europeas y del norte de Asia o sus descendientes portan esta mutación y pueden digerir la leche. Por contraste, más de un setenta por ciento de las poblaciones de África, del este y del sur de Asia, de Oceanía, así como los habitantes oriundos de América no pueden digerir la lactosa. Hay algunas excepciones muy localizadas, especialmente en poblaciones cuya forma de vida tradicional ha sido el pastoreo, como los tutsis.

El abuso de lácteos no es tan saludable como se pensaba. Antiguamente, cuando las condiciones nutricionales no eran tan buenas, la leche y los derivados lácteos eran un excelente complemento nutricional, sobre todo en niños en pleno crecimiento. Pero hoy día se recomienda que el consumo de

leche y sus derivados sea moderado, salvo prescripción médica. Una dosis diaria saludable incluiría una cantidad total de leche equivalente a un vaso (200 ml), una pequeña porción de queso (50 gramos) y un yogur.

## EL CONSUMO DE ALCOHOL

La mutación que sufrió un antecesor nuestro hace diez millones de años permitió que los seres humanos poseamos una versión muy activa de la enzima alcohol deshidrogenasa. La ADH IV es capaz de metabolizar el etanol cuarenta veces más rápido que las otras versiones de la enzima, que poseen el resto de los animales. Esto permitió a nuestros antecesores paleolíticos que descubrieran pronto las virtudes de las bebidas fermentadas y las fabricaran y consumieran desde tiempos muy remotos. Incluso los datos arqueológicos sugieren que el consumo de bebidas alcohólicas precedió al consumo del pan o que ambos sucedieron simultáneamente.

Las fermentaciones se producen de manera espontánea, por eso su descubrimiento pudo suceder por casualidad en varios lugares del mundo. El cereal recolectado que se cubre por accidente con agua, si permanece así unos días, acabará por fermentar y el azúcar de sus granos se transformará en alcohol. Hace once mil años comenzaban a crearse los primeros asentamientos y tímidamente se iniciaba la agricultura: nuestros ancestros sembraban grano para dar de comer al ganado durante el invierno. Es muy posible que un recipiente donde almacenaban granos de cebada se llenara de agua por las lluvias y fermentara por sí solo. Y es probable que, cuando regresaron de sus correrías cinegéticas (o tras cuarenta días de lluvia, como cuenta la Biblia que le ocurrió a Noé) y bebieron de aquel agua, los efectos y ventajas nutricionales que les proporcionó hizo que a partir de entonces hubiera en cada choza un recipiente con cereales recubiertos de agua. Esta bebida no solo ponía más contentos y sociables a los miembros del clan, también suplementaba su alimentación con calorías y vitaminas (producidas en la fermentación por las levaduras) y además permitía beber un agua no contaminada, con lo que se evitaban las diarreas y parasitosis tan frecuentes en la época. Las bebidas alcohólicas tienen poca tendencia a contaminarse por gérmenes.

Existen numerosas pruebas del consumo precoz de alcohol por los seres humanos primitivos. Por ejemplo, en Göbekli Tepe, que como hemos señalado es un templo de más de once mil años de antigüedad, se han descubierto numerosos barriles y otros recipientes de piedra de más de 150 litros de capacidad. El análisis químico de su contenido muestra elevadas cantidades de oxalato, una sal vegetal resultante de mezclar grano con agua y que sugiere que esos recipientes eran toneles donde se fermentaba cereal para fabricar cerveza. El alcohol es, por lo tanto, otro producto de la domesticación de otros seres vivos, en este caso de frutas (uvas) o de cereales (cebada, maíz) y de las levaduras (seres vivos unicelulares).

Hoy día numerosos estudios discuten si el consumo moderado de alguna bebida fermentada (vino, cerveza, sidra) es o no perjudicial para la salud. Es de especial interés el vino tinto, ya que acumula numerosos antioxidantes fenólicos, que son los que dan a la uva tinta su color característico. Es útil recordar que el alcohol es muy energético y que proporciona casi tantas calorías como las grasas, unas siete kilocalorías por gramo de etanol. Hace miles de años, en aquellas épocas de frecuentes hambrunas, el consumo de bebidas fermentadas podría suponer un complemento nutricional no desdeñable. Esta característica constituye en la actualidad una de las principales causas desencadenantes de obesidad en las sociedades opulentas y sedentarias.

## LOS INICIOS DE LA AGRICULTURA

La ganadería fue la primera gran revolución nutricional. Al fin y al cabo, como alguien dijo, un rebaño de ovejas y cabras no era ni más ni menos que un dispositivo autorregulable capaz de convertir los fotones de la energía solar, que se habían almacenado previamente en forma de hierba, imposible de digerir por el ser humano, en carne y grasa fácilmente asimilables y muy energéticas. Además, la carne y la grasa eran alimentos fáciles de conservar durante mucho tiempo mediante el acecinado o la salazón, y podían consumirse crudas o asadas. Pero para que este sistema funcionara correctamente había que alimentar a los animales.



En primer lugar, se produjo el pastoreo, es decir, conducir a los animales a aquellas zonas donde abundaba la hierba y vigilar que se alimentaran con tranquilidad y sin peligros. En algunos casos y zonas geográficas particulares los pastos cambiaban con las estaciones del año. A veces había que recorrer con los rebaños largas distancias o subirlos a las montañas para encontrar los mejores prados en las estaciones secas. Así surgió esa técnica que tanta importancia ha tenido en toda la historia de la humanidad y que ha persistido hasta nuestros días: la trashumancia.

Con el tiempo, en algunos asentamientos se dieron cuenta de que una posibilidad era sembrar en los alrededores de la aldea algunas semillas de aquellas plantas que más les gustaba al ganado y más lo hacía engordar, fundamentalmente gramíneas como el trigo y la cebada que, de manera salvaje, crecían por todas partes. Así, poco a poco, mediante hallazgos casuales y observaciones meticulosas, comenzó la agricultura. Cuando había un buen año y la producción vegetal era cuantiosa, podían almacenar el excedente de grano y paja para alimentar al ganado en los fríos días invernales.

Quizá algunos aprendieron que si se trituraban granos de trigo, se mezclaban con agua, se hacía una especie de torta y se cocía sobre una piedra caliente se producía un alimento muy agradable de comer y muy nutritivo, que les proporcionaba energía: había nacido el primer alimento sólido elaborado artificialmente, el pan. En muchos asentamientos primitivos se han encontrado restos de granos de legumbres, pero estas no pudieron ser consumidas por los seres humanos antes de desarrollar la tecnología necesaria para fabricar recipientes en los que hervirlas. El problema reside en que muchos de esos alimentos son muy poco digestibles si se consumen en crudo, sin una preparación culinaria previa. Nuestro intestino no está equipado con los sistemas enzimáticos requeridos para obtener los nutrientes y la energía de las gramíneas o las legumbres crudas. Se precisa que el grano de cereal se muele para romper la cubierta que lo protege y permitir que las proteínas y los carbohidratos que alberga sean accesibles a la digestión. Además, resulta necesario cocinarlos para cristalizar el almidón y hacerlo más digestible, porque este solo puede ser asimilado tras ser cocido o fermentado.

Por si esto fuera poco, muchas de estas semillas contienen antinutrientes y tóxicos potentes. Por ejemplo, está bien demostrado que las judías blancas son muy tóxicas consumidas en crudo, ya que poseen varios inhibidores enzimáticos y otros componentes muy dañinos para el hígado. En nuestro laboratorio de la Universidad de Extremadura hemos podido verificar cómo las ratas a las que se les administra un pienso elaborado con judías blancas crudas y trituradas se niegan a comerlo y hasta llegan a morir de hambre si no se interviene a tiempo. Sin embargo, estas sustancias dañinas se neutralizan mediante el cocinado.

Numerosos restos arqueológicos señalan el comienzo de la agricultura en Oriente Medio hace trece mil años, en una fecha similar en el valle del Indo, en la India, y unos miles de años antes en el Extremo Oriente: China y Japón. Pero el hallazgo de grano y útiles agrícolas no implica que el producto de esa agricultura fuera para el consumo humano, sino para el ganado. Quizá lo fue en China, donde se han encontrado fragmentos de cerámica mucho más antiguos que los que normalmente se encuentran en Occidente. Es posible que los chinos ya supieran hervir el arroz hace trece mil años.

## LA PROPIEDAD, LOS EXCEDENTES Y LA GUERRA

El sedentarismo, el desarrollo de la ganadería y la incipiente agricultura modificaron la estructura, el tamaño y las relaciones sociales de los asentamientos humanos.

Por una parte, la mayor abundancia y facilidad de obtención de alimentos permitió y estimuló el desarrollo de nuevos utensilios y armas cada vez más eficaces. Se fabricaban hachas, hoces, martillos, azadas y otros instrumentos de caza y de pesca a base de piedra pulida, hueso, madera y obsidiana. Se elaboraban cestos que permitían transportar el alimento con facilidad y se comenzaron a producir las primeras y rudimentarias vasijas de barro cocido. Además, se establecieron intercambios muy beneficiosos de alimentos, adornos y tecnología entre comunidades, a veces muy alejadas.

Ya hemos adelantado que entre hace diez mil y ocho mil años antes del presente, por todo Oriente Medio y el extremo oriental del Mediterráneo, proliferó la cultura Natufiense (Uadi-en-Natuf, Palestina). Formaban poblados

preagrícolas y precerámicos, con viviendas circulares de piedra y adobe, con zócalos de piedra y techumbre de paja. Estos pueblos disponían de silos de almacenamiento de grano y de hogares y en las excavaciones en sus suelos se han encontrado restos de animales de caza, como jabalíes, gamos y gacelas, además de utensilios de pesca, como anzuelos de hueso, y aperos de recolección, como hoces y machacadores, junto con restos de trigo y cebada silvestres. También se han hallado enterramientos, cuyos esqueletos muestran, entre otras patologías, un gran desgaste de los dientes, probablemente por la arena que acompañaba a la harina que usaban para hacer pan.

Cuando llegó la abundancia, la riqueza y la propiedad, por los alrededores de la próspera comunidad ganadera, merodeaban pequeños grupos de cazadores recolectores que consideraban menos trabajoso matar a los pastores y robar el ganado de sus vecinos que cazar piezas salvajes por los montes. Surgieron del mismo modo rivalidades entre diferentes asentamientos ganaderos que competían por los pastos y por el agua para sus reses. Se estaban sentando las bases de algunos de los males derivados de las Fuerzas de la Vida, como son la riqueza, la pobreza, la envidia o las guerras, que tanto daño han hecho (y lo siguen haciendo) a la humanidad a lo largo de la historia. Libros antiguos como la Biblia ejemplifican muy bien este problema con la disputa entre Caín y Abel. La lucha entre ganaderos y agricultores.

Hemos mencionado que hace once mil años se construyó Jericó, la primera ciudad dotada de una muralla defensiva y un foso excavado de ocho metros de ancho y tres de fondo. En su interior existía una torre circular de nueve metros de altura que, al parecer, era un silo para el almacén del grano. En las excavaciones se han encontrado restos de escanda (trigo silvestre), garbanzos, lentejas, guisantes y frutas. Esto ya indica la disponibilidad de excedentes de alimentos y la preocupación de sus habitantes por sus bienes y por sus vidas. Otras poblaciones preagrícolas de similares características también fueron proliferando por todo Oriente Medio a partir del final del Dryas reciente, hace unos diez mil años. Solían ser cabañas redondas de barro y piedra, con techo de ramas. Se han encontrado utensilios como hoces de piedra con mango de hueso, hojas afiladas de pedernal, morteros y sus manos. También se han desenterrado restos de otras poblaciones, como Catal Hüyük

(Turquía) y Abu Hureyra (Libia), ocupadas entre los años ocho mil y once mil antes del presente, con abundantes semillas y restos de animales en los suelos de las chozas.

Estos pequeños poblados o las ciudades amuralladas comenzaron a desarrollar sistemas sociales complejos, como veremos más adelante.

## Los grandes imperios

Hace diez mil años se inició el período interglaciar en el que vivimos. Pero el clima no fue uniforme durante esa época, sino que experimentó cambios cíclicos de unos mil quinientos años de duración que condicionaron nuestra historia y el desarrollo de nuestra cultura. Estos enfriamientos periódicos impulsaron grandes cambios en la humanidad.

Tras el fin de la última glaciación la temperatura media del planeta comenzó a aumentar hasta alcanzar valores similares a los que existen en el presente. A este período cálido que siguió a la última glaciación se le denomina Holoceno, en donde aún permanecemos. Esta bonanza climática se vio alterada por cinco períodos fríos de aparición cíclica que se denominan ciclos o eventos Bond. Son fluctuaciones del clima de unos mil quinientos años de duración y cuya existencia fue propuesta por el climatólogo Gerard C. Bond sobre los datos obtenidos del estudio de las trazas de detritos rocosos transportados por icebergs a lo largo del Atlántico Norte. Las oscilaciones climáticas propuestas por Bond se han confirmado mediante el estudio de la composición y el tamaño de los núcleos de hielo ártico y antártico. Las causas y factores determinantes de estos ciclos están bajo estudio. Posiblemente se deban a la concurrencia de varios factores astronómicos como las variaciones en los ciclos de las mareas, los ciclos de actividad solar y los cambios en la circulación atmosférica.

El primero de estos enfriamientos ocurrió entre ocho mil cuatrocientos y ocho mil años antes del presente, cuando se interrumpió la etapa cálida del Holoceno con un breve enfriamiento del clima que alcanzó un pico hacia el ocho mil doscientos antes del presente (evento Bond número 5). Todo enfriamiento promueve el aumento del secuestro de agua en forma de hielo, y hace que descienda el nivel del mar y que lleguen la sequía y el hambre.

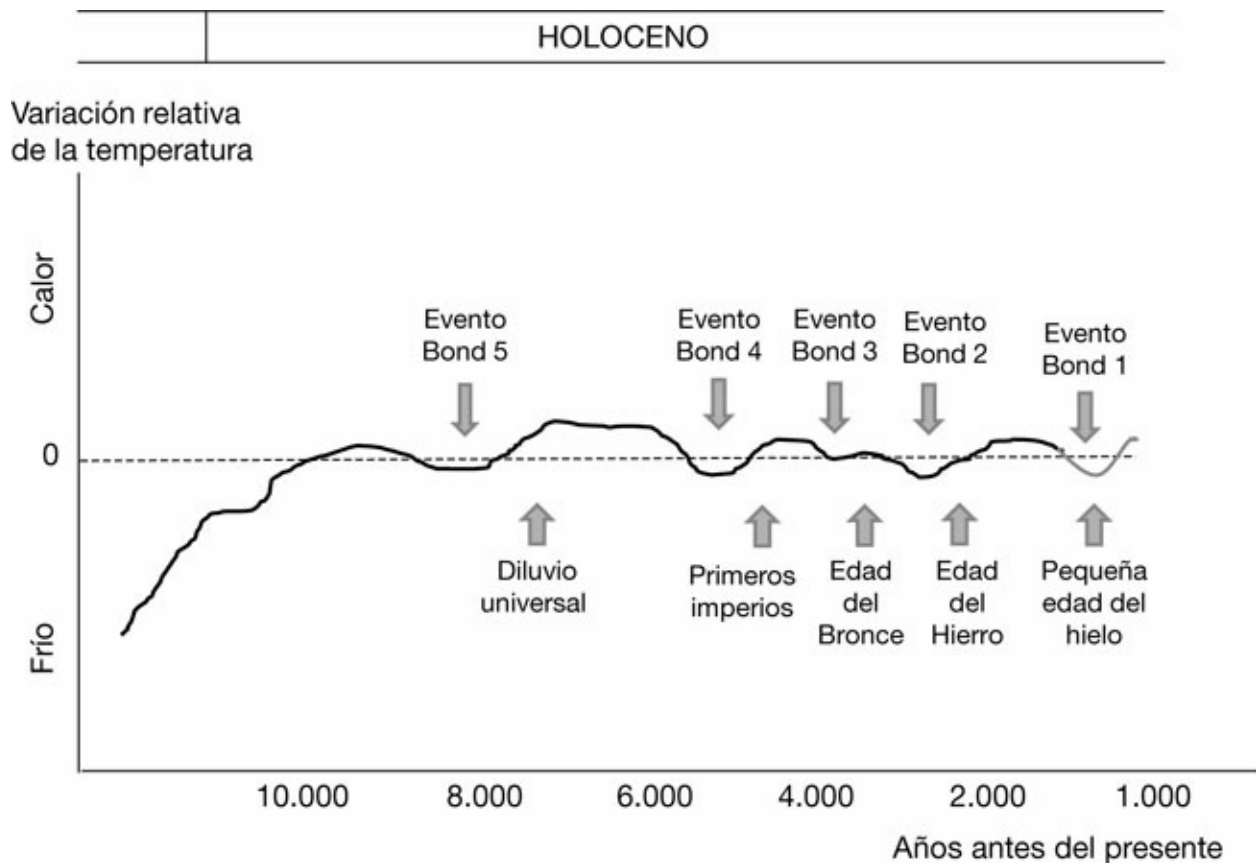


Figura 23.1. Tras el fin de la última glaciación entramos en una época cálida en la que aún seguimos, el Holoceno. Esta bonanza se vio interrumpida por cinco períodos de enfriamiento que se denominan eventos Bond.

Por aquel entonces, en toda la zona del sur de Turquía, Mesopotamia, Oriente Medio y alrededores habían florecido pequeñas comunidades sedentarias y comenzaba la ganadería sistemática y los primeros esbozos de la agricultura. Pero la sequía y el hambre ocasionada por este «breve» (en términos

geológicos, ya que duró unos trescientos años) enfriamiento promovieron las migraciones en busca de un clima más benigno, donde hubiera abundancia de alimentos y de agua.

Un lugar al que debieron desplazarse numerosas tribus fue un lago cerrado situado en una depresión del terreno al sur de Europa: el lago Euxino. Allí se daban unas excelentes condiciones para desarrollar las Fuerzas de la Vida: un clima benigno y agua dulce en abundancia. En sus orillas florecieron durante los tres siglos de frío numerosos asentamientos, a causa de la abundancia de pesca en sus fondos, de la caza en sus alrededores, de los extensos pastos para el ganado y de los feraces cultivos en las tierras fertilizadas por el limo. Esta especie de edén estaba protegido por un pequeño dique de tierra que separaba las aguas dulces del lago Euxino de las saladas del mar Mediterráneo, las cuales habían descendido algunos metros durante esta miniera glacial del Bond número 5.

Al finalizar el enfriamiento del clima, comenzaron a derretirse los casquetes de hielo, por lo que aumentó el nivel de los océanos. Como prosiguió el calentamiento, subió el nivel del mar Mediterráneo, que amenazaba con sobrepasar el borde del dique que separaba sus aguas saladas de las dulces del lago Euxino. El Mediterráneo subió tanto que un día la fuerza de sus envites rompió el dique y se abrió una enorme grieta en lo que hoy es el estrecho del Bósforo. Las aguas penetraron en el lago en forma de una ola gigantesca de agua salada, el equivalente a cien cataratas del Niágara, que en dos años elevaron el nivel del lago en 150 metros, a un ritmo de unos quince centímetros diarios. Así, se inundaron sus riberas, donde habían prosperado numerosos asentamientos humanos. El lago Euxino de agua dulce se transformó en el actual mar Negro de agua salada. Numerosos hallazgos arqueológicos, hoy sumergidos en las aguas ribereñas de este mar, avalan esta hipótesis. La subida del nivel de los océanos tras el evento Bond número 5 también afectó a numerosas comunidades que se habían establecido por las márgenes del Mediterráneo, lo que dotó de la debida universalidad a este suceso.

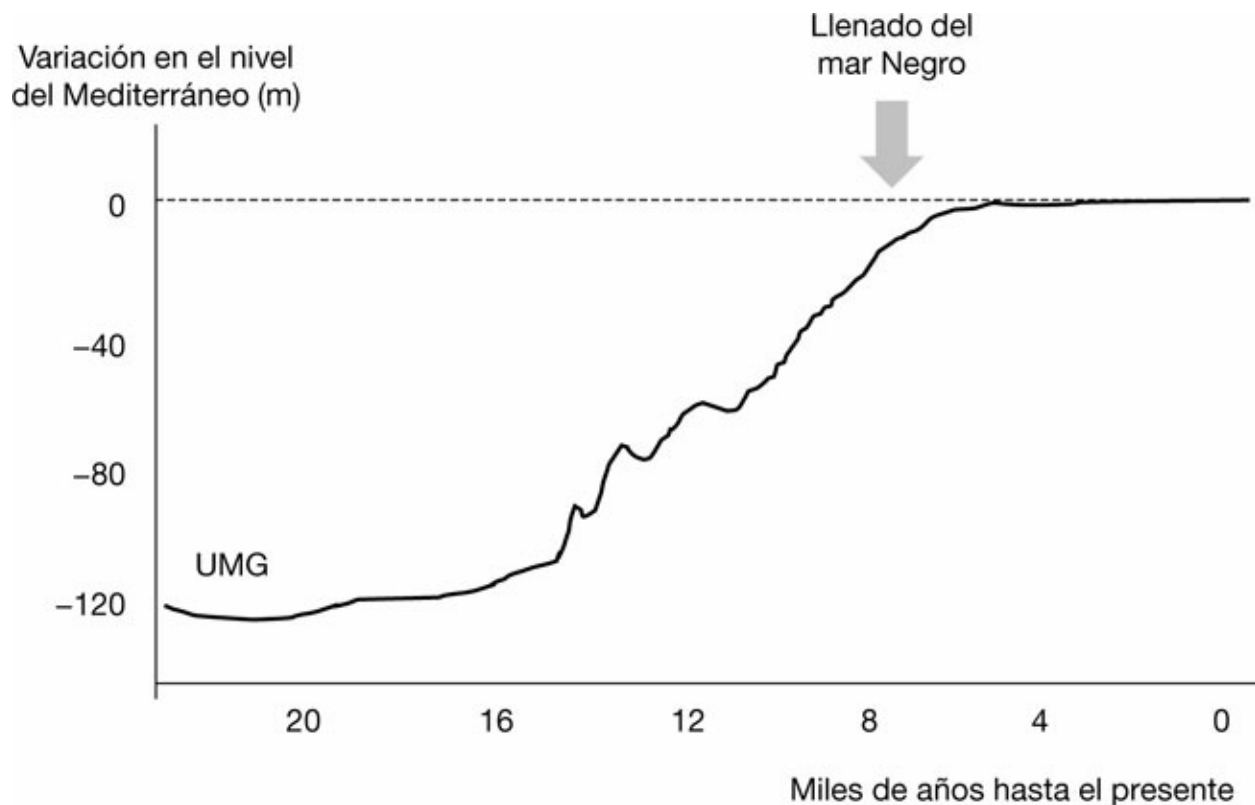


Figura 23.2. Evolución del nivel del mar con respecto al nivel actual en los últimos veinte mil años. UMG es el Último Máximo Glacial.

Los supervivientes de las inundaciones iniciaron una emigración, una diáspora hacia otros lugares más favorables, y con ellos se inauguró el Neolítico. Todos llevaron consigo el recuerdo de esa catástrofe, que durante siglos se transmitió de padres a hijos y acabó por constituir el relato universal del Diluvio. O al menos uno de los diluvios que padeció el planeta.

#### EL ÓPTIMO CLIMÁTICO DEL HOLOCENO

Tras los siglos de enfriamiento y sequía ocurridos durante el evento Bond número 5, las temperaturas y la humedad volvieron a aumentar alcanzándose medias globales de 14 a 15 °C. Este período se asoció a una fase de perihelio, es decir, un máximo acercamiento de la Tierra al Sol. En el hemisferio norte los veranos eran más cálidos y húmedos que en la actualidad.



Lo más significativo para el avance de la evolución de la especie humana fue, sin duda, el aumento de la humedad en los grandes desiertos africanos y en los de Asia central, como describe A. Urrialde. Hace ocho mil años, los desiertos del Sahara y del Sahel estaban llenos de ríos, lagos y zonas pantanosas y de una abundante vegetación de sabana. El lago Chad ocupaba una gran extensión, aunque hoy la zona sea un desierto polvoriento cubierto por una extensa capa blancuzca de diatomitas, que son restos de las criaturas con caparazón que poblaron aquellas aguas.

Hace ocho mil años, tanto en el Sahara como en el Sahel pastaban grandes manadas de herbívoros acompañados por sus predadores. Numerosos dibujos prehistóricos encontrados en pleno desierto, como los famosos restos de Tassili lo atestiguan: más de quince mil muestras de pinturas y grabados rupestres dan fe de la abundancia de animales de todo tipo que poblaban el desierto por aquel entonces. La selva ecuatorial africana se extendió de tal forma hacia el norte y hacia el sur que llegó a ocupar un terreno quince veces más amplio que el que tenía durante la época glacial. El clima de la selva era mucho más húmedo que el actual. Los desiertos de Arabia y del centro de Asia conocieron también períodos más húmedos, como atestiguan los lechos sedimentarios de paleolagos y paleosuelos que contienen polen fósil, un indicativo de una vegetación de sabana. En América, los análisis realizados sobre la variación de la sedimentación en la cuenca marina de Cariaco, en Venezuela, indican una primera parte del Holoceno durante la cual el caudal de los ríos que desembocaban en ella era mucho más abundante, por lo que se supone que las precipitaciones también lo eran.

## LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN

El período de bonanza que se consolidó hace ocho mil años señala un hito esencial en la evolución de la especie humana. La bonanza climática, que duró unos dos mil años, proporcionó alimento abundante, lo que impulsó a la población a distribuirse por grandes extensiones de terreno en todos los continentes habitados. Por aquel entonces, ya se había colonizado hasta el extremo sur de América.

Comenzaron a aparecer poblados, aldeas y ciudades por todo el mundo. Eran pequeñas comunidades aisladas y autónomas. Solo establecían pequeños contactos con los poblados vecinos para intercambio y comercio, a veces para robar y saquear la abundancia de los otros o incluso para buscar esposa. Se colonizó desde la India y China hasta toda América, el norte de África, Oriente Medio, Turquía y toda Europa, desde el sur de España e Italia hasta las islas británicas y los países escandinavos. Pero esta situación iba a cambiar de nuevo, impulsada por otro cambio climático.

El desarrollo de la agricultura y la ganadería así como la elaboración de vasijas de barro resistentes al fuego revolucionaron la manera de alimentarse. Comenzaron a consumirse nuevos alimentos a los que nunca se había tenido acceso en épocas precedentes (aceite, sal, cereales, legumbres, bebidas alcohólicas, dulces). Se garantizaba un aprovisionamiento de comida más constante que el de los nómadas cazadores recolectores y los requerimientos para obtener y conservar los víveres modificaron las pautas sociales. Se desarrollaron las técnicas de cerámica y cestería, el trenzado del esparto y la confección de sacos, elementos que permitían recolectar, almacenar o cocinar los alimentos vegetales. También surgieron las herramientas para el cultivo y recolección de las cosechas y para la preparación del grano para su consumo (molinos de piedra). Se desarrollaron técnicas de irrigación y se avanzó en el conocimiento astronómico de las estaciones para determinar con precisión los momentos idóneos de cada faena agrícola o ganadera.

La agricultura, junto con el uso culinario del fuego y el de recipientes para cocinar los alimentos, produjo una innovación de gran trascendencia en la dieta: permitió el consumo de los cereales y de las legumbres. Ya se ha avanzado que son alimentos que los seres humanos no podemos ingerir en crudo. Ocho son los principales cereales que consumimos hoy los seres humanos: trigo, cebada, centeno, avena, maíz, arroz, sorgo y mijo. Todos derivan de unos precursores silvestres que fueron domesticados a lo largo de miles de años. Posiblemente, primero se utilizaron solo como pienso para el ganado, hasta que poco a poco fueron incorporándose a la alimentación humana. Los granos de estas versiones silvestres de los cereales eran muy pequeños y muy difíciles de recolectar. Por ejemplo, cuando las espigas del trigo silvestre llegan a la madurez, sus simientes se desprenden con gran

facilidad para favorecer su dispersión, bien espontáneamente o al mínimo roce del recolector, lo que provoca la caída al suelo de los granos y la consiguiente pérdida de estos. Aun en el caso de que nuestros antecesores dispusieran de variedades de trigo como las que se utilizan hoy, con granos que permanecen fuertemente unidos en la espiga, se precisarían hoces de piedra para segar, cestos para transportar las espigas, piedras para moler el grano, herramientas para elaborar la harina y recipientes para cocinarla.

Con la agricultura y la bonanza del clima se frenó aún más el nomadeo, se crearon las aldeas, se desarrolló la fabricación de vasijas de cerámica y pronto surgieron las primeras y rudimentarias industrias de transformación de alimentos, destinadas, por ejemplo, a la fabricación de pan y a la fermentación de frutas y cereales para bebidas alcohólicas. También se procesaron los alimentos de origen animal para su conservación: el secado de trozos de animales mediante el aire frío debió de ser una práctica que se venía haciendo desde miles de años atrás, así como el ahumado y la salazón de la carne y del pescado. La agricultura y la ganadería, junto con el comienzo de los intercambios comerciales, permitieron la difusión y comercialización de la sal («salario» significa pago en forma de una dosis de sal). Se incrementó su consumo asociado a la conservación de la carne y pescado (las salazones) y al arte culinario.

El de la sal es otro asunto en el que convendría detenerse. Ya hemos relatado que nuestros ancestros más antiguos, que habitaban sabanas despobladas desarrollaron adaptaciones que les permitían ahorrar el poco sodio que podían ingerir con los vegetales que comían. Nosotros hemos heredado este diseño y nuestra fisiología está adaptada a una ingestión pequeña de sodio, menos que de potasio, puesto que el primero es menos abundante que el segundo en todos los alimentos, ya sean animales o vegetales. Nuestros antecesores consumían al día menos de un gramo de sodio y más de siete de potasio. Pero en la sociedad actual se han cambiado las proporciones: un individuo de cualquier ciudad moderna occidental consume diariamente cinco gramos de sodio (la mayor parte procedente de los alimentos enlatados o de sobre) y menos de tres de potasio (frutas, verduras). Este cambio tiene una gran trascendencia en el desarrollo de problemas cardiovasculares y renales.

Al final de todo este proceso ocurrió lo inevitable. Una vez que se tuvo harina de cereales y sal, se les adicionó miel y surgieron los dulces, tan atractivos para nosotros y que evolucionaron a miles de formas. Esto supuso otra novedad alimenticia desconocida por nuestros genes: el abuso del azúcar, que hoy es una de las causas fundamentales del desarrollo del sobrepeso y de numerosas enfermedades. Los alimentos dulces no son frecuentes en la naturaleza, solo la miel y algunas frutas (uvas, plátanos, higos) son dulces naturales. Por eso nuestro organismo no está equipado con los sistemas metabólicos suficientes para sobrecargas repetidas de azúcar. Este es uno de los principales problemas en las sociedades opulentas actuales. No solo abusamos de los alimentos dulces en las fiestas y en las celebraciones (bodas, bautizos, etc.), sino que hacemos un consumo excesivo de azúcar a través de alimentos y bebidas que tomamos varias veces al día todos los días de nuestra vida. Aquellos interesados en profundizar en estos problemas pueden consultar mi libro *El mono obeso* (Editorial Crítica).

Los datos arqueológicos muestran que al final de este período de bonanza climática nuestros ancestros ya consumían leche y lácteos, bebidas alcohólicas, sal, harina de cereales, legumbres, miel y dulces. Una suerte en aquella época, ya que estos alimentos ayudaron a la humanidad a superar la próxima prueba que estaba a punto de llegar.

## LOS NUEVOS ANIMALES DOMÉSTICOS

El nuevo orden, con el desarrollo de la agricultura y los asentamientos permanentes en aldeas y ciudades, fomentó la domesticación de otras especies de animales para satisfacer las nuevas necesidades que se iban creando. Hasta entonces solo se habían sometido a aquellos que estaban destinados a su empleo como comida, es decir, el ganado. Este uso se amplió en esta época a las aves (gallinas, ocas), a los peces e incluso a las abejas, cuya domesticación permitió por primera vez en toda la historia de la humanidad el acceso a los alimentos dulces de manera constante y no esporádica, como sucedía hasta entonces. Pero en esta época también comenzó el uso de animales en el transporte de mercancías, así como para el arado de los campos y el arrastre de carros. Con este fin comienzan a domesticarse los dromedarios

en Arabia, los camellos y los caballos en Asia central y los asnos en el valle del Nilo. Por todas partes se descubrió la ventaja de castrar a los toros machos, lo que permitía utilizar su gran potencia sin el inconveniente de su agresividad; así nacieron los bueyes.

## LOS ALIMENTOS TRANSGÉNICOS

Desde que comenzaron los primeros pasos en la ganadería y la agricultura, los seres humanos persiguieron disponer de animales y plantas que les produjeran los mayores beneficios con los menores problemas; y esa tendencia aún continúa, acrecentada.

Si querían conseguir una oveja que les diera mucha leche pero que fuera dócil y se dejara ordeñar, empleaban la mezcla de genes. Así, cuando tenían una hembra con unos genes que determinaban una gran producción de leche pero con otros que activaban determinados neurotransmisores que le ocasionaban un mal carácter, la cruzaban con un macho con genes que le conferían mayor docilidad. De esta forma se obtenían ovejas hijas que resultaban muy productivas y, además, se dejaban ordeñar con facilidad. Al fin y al cabo, en la reproducción sexual se mezclan los genes del padre y de la madre para dar un nuevo individuo que por definición es transgénico. Mediante ese mecanismo se fueron transformando animales salvajes en animales domésticos, de mayor utilidad para las tareas encomendadas.

Un proceso similar ocurrió con las plantas. La inmensa mayoría de los vegetales que sirven de alimentación a los seres humanos son muy diferentes de sus orígenes salvajes. Se han modificado a través de sucesivas transferencias de genes mediante la reproducción selectiva. Es decir, todos los vegetales y animales que hoy constituyen nuestra alimentación son transgénicos. La diferencia con lo que ahora se hace y que despierta un gran rechazo en parte de la población es que nuestros ancestros solo podían intercambiar entre animales o plantas aquellos genes que ya existían en esas especies. Pero en la actualidad, mediante sofisticadas técnicas de manipulación genética, les introducimos genes que naturalmente no existen en la especie receptora.

## LOS PRIMEROS IMPERIOS

Hacia el año seis mil se produjo un nuevo episodio de enfriamiento y falta de lluvias, el Bond número 4, que tuvo mayores repercusiones en el hemisferio norte y afectó profundamente a las poblaciones de África, Oriente Medio y Asia. Como es habitual, el frío engendró sequía y el desierto del Sahara, de ser una pradera verde, pasó a convertirse, en cientos de años, en el arenal que es hoy día. Toda la población que habitaba esta región y las zonas centrales de Asia tuvieron que ir desplazándose, siglo a siglo, abandonando los lugares que se iban desertificando para concentrarse en otros donde abundara el agua dulce, como el lago Chad o los ríos Nilo y Níger. Más al norte, se aposentaron en las cuencas del Tigris y del Éufrates. Y más hacia el oriente colonizaron el valle del río Indo en la India y los de los ríos Amarillo y el Yangtsé en la China. Esta agrupación progresiva de poblaciones diferentes en torno al agua impulsadas por la sequía fue cuajando, decenio a decenio, en la formación de los primeros imperios: los llamados «imperios fluviales», porque surgieron en las márgenes y valles de los grandes ríos.

Mesopotamia, la fértil región situada en las cuencas de los ríos Tigris y Éufrates (gran parte de lo que hoy es Irak), atrajo a numerosos pobladores que fueron creando asentamientos y aldeas. Este flujo se intensificó hace unos seis mil años con la llegada del pueblo sumerio, que también huía de la sequía ocasionada por el enfriamiento Bond número 4. Esta civilización fundó las primeras ciudades Estado, como Ur, Uruk y Larsa, y además desarrollaron la agricultura, la ganadería, la metalurgia, el comercio y los canales de irrigación. Inventaron la escritura cuneiforme y la administración pública. Con ellos comenzó la historia. A los sumerios les debemos numerosos avances que transformaron para siempre la vida de los seres humanos: la rueda, el sistema de numeración sexagesimal, los inicios de las matemáticas, la astronomía, la medicina, las edificaciones con ladrillos de adobe y la construcción con arcos.

La progresiva desertificación del Sahara obligó también a una numerosa población a desplazarse hasta ese oasis gigantesco, de tres mil kilómetros de longitud, que constituyen las márgenes del Nilo. El Imperio egipcio creció en las orillas de este río que cada año se desbordaba y dejaba un suelo fértil y fácil de cultivar, lo que garantizaba el alimento y el agua a los grupos humanos

que vivían en sus inmediaciones. Además, proporcionaba una vía segura de navegación, lo que simplificaba el transporte de personas y de mercancías. El Nilo se baja con facilidad, ya que las embarcaciones son impulsadas por la propia corriente, pero también se remonta con escaso esfuerzo, pues el viento, que suele soplar de norte a sur, empuja las falúas llevándolas a contracorriente.

El enfriamiento Bond 4 produjo otra novedad en la especie humana: los problemas demográficos que se originaron por el agrupamiento de la población en masas que superaban los cientos de miles de individuos. Hace seis mil años y a consecuencia del enfriamiento y la desertificación, nacieron los primeros imperios y comenzaron a sentarse los fundamentos de lo que constituye hoy día nuestra sociedad.

## EL NUEVO ORDEN

Hace cuatro mil doscientos años se produjo un nuevo descenso global de la temperatura: el evento Bond número 3. Según A. Uriarte, fue un enfriamiento de origen ártico, que afectó a todo el hemisferio norte con frío y una sequía intensa y pertinaz. Se produjeron hambrunas y epidemias, lo que afectó a la vida en los grandes imperios. La gran alteración que supuso en las estructuras sociales y administrativas desencadenó invasiones, guerras y revueltas, condujo a la refundación de nuevos imperios y, como es habitual en estas conmociones, ocasionó un nuevo avance cultural y tecnológico para la humanidad. Coincide con esta fecha el comienzo de la llamada Edad del Bronce. La domesticación del fuego ya había permitido el nacimiento de la metalurgia del cobre. Pero este era un mineral muy blando, así que el ingenio humano descubrió que utilizando una aleación de este metal y estaño se podían fabricar armas y herramientas más eficaces.

Hace cuatro mil trescientos años, los acadios, nómadas de raza semita bajo las órdenes del rey Sargón, huyeron de la sequía y el hambre desplazándose a las prósperas tierras de Mesopotamia. Conquistaron todo el imperio sumerio. La dinastía de Sargón de Acad consiguió agrupar y dominar pueblos culturalmente muy diversos y constituyó el imperio acadio. Pero duró poco. El frío y la sequía ocasionaron su desaparición. Numerosas tribus

periféricas de cazadores recolectores, acosadas por el hambre, fueron invadiendo las prósperas ciudades acacias. Pervive el testigo arqueológico de un enorme muro defensivo de 180 kilómetros de longitud construido para intentar repeler las incursiones de los pueblos del sur. Al final, el imperio fue invadido y conquistado primero por los guti, tribus de las montañas de Zagros, y más tarde por los amoritas (o amorreos), grupo nómada muy belicoso que procedía de Siria y Canaán.

Bajo el dominio de los amoritas prosperó la civilización mesopotámica. Llegó el esplendor de Babilonia y del mítico rey Hammurabi, que promovió la redacción de su famoso código, que reunía 281 leyes de carácter civil y penal basadas en lo que se ha denominado la ley del tali3n: ojo por ojo y diente por diente. Este código es el primer ejemplo del concepto jur3dico de que algunas leyes son tan fundamentales que ni un rey tiene la capacidad de cambiarlas. Las leyes, escritas en piedra, eran inmutables y, del mismo modo que luego ocurrir3a con las tablas de la Ley de Mois3s, eran consideradas de origen divino: as3 est3 representado en una escena tallada en lo alto de una estela, donde Shamash, el dios de la justicia, entrega las leyes al rey Hammurabi.

En Egipto, la sequ3a, alternada con las escasas inundaciones del Nilo, ocasion3 hambrunas y revueltas de la poblaci3n que condujeron al colapso del imperio antiguo y a su refundaci3n con el fara3n tebano Mentuhotep II, quien reunific3 Egipto en un solo imperio. Fue un per3odo de progresos en los sistemas de regad3os, en la distribuci3n y administraci3n de los alimentos, as3 como en las normas de justicia. Se produjeron manifestaciones art3sticas, un gran desarrollo del comercio con otras regiones y cambios religiosos, ya que la preponderancia de un dios determinado ten3a mucho que ver con qui3n ostentaba el poder.

Colapsos similares ocurrieron en las civilizaciones asi3ticas. En la India desapareci3 la cultura Harappa, pero prosperaron otras como el reino Kuru, donde ya comenzaron a utilizar el hierro, y por esas fechas surgi3 tambi3n el hinduismo. En China prosper3 la dinast3a Shang, la primera con un registro escrito, calendario, canales de irrigaci3n y utensilios de bronce. Hace m3s de tres mil a3os se fundaron en Am3rica las primeras ciudades mayas, en Soconusco, M3xico, y en Per3 comenzaron a utilizarse sistemas de irrigaci3n de uso agr3cola.



Tras el enfriamiento Bond número 3, el clima se hizo más benigno y la humanidad experimentó un gran crecimiento demográfico. Es el momento en el que florecen los imperios clásicos en Egipto y Mesopotamia y comienzan a sentarse las bases de lo que más tarde serían los del Mediterráneo, como el fenicio en Líbano, el hitita en Anatolia, o el minoico en Creta. Se estableció a nivel mundial un nuevo orden que modificó para siempre las condiciones de vida de los seres humanos. Con la escritura cuneiforme de Babilonia, la jeroglífica de Egipto y de la cultura maya y la simbólica o logográfica de China, nació la historia.

Gracias a la nueva bonanza climática, en los diferentes imperios se terminaron de afianzar los fundamentos civiles, religiosos, administrativos, militares, productivos y sociales que, con pocos cambios, forman hoy nuestra sociedad.

## LA EDAD DEL BRONCE

Hasta este momento, los seres humanos habían sido capaces de producir energía extrasomática (fuera de su propio cuerpo) mediante la combustión de la leña. El poder calorífico de la madera quemada es limitado, ya que por muy seca que se encuentre siempre queda algo de agua y parte del calor producido se pierde en la evaporación de esta. Quemando troncos lograron nuestros ancestros producir suficiente calor para cocinar o para cocer el barro en hornos y elaborar vasijas capaces de resistir una cocción. Pero para fundir metal se necesitaba más potencia calorífica, algo que permitió el uso del carbón vegetal. Este se elabora al proporcionar a la madera una combustión lenta, controlada, que elimina toda el agua de su estructura, y así se obtiene un material capaz de arder con mucha mayor potencia calorífica, lo que permite fundir metales como el cobre y el estaño. Así, gracias al carbón vegetal se comenzaron a fabricar armas y utensilios de agricultura hechos de bronce, mucho más duros que los elaborados solo con cobre.

Hace tres mil quinientos años, mucho antes de que floreciesen la Atenas de Pericles o el imperio de Alejandro Magno, ya existían civilizaciones cuya organización política, económica y cultural había alcanzado un elevado grado de desarrollo. En la Edad del Bronce tardía existía una gran globalización, con

numerosos intercambios de bienes y personas y, por supuesto, algunas guerras. Pero esta situación iba a verse sometida a una nueva prueba. Hacia el tres mil doscientos antes del presente se produjo otro cataclismo climático, detectado en los hielos fósiles de Groenlandia y la Antártida y en el estudio del crecimiento de las estalactitas y estalagmitas de algunas grutas de Turquía: fue el evento Bond número 2. Afectó sobre todo al hemisferio norte y a todos los imperios asiáticos y mediterráneos. Desencadenó sequías, frío, hambrunas, enfermedades, rebelión social y guerras, que trajeron consigo la conmoción, y a veces el desmoronamiento, de las sociedades de Oriente Medio y del Mediterráneo.

Impulsadas por el hambre, la mayor parte de las civilizaciones de la Edad del Bronce fueron invadidas por unas tribus de origen desconocido, a las que los egipcios denominaron «pueblos del mar». El frío y las invasiones hicieron desaparecer imperios poderosos, como el hitita, el micénico, el asirio o el cananeo, y asolaron ciudades, como Troya y Micenas. Fue en el año 3177 antes del presente cuando el faraón Ramsés III se enfrentó en una tremenda batalla a los invasores de Egipto y los derrotó. Este período de la historia egipcia coincide con el éxodo bíblico de los hebreos guiados por Moisés.

## LA EDAD DEL HIERRO

El clima volvió a mejorar a causa de la coincidencia de alineamientos astronómicos favorables hace tres mil doscientos años, cuando se disfrutó de otro ciclo caluroso y húmedo, llamado período cálido minoico por el florecimiento de esa civilización mediterránea. El ocaso de los imperios de la Edad del Bronce y la transición a la Edad del Hierro duró casi un siglo y tuvo causas muy variadas, como invasiones, revueltas y hambrunas.

Durante la primera Edad del Hierro, los poderosos reinos e imperios de la Edad del Bronce fueron sustituidos, progresivamente, por ciudades Estado de menor tamaño y todo el sistema de relaciones entre los pueblos de esa zona quedó desmoronado. De las cenizas del viejo mundo surgió el alfabeto fonético, que inventaron los fenicios hace unos dos mil novecientos años y otros ingenios, sobre todo relacionados con la metalurgia, que condujeron a un incremento en la utilización del hierro, que dio nombre a la nueva era.

En América esta bonanza se correspondió con el auge de la civilización maya, con numerosos escritos, con la construcción de grandes ciudades y con un gran desarrollo artístico y cultural. En la India el comienzo de ese período cálido coincidió con la vida de Buda y la creación del budismo.

Hace dos mil ochocientos años se produjo otro evento Bond que ocasionó un nuevo enfriamiento rápido de las aguas del mar Mediterráneo, lo que condujo a la sequía y a la reducción de la ganadería y la agricultura, que a su vez trajo consigo el hambre y la desorganización social en la zona mediterránea oriental, donde se estaba gestando el embrión de la civilización occidental. Esta situación continuó durante cuatro siglos. Este enfriamiento del clima terminó hace dos mil quinientos años con una nueva bonanza climática que relanzaría el desarrollo de las civilizaciones y daría lugar a la creación del Imperio romano.

## El nuevo orden y las Fuerzas de la Vida

Con el nuevo orden surgido de la agrupación de enormes masas de población para constituir los grandes imperios prosperaron nuevas formas, cada vez más eficaces y complejas, de dar cumplimiento a las Fuerzas de la Vida. Estas circunstancias exigieron el establecimiento de leyes y regulaciones que controlaran tales actividades.

Si comparamos un ser humano que habitaba una pequeña aldea en el centro de España hace ocho mil años con una persona que viva hoy en Madrid podremos constatar que existe una gran diferencia. Es el resultado de la suma de efectos de dos fuerzas poderosas: la evolución biológica y la evolución cultural, que han operado conjuntamente a lo largo de miles de años.

Hay mucha gente que opina que ambos procesos son incompatibles y que desde que predomina la evolución cultural se ha anulado la evolución biológica. Pero esta asunción no es correcta desde un punto de vista científico. Más bien la evolución cultural ha servido de ayuda a la biológica y le ha marcado en cierta medida su dirección, al modificar la presión selectiva ambiental en todas las Fuerzas de la Vida. Por ejemplo, el cocinado y triturado de los alimentos, que cambió la textura y la consistencia de nuestra comida, ha ocasionado también una reducción del desarrollo mandibular, dental e intestinal que posiblemente ha contribuido al avance del cerebro. Estos cambios suceden con bastante rapidez; por ejemplo, se ha visto que el tamaño del intestino grueso (el colon) de las momias egipcias de más de cuatro mil años de antigüedad es mayor que el de una persona de hoy. En la actualidad, muchos niños tienen problemas que ha de solucionar el dentista porque no les caben todos los dientes en sus mandíbulas, cada vez menos desarrolladas. La

utilización de armas, herramientas y medios de transporte ha disminuido el esfuerzo físico diario y ello ha reducido la masa muscular y ósea, realidad que se comprueba al comparar las osamentas de los cromañones con los esqueletos humanos modernos. La intensificación de las relaciones sociales y la vida en comunidades organizadas ha reducido la agresividad, desarrollando fenómenos como la feminización y la neotenia, que hacen que los humanos actuales tengamos un aspecto más aniñado y grácil que el que tenían nuestros ancestros cromañones.

Los ejemplos más evidentes de la influencia de la evolución cultural en el desarrollo biológico se ve en los animales y las plantas domesticados por los hombres. En pocos miles de años, el lobo salvaje dio lugar a un obediente mastín o a un minúsculo chihuahua, y las cabras bravas que habitaban riscos inaccesibles se transformaron en ganado gregario. Así sucedió con todos los animales que se han domesticado en los últimos miles de años. Algo similar ocurrió con las plantas. Ya no existe ningún parecido entre el maíz que sembramos y consumimos en la actualidad con la planta salvaje originaria; lo mismo sucede con tantos vegetales que hoy forman parte de nuestra alimentación cotidiana.

## LA ALIMENTACIÓN CULTURIZADA

Una de las Fuerzas de la Vida que sufrió una profunda modificación en el nuevo orden fue la alimentación. La gente ya no necesitaba salir a cazar, tenían toda la carne que precisaba estabulada en su propia vivienda o en los corrales a las afueras de la aldea. Tampoco tenían que recorrer los campos para recolectar frutas, bayas, frutos secos, granos o hierbas, puesto que en los alrededores del poblado había huertos y sembrados que proporcionaban abundantes alimentos vegetales para las personas y los animales. Incluso se habían librado de la incertidumbre nutricional de los cazadores recolectores nómadas mediante la construcción de silos y pajares donde almacenar los excedentes de alimentos vegetales de las buenas temporadas para comer en los años de malas cosechas. También habían desarrollado ingeniosas técnicas de conservación que les permitía mantener en condiciones adecuadas durante largo tiempo los excedentes de carne, pescado o leche. Y la mejora de la

técnica de elaboración de vasijas, la domesticación de animales de carga, y la fabricación de utensilios de piedra, bronce o hierro promovieron la fabricación de nuevos alimentos como la sal, las bebidas alcohólicas y los dulces. La construcción de sistemas de canalizaciones y regadíos permitía tener agua cercana y abundante y en buenas condiciones de salubridad.

La gente vivía más feliz, disponía de más alimentos capaces de mantener a una población creciente y de pagar los impuestos a la comunidad. Los gobernantes de estos pueblos en expansión necesitaban contar entonces con bienes para poner en marcha los dispositivos que permitían la protección de la comunidad frente a los enemigos externos e internos y, ya de paso, imponer y sustentar su propia autoridad. Este bienestar comenzó a ocasionar problemas de salud hace seis mil años y es el embrión de las llamadas enfermedades de la opulencia que afectan hoy a gran parte de la población en las sociedades desarrolladas.

## LA REGLAMENTACIÓN DE LA REPRODUCCIÓN

Una de las Fuerzas de la Vida que se sometió a un severo control fue la reproducción y todos los aspectos placenteros que conllevan las relaciones sexuales con o sin efectos reproductores.

Se afianzó la institución del matrimonio y la creación del concepto de familia. Los emparejamientos en las sociedades cazadoras recolectoras estaban sometidos a una cierta promiscuidad y la prole pertenecía a todo el clan. Los bienes se compartían, eran de todos y no había litigios importantes a este respecto. Pero con el desarrollo de las grandes comunidades llegaron los derechos de propiedad y la transmisión hereditaria de las posesiones a los descendientes. Así, se creó la institución familiar, con sus diversas variantes, para garantizar la propiedad de unos bienes y el cuidado de la prole; cada uno de la suya. Las autoridades civiles y religiosas penalizaban el incumplimiento de las leyes, como ocurría en el caso del adulterio, aunque ya se establecieron las diferencias entre las infidelidades perpetradas por hombres (tolerables) de las cometidas por mujeres (intolerables), un hecho que aún hoy perdura en muchas sociedades en las que se castiga con lapidación hasta la muerte a la adúltera pero no al adúltero. También se persiguió el disfrute del placer sexual

sin fines reproductores, fundamentalmente la masturbación. De nuevo, se produjeron las mismas diferencias entre la masturbación masculina (tolerable) y la femenina (intolerable). No hay datos de aquella época, pero si los hay de culturas más recientes en las que perviven prácticas como la ablación del clítoris a las niñas para evitar que puedan sentir placer sexual en la edad adulta.

## LA DEFENSA A GRAN ESCALA

La vida en las comunidades agrícolas y ganaderas que constituían los grandes imperios proporcionó, por una parte, una mayor seguridad y tranquilidad a sus habitantes respecto a los peligros tradicionales (hambrunas, ataques de fieras, etc.), pero también conllevó el aumento de otras preocupaciones. Unos peligros eran internos, generados por la propia sociedad, como las enfermedades infecciosas y parasitarias, que florecieron a causa del hacinamiento, o las enfermedades laborales, debidas a las nuevas condiciones de trabajo.

Los peligros externos englobaban las amenazas internas, como los asaltos, las revueltas, los crímenes diversos o los enfrentamientos entre diferentes etnias y grupos de población, así como las externas, como los ataques de habitantes de otros países o comunidades. Ambos riesgos necesitaron la puesta en marcha de inéditos mecanismos de defensa: la policía y el ejército. Durante este período, se desarrollaron con fines defensivos y ofensivos muchas armas y sistemas de protección, como el hacha de guerra, el arco y las flechas, las lanzas y espadas, la armadura, el casco, la rueda y el carro, que dieron lugar a una serie de innovaciones tácticas, como la agrupación en formaciones de ataque y defensa, el aumento de la movilidad, etc.

La convivencia se fue complicando en proporción al aumento de la densidad de población. En los grandes imperios coexistían gentes de diferentes tribus, incluso de distintas etnias, con aspectos, costumbres, religiones y hasta idiomas diferentes. Los problemas de convivencia y las relaciones sociales adquirieron una dimensión desconocida hasta entonces y exigieron la aplicación de nuevas medidas. Dos nuevas instituciones intentaron

resolver estos problemas y ambos han llegado, casi sin cambios, hasta nuestros días: la autoridad civil y la religiosa. En aquella época existían fuertes interconexiones entre ambas; como aún existen en algunas zonas de nuestro mundo actual.

## LA AUTORIDAD RELIGIOSA

No voy a tratar acerca del sentimiento religioso en sí, ni a cuestionar la existencia de un ser supremo en el que tantos millones de personas creen. El fenómeno religioso es universal y surgió en la mente humana desde los comienzos de nuestra especie y, aún en la actualidad, el número de creyentes supera ampliamente al de ateos. Debemos respetar las creencias de cada cual siempre que no invadan ni perturben las creencias de otros. Solo me voy a ocupar de manera sucinta de cómo se utilizó este sentimiento religioso universal para reglamentar el cumplimiento de las Fuerzas de la Vida y permitir el buen gobierno de las primeras sociedades agrícolas; de los primeros imperios. En este sentido, Robin Dunbar, psicólogo y antropólogo de la Universidad de Oxford, sugiere que la religión sirvió como una especie de pegamento para mantener unidas las sociedades humanas complejas.

En primer lugar, conviene diferenciar dos conceptos fundamentales. La religión como creencia teológica en un ser superior o unos espíritus, es decir, la que poseían nuestros ancestros desde hace más de cincuenta mil años. La religión como un ritual jerárquico, o sea, la que se desarrolló en las sociedades agrícolas y ganaderas para introducir las normas necesarias para una buena convivencia social.

Las primeras formas de religión eran de naturaleza chamánica y estaban circunscritas al ámbito de una determinada tribu. Los dioses y los espíritus servían para cuestiones prácticas, como resolver el cumplimiento de las Fuerzas de la Vida: alimentos, fertilidad, defensa, socialización. Eran una especie de contrato con unos seres superiores que habitaban los entornos de la tribu. Los miembros de esta se comprometían a cumplir una serie de reglas y a ofrecer determinados sacrificios a cambio de que esos seres espirituales les proporcionaran caza abundante, fertilidad a sus mujeres y protección frente a los ataques de otras tribus o ante los caprichos del volcán que humeaba y



tronaba cerca de su asentamiento. Sabían que si cumplían su parte del trato los dioses los colmarían de favores. En caso contrario, los castigarían con el hambre, el dolor y la infertilidad.

Este mecanismo tan poderoso para unir a las personas fue de gran ayuda en el contexto de los grandes grupos sociales que se formaron cuando se pasó a una forma de vida urbana dentro de una gran colectividad, como es un imperio. La prueba es que, hace alrededor de dos a tres mil años, en tres regiones muy alejadas del mundo en las que habían prosperado grandes imperios, como son los valles de los ríos Yangtsé y Amarillo en China, el valle del Ganges en la India y las culturas de Oriente Medio y la cuenca este del Mediterráneo, emergieron religiones con características muy similares: el hinduismo, el judaísmo, el brahmanismo, el taoísmo y el maniqueísmo. ¿Cómo surgieron al mismo tiempo en lugares tan diversos y en diferentes civilizaciones estas religiones con tantas similitudes? Estudios científicos confirman que la fuerza fundamental de todas ellas fue cohesionar a la sociedad, procurar un mayor desarrollo económico, así como establecer sistemas de recompensa y castigo. En definitiva, las religiones surgieron para mantener el orden social y procurar un mejor cumplimiento de las Fuerzas de la Vida a grandes masas de población.

Primero nacieron las religiones politeístas. Había un dios o entidad similar para cada necesidad: la diosa de los cereales, los del ganado, el dios del vino, la de la fertilidad, el del amor, el de la guerra, etc. Luego la cuestión evolucionó con una idea extraordinaria: no se necesitaban decenas de dioses, sino que bastaba con uno solo a condición de que este poseyera unos poderes infinitos que le permitían crear, mantener y proporcionar a los seres humanos la satisfacción de todas sus necesidades. El único requisito es que la gente cumpliera su parte del contrato: ofrecerle sacrificios y oraciones y acatar escrupulosamente sus normas, leyes o preceptos. Como señala Harari, este mecanismo conseguía que cientos de miles, millones de personas se comportaran al unísono, que se movilaran cuando era necesario en la misma dirección. Los mandamientos que su dios les imponía no eran el resultado de una decisión caprichosa de un gobernante o emperador, sino las órdenes de una autoridad absoluta, suprema y, en ocasiones, implacable. Por eso las leyes divinas estaban más allá de toda discusión. Los mandamientos divinos eran

dictados por el mismo dios a una persona de su confianza, ya fuera un rey, un profeta o un mesías, y luego se escribían en libros que han llegado hasta nuestros días, como el Código de Hammurabi, los Vedas, la Biblia o el Corán.

## LAS LEYES DE DIOS

Las leyes divinas siempre tienen que ver con ordenar la convivencia de la gente en relación con el ineludible cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Un mal uso de algunos de esos cumplimientos se consideraba una infracción, un pecado que merecía un castigo, como la gula, el atracarse sin medida de alimentos, o la lujuria. Al uso adecuado y mesurado del cumplimiento de las Fuerzas de la Vida se lo considera una virtud, como la sobriedad, el comer solo lo necesario sin abusar o la castidad fuera del matrimonio. Y el correcto cumplimiento con las normas divinas era premiado en la otra vida.

La religión premiaba en especial a aquellos que ofrecían a la divinidad, en forma de sacrificio, la negación del cumplimiento de las Fuerzas de la Vida. Desde la Antigüedad se consideró una actitud grata a los ojos de los dioses el privarse de ciertas funciones: de la nutrición mediante el ayuno, de la reproducción mediante la castidad o el celibato, de la defensa, al autoinfligirse daños físicos (penitencias) o incluso al sacrificar la propia vida por un bien superior en pro de la divinidad (martirio) o eludir la socialización mediante el aislamiento en lugares remotos e inaccesibles. En todas las religiones, ir en contra de las Fuerzas de la Vida siempre ha sido grato a los ojos del dios correspondiente. Veamos algunos ejemplos:

### 1. Los pecados y virtudes relacionados con la nutrición.

Se castigaba el exceso desmedido de ingestión de alimentos (gula), incluido el exceso de alcohol (embriaguez), la falta de disposición para participar en las tareas necesarias para conseguir comestibles y bienestar (pereza), el acopio desmesurado de alimentos y de bienes (avaricia o codicia) y el desear de manera insana poseer las propiedades y la comida de otro (envidia). Entre las virtudes estaban la templanza, la diligencia, la generosidad, la caridad y la empatía. Se premiaba la privación de cualquier alimento, el ayuno, o se prohibía el consumo de ciertos alimentos en

determinadas épocas del año, la abstinencia. Casi todas las religiones (judaísmo, cristianismo, islamismo, budismo, hinduismo, etc.) mantienen el ayuno y la abstinencia como prácticas santificadoras.

## 2. Los pecados y virtudes relacionados con la reproducción.

Eran considerados pecados graves el no honrar y atender debidamente a los progenitores y, por ampliación, al progenitor supremo, a Dios. También constituían pecado hacer un uso desordenado y excesivo del placer sexual (lujuria), ni de obra ni de pensamiento, y desear al hombre o a la mujer con quien no lo hubiera unido Dios (adulterio, violación). En la Antigüedad no constituían pecado los daños, incluida la muerte, infligidos a los niños, sobre todo a recién nacidos. Se premiaba la virtud de la castidad y se reconocía como una forma de vida muy agradable a los ojos de Dios el celibato, es decir, renunciar de por vida a la reproducción, con sus placeres y sus consecuencias; por eso en todas las religiones los sacerdotes eran célibes.

## 3. Los pecados y virtudes relacionados con la defensa y la convivencia.

Se exigía respetar la vida de las otras personas (no matarás), sus bienes (no robarás, no codiciarás los bienes ajenos). Se debía respetar la honra y el buen nombre de los otros (no levantarás falsos testimonios ni mentirás). Se propiciaba el tener una actitud desprendida, colaboradora con los demás (no ser egoísta). Se consideraban pecado todas aquellas circunstancias capaces de alterar la seguridad y el orden social, como la ira, el orgullo, la intolerancia, la venganza, la soberbia, la traición, el soborno, la violencia o la injusticia. Se premiaban aquellas acciones o disposiciones que permitieran preservar la vida de las personas y el orden social, como la prudencia, la fortaleza, la justicia, la humildad, la obediencia, la paciencia, la cooperación o la caridad. Y constituían objeto de especial aprecio las acciones o actitudes de aquellas personas que eran capaces de sacrificar su propia vida o su bienestar por defender la vida y la felicidad de otros; es decir, el altruismo. Los mayores reconocimientos se obtenían cuando estos sacrificios se realizaban para la mayor gloria de la divinidad: sufrir o dar la vida por la divinidad.

Es interesante que la religión también se ocupara de redactar normas para que la abundante y abarrotada población se defendiera con eficacia de los enemigos internos, de las enfermedades. Así, fue la única institución que en los primeros imperios, civilizaciones o ciudades Estado se ocupó de la

higiene y de los aspectos sanitarios. Todos los textos religiosos y las tradiciones orales contienen recomendaciones y prácticas obligatorias de carácter saludable que van desde cómo y cuándo debe uno asearse, hasta cómo cumplir con la mayor seguridad higiénica con las otras Fuerzas de la Vida. Hay religiones que alertan del peligro de consumir determinados alimentos, por ejemplo el asunto de la carne de cerdo. Otras se preocupan de las condiciones higiénicas relacionadas con la reproducción, que van desde practicar la circuncisión al miembro masculino para evitar infecciones, hasta las recomendaciones para la mujer durante la menstruación o las relacionadas con el embarazo y el parto.

## LA AUTORIDAD CIVIL

Siempre existió la figura de un individuo (hombre o mujer) que dirigía una pequeña comunidad; es algo que se remonta a los albores de la especie humana. Era un jefe o jefa del clan quien resolvía las disputas, organizaba las partidas de caza, decidía cuándo mudar el campamento a otro lugar y organizaba la convivencia en la cueva. Este cargo coincidía o no con el de chamán o jefe religioso. Pero cuando la gente comenzó a agruparse en ciudades de miles de habitantes y, sobre todo, cuando se crearon los grandes imperios de cientos de miles de habitantes se impuso la necesidad de una autoridad civil y de unas leyes que organizaran una convivencia tan compleja.

El imperio, en un sentido amplio del término, fue la forma de organización política en los últimos cinco mil años en todos los continentes. Estos reunían a muchas culturas, a etnias diferentes, por lo que surgían problemas nuevos: había que ponerse de acuerdo en el reparto de las tierras de cultivo, en las herencias, la distribución del agua de regadío, los pastos de la ganadería, zanjar todas las disputas y conflictos, imponer y recaudar los impuestos, reglamentar la familia, resolver las grandes catástrofes, las sequías, las guerras... La idea general era la de promover un bienestar común que facilitase los cumplimientos de las Fuerzas de la Vida: dar de comer a la población, cuidar de la familia y de la prole, defender a los habitantes de cualquier peligro externo o interno y fomentar una convivencia pacífica y productiva. Los imperios se mantenían estables y prósperos si gozaban (o

padecían) de un gobierno fuerte, regido por un gobernante al que casi siempre se atribuía poderes divinos o una estrecha relación con algún dios, del que solía recibir órdenes directamente.

La tarea de construir, mantener y ampliar un imperio requería de medidas contundentes y altas dosis de elevada crueldad: matanzas depravadas, opresión brutal, torturas, esclavitud, deportación, genocidio, etc. En este sentido conviene recordar aquí que los seres humanos somos los animales más crueles que existen. Somos los únicos capaces de infligir dolor extremo a otro ser humano mediante las torturas más atroces que cabe imaginar. Un predador mata a su presa de la manera más rápida y certera posible y luego se la come. No hay una partida de leones que, a dentelladas y zarpazos, arranquen toda la piel a una cebra y luego la dejen corretear para ver cómo sufre e infundir terror al resto de la manada de cebras. Pero los seres humanos sí que somos capaces de hacer cosas parecidas o incluso peores. Durante las guerras de conquista, eran habituales las grandes matanzas de hombres, mujeres y niños. A los enemigos se los despellejaba vivos y se construían tambores con sus pieles, se los torturaba con fuego, se los empalaba introduciendo un palo aguzado por el ano o se los hacía sufrir mediante todo tipo de artilugios con el fin de proporcionar un dolor insufrible mientras se los mantenía con vida el mayor tiempo posible, como la crucifixión. Los libros de historia, las crónicas y los grabados están llenos de alusiones a estas prácticas. Y no crea que esta afición desapareció de los seres humanos. No; se activa en cuanto se crean las condiciones adecuadas, como ha sucedido en guerras muy recientes, del siglo pasado. Y están resurgiendo con fuerza en estos momentos en algunas zonas del planeta, bajo el impulso de ciertas ideologías religiosas extremas.

La necesidad de unas leyes que organizaran la convivencia entre los diferentes habitantes de un imperio se puso de manifiesto con claridad por primera vez con el Código de Hammurabi, hace casi cuatro mil años. Por aquel entonces, Babilonia era la ciudad más poblada del mundo y su imperio acogía a más de un millón de habitantes. Hammurabi y su gobierno comprendieron que si la totalidad de los súbditos aceptaban su posición en la escala social, cumplían sus obligaciones y acataban la jerarquía del rey

empujarían de forma conjunta en la misma dirección y lograrían el bienestar para todos. Así, la sociedad podría defenderse de los enemigos, producir alimentos suficientes, distribuirlos a todos y proteger a la familia.

Da igual que sea un conjunto de leyes babilónicas o la Constitución de un país moderno; no existe ley que no tenga como misión última la de favorecer que todos los habitantes cumplan con las Fuerzas de la Vida en las mejores condiciones posibles. En el Código de Hammurabi se establecía una jerarquización de la sociedad en clases, se determinaban los precios de los bienes y de los servicios, se clasificaban los salarios según el tipo de trabajo a realizar y se decretaba la responsabilidad profesional. Por ejemplo, si una casa se derrumbaba y mataba a sus ocupantes, se ejecutaba al arquitecto. La ley general de «Ojo por ojo y diente por diente» es el espíritu del código, que contemplaba la existencia de tribunales civiles y la posibilidad de apelar al rey. Del mismo modo, la gravedad de las penas se establecía en relación con el delito y a las circunstancias. Se castigaban el robo, el homicidio y las lesiones, pero por primera vez también se promulgaban ciertos derechos para la mujer y se reglamenta el matrimonio. Además, se reconocían algunos derechos a los menores.

El Código de Hammurabi se escribió en una roca de diorita, de más de dos metros de alto, que puede admirarse en el Museo del Louvre, en París, de la que se hicieron copias para ser instaladas en todas las ciudades del imperio. Hammurabi no se atribuía poderes divinos, sin embargo, en la parte superior de su estela, se ve cómo un dios entrega el texto al propio rey. Además, el código comienza con una invocación a los dioses Anu, Enlil y Marduk en la que se advierte que los dioses entregaron el código al rey para que la justicia prevaleciera en su imperio, para impedir que los fuertes oprimieran a los débiles. Esta conexión del poder terrenal, civil, con el poder espiritual, divino, persistió hasta épocas muy recientes y aún perdura en algunas sociedades.



Figura 24.1. El autor junto a la piedra en la que está escrito el Código de Hammurabi. Museo del Louvre, París.

## Veinte siglos de altibajos climáticos

Las variaciones del clima que han ocurrido a lo largo de los últimos dos mil años están bien documentadas por los estudios paleoclimáticos. Y su relación con los acontecimientos históricos más trascendentes está recogida en los textos antiguos y en las manifestaciones artísticas. En los párrafos que siguen veremos hasta qué punto nuestra historia reciente ha estado condicionada en gran parte por los cambios en las condiciones climáticas y la necesidad ineludible de cumplir con las Fuerzas de la Vida.

Tenemos una idea bastante exacta de los cambios climáticos que han sucedido en los últimos dos mil años gracias al análisis de las muestras de hielo de la Antártida y de Groenlandia, a los estudios paleobotánicos y geológicos en numerosos lugares del planeta, desde el fondo de los océanos hasta las más elevadas cumbres, a los restos de corales analizados, a los informes isotópicos y, en general, a todas las técnicas de la moderna paleoclimatología. Además, disponemos de una amplia documentación escrita, pintada o grabada por testigos de cada época, con descripciones y crónicas pormenorizadas acerca de las circunstancias climáticas de la historia de la humanidad durante estos dos mil últimos años.

No pretendo hacer una descripción exhaustiva de los acontecimientos ocurridos en estos dos mil años de historia. Ni estoy capacitado para tal tarea, ni es el objetivo de este libro. Solo señalaré los principales períodos climáticos de estos últimos siglos y sus consecuencias para la humanidad. Ya vamos comprendiendo cómo las interrelaciones entre el clima y la fisiología determinaron la evolución y la historia de nuestra especie. Que cada cual



saque sus conclusiones. Una aclaración: a partir de ahora y hasta el final del libro utilizaré la cronología clásica, la que se establece con referencia al nacimiento de Cristo.

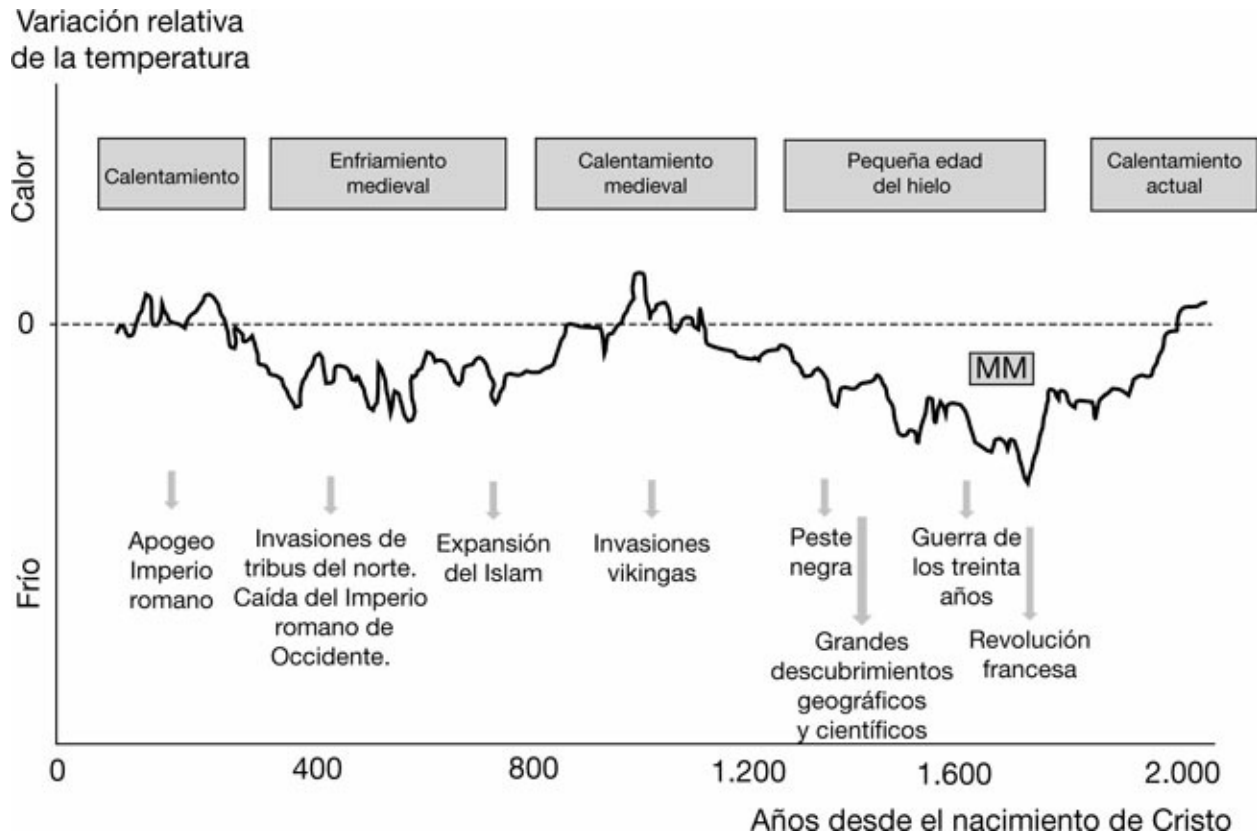


Figura 25.1. Evolución de las variaciones en la temperatura media global con respecto a la media de los últimos años del presente siglo. MM señala el período de baja actividad solar denominado mínimo de Maunder. Infografía elaborada con datos, entre otros, del estudio «*Surface temperature reconstructions for the last 2,000 years*», National Academy of Sciences, 2006.

## EL AUGE DEL IMPERIO ROMANO

Tras el enfriamiento correspondiente al evento Bond número 2 comenzó una fase cálida, hacia el año 500 antes de Cristo. Afectó sobre todo al hemisferio norte y en ella se alcanzaron temperaturas medias similares o superiores a las actuales. Este período cálido, con buenas temperaturas y abundantes lluvias, permitió el desarrollo de fructíferos cultivos, sobre todo de cereales, tanto en Europa como en el norte de África y favoreció el desarrollo de la cultura en todas sus manifestaciones.

En el año 100, Roma era la ciudad más poblada del mundo y su ejército estaba formado por cientos de miles de hombres bien preparados y alimentados que defendían las amplias fronteras del imperio. Al amparo de la bonanza climática y alimentaria florecieron la cultura, el arte y las leyes que rigieron el mundo durante siglos. Este clima benigno y sus consecuencias no solo permitieron el auge del gran Imperio romano, sino que dieron comienzo a la civilización moderna.

El Imperio romano necesitaba alimentar a su población y, sobre todo, a sus poderosas legiones. Esta fue la causa de las guerras púnicas, que ocasionaron la destrucción de Cartago y el dominio romano de los feraces graneros del norte de África. El calentamiento redujo los glaciares alpinos, se fundieron los hielos y muchos pasos de montaña, que cerraban por el norte la expansión romana, quedaron practicables. Las legiones, bien pertrechadas y alimentadas, llevaron la expansión de Roma hacia Germania, la Galia y Britania. El Imperio romano llegó a tener más de cincuenta millones de habitantes y una extensión que abarcaba desde Britania, al oeste, hasta el mar Caspio y el golfo Pérsico, por el este.

Coincidiendo con este bienestar climático global, China también experimentó un gran crecimiento y desarrollo. En sus territorios se expandieron las técnicas de regadío para el cultivo del arroz y el uso de animales de tiro, mientras que diversos reinos independientes, tras numerosas guerras, se agruparon en un solo imperio a las órdenes del emperador Qin Shi Huang.

## LA CAÍDA DEL IMPERIO ROMANO

Al único enemigo al que Roma no pudo vencer fue al cambio climático. Hacia el siglo IV de nuestra era, hace unos mil seiscientos años, el clima volvió a iniciar una fase de enfriamiento por causas astronómicas. La temperatura descendió algunos grados de media en el sur de Europa y norte de África, lo que hizo que se resintieran los cultivos, se redujera la producción de alimento y se afectara el cumplimiento con las Fuerzas de la Vida de la antes próspera civilización romana. Las revueltas populares aceleraron la disolución de una sociedad enferma y de un corrompido poder político.

El frío y la sequía azotaron con más severidad el norte y el este de Europa, situación que desencadenó una gran migración de refugiados climáticos. Grandes masas de gente hambrienta de las tribus procedentes de estas dos zonas se desplazaron hacia el sur en busca de alimento y cruzaron con facilidad los grandes ríos, como el Rin. Estos ríos antes constituían fronteras naturales, solo franqueables a través de los puentes construidos y vigilados por las legiones romanas. Pero ahora se podían cruzar con facilidad al estar congelados gran parte del año. Los europeos del norte y el este pudieron así penetrar en la rica y próspera península italiana. De esta forma se iniciaron las invasiones de Roma, y de todo el sur de Europa, por parte de las tribus eslavas y germanas, que finalmente desencadenaron la caída del Imperio romano de Occidente. Constantinopla y el Imperio romano de Oriente resistieron. Pero aún estaba por llegar lo peor, también consecuencia de un brusco e intenso enfriamiento climático.

Una nueva bajada global de las temperaturas, aunque de corta duración, tuvo lugar entre los años 535 y 536. Se han obtenido evidencias de depósitos de sulfatos en los hielos de Groenlandia y de la Antártida, correspondientes a esos años, lo que sugiere una gran acidificación y presencia de polvo en la atmósfera. Esto se pudo producir por una gran erupción volcánica ecuatorial que ocasionó un enfriamiento catastrófico del clima, sobre todo en el hemisferio norte. El responsable fue el volcán Ilopango, situado en El Salvador. El estudio de sus depósitos de cenizas sugiere una erupción explosiva: sus restos se encuentran dispersos por toda Centroamérica y, como ya se ha mencionado, se han identificado en estratos de hielo de la Antártida y Groenlandia. La erupción dejó un cráter que hoy ocupa un lago con una superficie de 72 km<sup>2</sup> y una profundidad de 230 metros.

El estudio de los anillos de crecimiento de los árboles confirma también este enfriamiento global. Los datos paleoclimáticos se encuentran avalados por las numerosas descripciones de historiadores de la época, que hablan de un Sol sin brillo y de nevadas en pleno verano. El invierno volcánico duró varios años y afectó gravemente a los cultivos y la ganadería, ocasionando hambrunas, epidemias, guerras y desórdenes sociales.

Una de las consecuencias más graves de este breve pico de enfriamiento que trajo hambre, sequía, pobreza y hacinamiento fue el crear las mejores condiciones para el desarrollo de la bacteria *Yersinia pestis*, que desencadenó, hacia el año 541, la gran pandemia de peste bubónica. La plaga avanzó con rapidez gracias a las buenas comunicaciones por tierra y mar y devastó primero al Imperio persa y, sobre todo, al bizantino, donde arrasó Constantinopla, capital que perdió casi la mitad de sus habitantes. Debido a esto, a esta peste se la conoce también como la plaga de Justiniano, por Justiniano I, el emperador de Bizancio. Luego, se extendió por toda Europa, donde en un primer momento mató a millones de personas para después continuar en sucesivas oleadas en los años siguientes. Se calcula que había ocasionado más de 25 millones de víctimas antes del siglo VI.

## LA EDAD OSCURA MEDIEVAL

El frío y la sequía persistieron hasta el año 800 y en Europa marcaron la época más oscura de la Edad Media. Tras la desaparición del Imperio romano, las ciudades prácticamente dejaron de progresar, la gente se dispersó en pequeñas aldeas y la organización social se basó en esencia en el feudalismo. La pobreza, el sometimiento, el miedo y las dificultades de la vida fomentaron la espiritualidad y la religión cristiana y sus promesas de una vida mejor tras la muerte.

Todas las manifestaciones artísticas y culturales se circunscribieron al simbolismo y a las manifestaciones culturales locales. Nada recordaba los pasados logros alcanzados durante el auge clásico. En la historiografía europea el término «años oscuros» se refiere al período que incluye, aproximadamente, del 476 al año 1000 de nuestra era. Este sobrenombre se ha utilizado para describir una etapa caracterizada no solo por la falta de literatura en latín, sino también por la ausencia de historia escrita contemporánea, por una decadencia demográfica general y por la limitada actividad constructiva y cultural que se produjo.

La sequía y las hambrunas azotaron en especial las regiones desérticas de África entre los años 300 y 700. Estas dificultades impulsaron el nacimiento y la expansión del Islam entre los años 600 y 700. Enardecidos por las

enseñanzas del profeta Mahoma, los árabes se lanzaron a una rápida conquista de Mesopotamia, Oriente Medio, el norte de África y la península ibérica. En China se consolidó, por esa época, el budismo. El frío y la sequía no alcanzaron a América y de ahí que en esa época prosperaran los grandes imperios americanos: los mayas, los aztecas, los incas y la cultura de Nazca.

## EL ÓPTIMO CLIMÁTICO MEDIEVAL

H. H. Lamb, en 1965, fue el primer climatólogo en utilizar el término «período cálido medieval» (*Medieval Warm Epoch*) para designar una fase de la historia climática durante la cual las temperaturas en Europa y las zonas vecinas del Atlántico Norte eran comparables o incluso superiores a las que teníamos a finales del siglo XX. Se estima que este período cálido medieval sucedió entre los años 900 y 1300 y finalizó cuando comenzaron las llamadas «grandes lluvias de Pascua» que marcaron el comienzo de otro ciclo de enfriamiento. Esta etapa está bien documentada como un fenómeno que no solo afectó a Europa, sino que alcanzó a todo el planeta.

En Europa las cálidas temperaturas y las lluvias abundantes impulsaron la agricultura y la ganadería, permitieron satisfacer las Fuerzas de la Vida y la buena nutrición y el aumento de la demografía contribuyó al desarrollo de las artes, las ciencias, las exploraciones y el comercio. Fue una época de clima tan suave que el cultivo de la vid se extendió por el sur de Inglaterra y los glaciares suizos se retiraron a cotas más altas. Las estaciones eran estables, lo que permitía una mejor planificación de la agricultura y la ganadería, que se plasmó en la utilización del sistema de rotación de cultivos entre los cereales, las legumbres y el barbecho.

A causa de la bonanza, la población de Europa se multiplicó por cuatro y se desarrollaron las ciudades. En esa época surgieron la mayor parte de las grandes capitales de hoy día y se crearon las primeras universidades, en Bolonia, París, Oxford y Salamanca. El aumento del comercio y de la producción de bienes dio origen a una nueva clase social de ciudadanos libres y de comerciantes prósperos. El arte floreció y las universidades y la arquitectura gótica se extendieron por toda Europa.

Esta etapa favorable también propició la expansión vikinga. Pueblos de origen escandinavo dejaron sus hogares y, gracias a las elevadas temperaturas y ausencia de hielos, se aventuraron en tierras lejanas. Ocuparon primero Islandia y Groenlandia, que estaban casi sin hielo, y crearon asentamientos y cultivos. Desde el 800 navegaron hacia el sur por la costa de Francia y de la península ibérica y entraron en el Mediterráneo, donde arrebataron Sicilia a los árabes entre el 1060 y el 1091. Posiblemente, también llegaron a las costas americanas, en concreto, a Terranova.

#### LA PEQUEÑA EDAD DEL HIELO

Pero una vez más el clima iba a determinar el camino de la historia. Hacia el año 1350 el clima de Europa se deterioró y se entró en la llamada «pequeña edad de hielo», de la cual no se salió hasta la segunda mitad del siglo XIX; aproximadamente, duró entre 1300 y 1850. Durante este período de cinco siglos las bajas temperaturas no fueron constantes, sino que se produjeron décadas de frío intenso intercaladas con intervalos de clima semejante al actual. Se considera que hubo dos fases, la primera desde alrededor de 1290 hasta finales de 1400. Luego hubo un período algo más cálido, hacia 1500, tras el cual el clima volvió a deteriorarse. Durante las fases más frías de la pequeña edad del hielo, las temperaturas medias en Europa y Norteamérica eran 2 °C más bajas que en el presente. Existen miles de documentos, pinturas y textos que describen las etapas de frío extremo y los acontecimientos catastróficos que les tocó vivir a los habitantes de Europa: inundaciones, tornados, tormentas, destrucción de puentes, molinos y embalses, hambre y gran mortandad.

Los científicos continúan debatiendo sobre las causas de este enfriamiento global. Una hipótesis adjudica la responsabilidad a varias erupciones volcánicas, ocurridas antes del año 1300, que originaron una serie de reacciones en cadena que redujeron la temperatura del planeta. Pero también pudo deberse a efectos astronómicos. El Sol muestra actividades explosivas periódicas, más o menos cada once años, que se reflejan en las llamadas manchas solares: cuantas más manchas, más actividad solar. Durante esa época sucedió una reducción de estas y se alcanzó la cota más baja, que se

denomina «mínimo de Maunder», por el astrónomo inglés que observó el fenómeno, que duró desde 1600 hasta 1750. Su estudio de las manchas constata que en esos años se produjo una notable reducción de la actividad solar.

En los períodos álgidos de frío tuvo lugar un avance de los glaciares alpinos y escandinavos, que enterraron aldeas enteras y cortaron rutas de comunicación y abastecimiento. Durante la pequeña edad de hielo desaparecieron los viñedos de Inglaterra, que habían crecido desde el anterior óptimo cálido medieval, y se dejó de cultivar el cereal en Islandia. En la mayor parte del norte de Europa la nieve permanente cubría las montañas por encima de los 1.200 metros y la congelación invernal de los ríos resultaba frecuente. Los grabados de la época muestran escenas causadas por el frío; incluso en Londres se organizaban ferias y mercados sobre las aguas heladas del Támesis. El frío y las lluvias torrenciales que convirtieron en lodazales los campos de cultivo redujeron las actividades agrícolas y ganaderas. Hay registros escritos que describen que en los peores tiempos de la hambruna algunos de los europeos más desesperados tuvieron que recurrir al canibalismo. Numerosas enfermedades resurgieron a causa de las bajas defensas de la población, como es el caso de la peste bubónica. Solo se salvaban los bien nutridos miembros de la nobleza, encerrados en sus castillos y sin apenas contacto con el pueblo llano.

Incluso con el hambre y las dificultades económicas, la cultura continuó su ascenso imparable. A pesar del frío, también se expandió la agricultura, con innovaciones como la conquista de tierra al mar en Holanda. También en esta época se produjo un avance en la tecnología de navegación y, por el impulso del hambre y la escasez, se intensificó el comercio y se dio comienzo a la expansión marítima y a la creación de los imperios coloniales. El almirante chino Zheng He exploró el océano Índico con una escuadra de cientos de barcos entre 1405 y 1433. En 1440 Enrique el Navegante condujo las naves portuguesas hacia el Atlántico Sur, a lo largo de la costa de África. En 1492 los Reyes Católicos conquistaron Granada, finalizando la presencia de los reinos musulmanes en la península ibérica. Ese mismo año, Colón partió desde el sur de España hacia el oeste y descubrió el Nuevo Mundo. Esto tuvo una enorme importancia para combatir las hambrunas que ocasionaban los picos

fríos, sobre todo con la implantación en toda Europa, particularmente en Irlanda, del cultivo de la patata que trajeron los españoles de América. Al mismo tiempo florecieron el arte y la arquitectura: muchos pintores plasmaron en sus cuadros el testimonio de esa época y del frío que se padecía.

## LA REVOLUCIÓN DE LA CIENCIA

Las dificultades para cumplir con las Fuerzas de la Vida siempre han sido un estímulo poderoso para el avance de la humanidad. Por eso, en el escenario de la pequeña edad del hielo se incubó y desarrolló la llamada revolución científica. Esta contribuyó de forma decisiva a la transformación de la cultura y del pensamiento europeo, cambió la imagen del universo, la concepción de la ciencia y de su metodología, además de tener numerosas implicaciones religiosas e ideológicas.

Hasta 1543 todo el saber estaba sustentado en las doctrinas del judaísmo, el cristianismo, el islamismo, el budismo y el confucianismo, que afirmaban que todo lo que merecía la pena conocer acerca del universo y de la vida ya se sabía gracias a la revelación de unos seres supremos, los dioses. Los conocimientos que no procedían de esta fuente celestial nos los proporcionaba la sabiduría de unos autores clásicos que habían escrito muchos siglos antes unas obras tan incuestionables como las de los dioses. Nadie en sus cabales se atrevía a pensar, y mucho menos a manifestar públicamente, que la vida y el universo podían ser diferentes a lo expresado por las autoridades clásicas y por los sacerdotes.

La cosa cambió en la primera mitad del siglo XVI con la publicación póstuma de la obra de Copérnico *De revolutionibus orbium coelestium*, en la que se ponía patas arriba la concepción clásica o teológica del universo. Una primera fase de la revolución científica culminó en 1632 con la publicación del ensayo de Galileo *Diálogos sobre los dos máximos sistemas del mundo* y finalizó con la gran síntesis que supuso la publicación por Isaac Newton de su *Principia* en 1687, donde formuló matemáticamente las leyes del movimiento y de la gravitación universal, que sentaron las bases de una nueva cosmología. Se abrieron las puertas al conocimiento y este progresó en todos los campos durante los siglos XVI y XVII. Nuevas ideas y conocimientos en matemáticas,



física, astronomía, biología, anatomía humana, medicina y química transformaron las visiones antiguas y medievales sobre la naturaleza e impulsaron los fundamentos de la ciencia moderna, basados en la experimentación y la observación y no en el principio de autoridad.

## LAS REVOLUCIONES SOCIALES

El frío, el hambre, las enfermedades y la opresión política y religiosa se intensificaron a finales del siglo XVIII. En estos años se produjo un aumento brusco del frío, que se atribuye a la erupción, entre 1783 y 1784, del volcán islandés Laki, que liberó grandes cantidades de cenizas y gases tóxicos que viajaron hasta Europa sobre el Atlántico envenenando el aire y aumentando el desastre agrícola y ganadero que se venía padeciendo por el frío. El hambre, cada vez mayor, llevó a la disolución social y al rechazo de los gobernantes, reyes y nobles bien alimentados, sin enfermedades y resguardados del frío en sus palacios suntuosos. La mezcla de las bajas temperaturas, la hambruna, el caos civil y la ilustración filosófica cuajó en las revoluciones. En el verano de 1788, un año antes de la Revolución francesa, el desastre agrícola y la muerte del ganado condujeron a un levantamiento de los campesinos, que llevaban ya muchos años de hambre y penalidades. Este factor, junto con las ideas filosóficas del liberalismo burgués, condujo a la abolición del sistema feudal francés y al derrocamiento de la monarquía absoluta.

El 30 de enero de 1795, en el marco de las guerras de la Revolución francesa, se produjo un sorprendente hecho bélico que refleja la situación climática que se padecía en Europa. Una compañía de caballería de húsares franceses derrotó y capturó a una poderosa flota enemiga de barcos holandeses, británicos y austriacos que se hallaba inmovilizada cerca de Ámsterdam por las heladas aguas del mar del Norte. La crudeza del invierno, con temperaturas que no subían de los 17 °C bajo cero, cubrió de hielo los ríos y los canales y facilitó el espectacular asalto a la flota por parte de una caballería que cabalgaba sobre las heladas aguas del mar.

En 1815 se produjo la erupción del volcán Tambora, en la isla de Java. Fue una enorme explosión que lanzó cenizas a la atmósfera, donde permanecieron varios meses. Todo el planeta se envolvió en una capa de

polvo que impedía el paso de la radiación solar, lo que acrecentó el enfriamiento y la hambruna. Esta situación dio lugar en 1816 al llamado «año sin verano», como se aprecia por la luz del cuadro de William Turner titulado *El canal de Chichester*. El frío continuó y, en 1840, dio lugar a la hambruna llamada «de la patata», que ocasionó millones de muertos y vació de habitantes a países como Irlanda y Alemania, que emigraron en masa a los Estados Unidos de América.

La pequeña edad de hielo finalizó en 1860, año en que se considera que comenzó la fase de calentamiento que continúa en la actualidad.

## LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL Y TECNOLÓGICA

Ya hemos visto cómo la especie humana, gracias a su cerebro, ha procurado siempre transformar el entorno físico y los materiales a su alcance para conseguir una mejora en aquellos procesos determinantes de su cumplimiento con las Fuerzas de la Vida: alimentación, vestidos, vivienda, protección, armas, etc. Para lograr tales objetivos, los cazadores recolectores del Paleolítico desarrollaron herramientas y armas que aumentaban la eficiencia del trabajo físico. Eran las herramientas líticas primitivas, como el canto tallado, la lasca y el bifaz, seguidos después por artilugios más especializados o complejos, como raederas, lanzas, flechas y martillos. Más tarde, durante el Neolítico, los animales de tiro o carga (caballo, buey, camello) proporcionaron la energía para herramientas como el arado o el carro y se confeccionaron armas más eficaces, como lanzas, arcos, catapultas, etc. Hasta el siglo XVII los seres humanos usaron prácticamente las mismas herramientas y las mismas soluciones tecnológicas que se venían utilizando desde hacía miles de años, apenas sin variación. Pero esto cambió radicalmente tras la pequeña edad del hielo, con el inicio de la revolución industrial que se produjo entre 1780 y 1840. Durante este período se vivió el mayor conjunto de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales de la historia de la humanidad desde el Neolítico.

La revolución industrial surgió en Inglaterra y su desencadenante principal guarda relación con la fuerza esencial de la vida y el universo: la energía. En Inglaterra se necesitaba energía y allí abundaba el carbón mineral,

que tenía grandes ventajas respecto al combustible que se venía usando desde hacía miles de años: la madera y el carbón vegetal. El carbón mineral puso en marcha la máquina de vapor, el motor que impulsó el movimiento en la revolución industrial a través de la industria textil, la siderurgia, los barcos, los ferrocarriles, el motor de combustión interna y la energía eléctrica.

La revolución industrial creó dos nuevas clases sociales: el proletariado, compuesto por los obreros y los campesinos asalariados, y la burguesía, integrada por los dueños de las fábricas, de los campos, de las máquinas y del capital. Esta nueva división dio pie al desarrollo de problemas sociales y laborales, protestas populares y nuevas ideologías que propugnaban y demandaban una mejora de las condiciones de vida de las clases más desfavorecidas. Así, surgieron los movimientos que iban a cambiar la sociedad en los años siguientes: el sindicalismo, el socialismo, el anarquismo y el comunismo.

Durante la revolución industrial se vivió un incremento espectacular de la población, debido fundamentalmente a la caída de la tasa de mortalidad fruto de la mejora de las condiciones higiénicas, sanitarias y alimentarias. Esta se plasmó en gran medida en la reducción de la mortandad infantil en la naciente clase media. Pero también en algunos casos, como el del proletariado industrial, se empeoraron las condiciones y se redujo la esperanza de vida.

En este período nacieron las primeras vacunas, se mejoraron los sistemas de alcantarillado y de depuración de aguas residuales, y la alimentación se hizo más abundante y regular, no sometida a las fluctuaciones de las cosechas. Descendió la incidencia de las epidemias y casi desapareció la mortalidad catastrófica, sobre todo la infantil. En 1796, Jenner descubrió la vacuna de la viruela, y a finales del XIX, científicos como Louis Pasteur o Robert Koch, entre otros, habían descubierto los bacilos y dado el primer paso para la generación de los antídotos, las vacunas y los sueros del tifus, el cólera, la rabia, la difteria, el tétanos y la tuberculosis. Por su parte, Joseph Lister introdujo la utilización de antisépticos en cirugía y se empezaron a emplear anestésicos en las intervenciones quirúrgicas. Ya se conocían los analgésicos y los hospitales proliferaban como lugares de curación eficaz.

## EL CALENTAMIENTO MODERNO

La temperatura del planeta comenzó a aumentar de manera constante a partir de finales del siglo XIX. Por aquel entonces ya se registraban científicamente las temperaturas ambientales en diversos lugares del mundo. Pocos años después se generalizaron las estaciones meteorológicas y desde finales de los años setenta del siglo XX tenemos registros precisos de temperaturas globales medidas por los satélites artificiales.

El período comprendido entre 1850 y 1980 marca un ascenso de la temperatura global de aproximadamente 1 °C en ciento treinta años. Esto es algo que se ha dado con frecuencia en la historia del planeta. Por ejemplo, el comienzo del óptimo térmico del Holoceno supuso un aumento de 5 °C a lo largo de ochocientos años.

Variación relativa de la temperatura

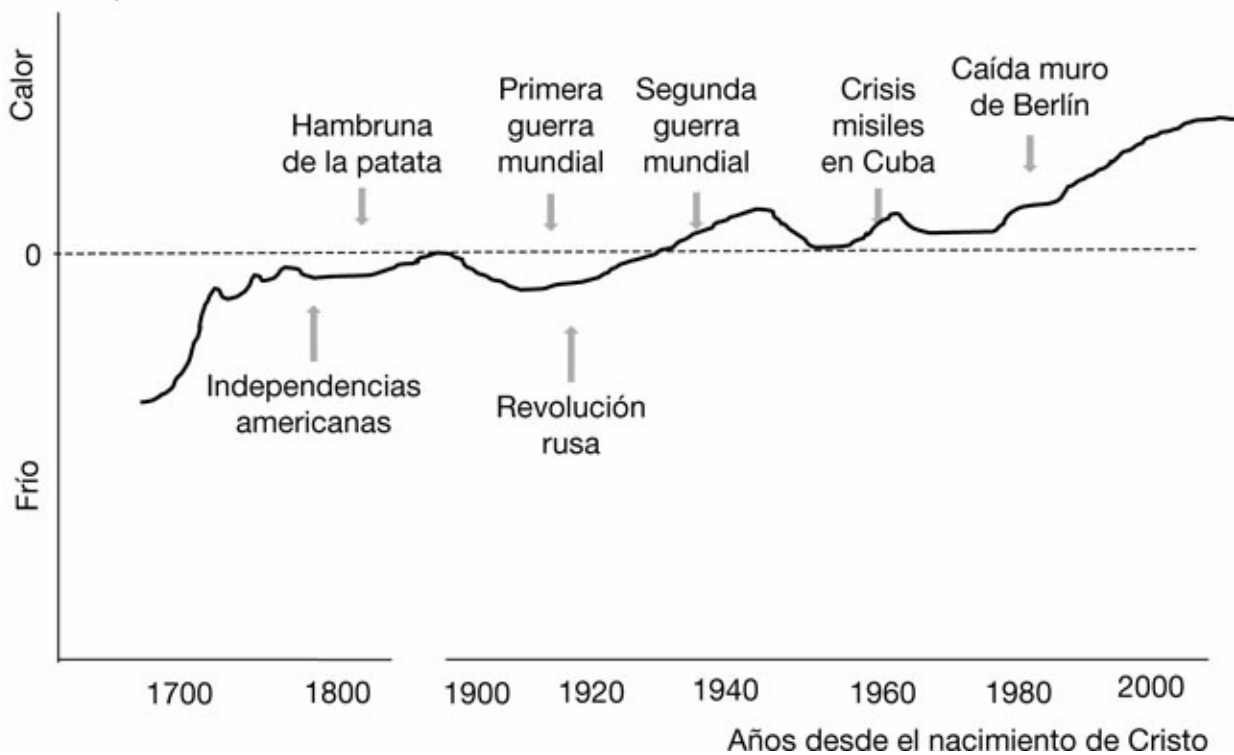


Figura 25.2. Desde el final de la pequeña edad del hielo la temperatura no ha hecho más que aumentar, con ligeras fluctuaciones. Datos basados en Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services. [www.metoffice.gov.uk/hadobs](http://www.metoffice.gov.uk/hadobs).

Como señalan la mayor parte de los textos sobre climatología, en especial el del profesor Uriarte, la temperatura media de la superficie de la Tierra durante el siglo XX, medida con termómetros colocados a dos metros del suelo y sobre la superficie del mar, subió aproximadamente unos 0,7 °C. La subida se produjo en dos períodos: 1910-1944 y 1978-1998. En los años que hay entre ambos (1944-1978), la temperatura media global de la superficie terrestre tendió levemente a la baja. Esta evolución desigual señala la participación de fenómenos naturales, además de los antropogénicos, en estas variaciones térmicas. Desde 1900 hasta 1993 se produjo un incremento del nivel del mar de uno a dos milímetros por año.

A partir del comienzo del calentamiento en el que estamos en la actualidad, la humanidad conoció una prosperidad y un desarrollo sin precedentes que desencadenaron las cuatro grandes revoluciones en las Fuerzas de la Vida que han caracterizado a la humanidad actual.

## LA REVOLUCIÓN EN LA ALIMENTACIÓN

En el último tercio del siglo XVIII y principios del XIX se produjo una auténtica explosión demográfica. Centrándonos solo en Europa, se pasó de 187 millones de habitantes en 1800 a 401 millones en 1900. Esto representaba el 25 por ciento de la población mundial.

Uno de los problemas que ya se planteaba a fines del siglo XVIII era cómo se podría alimentar a la población creciente. A este asunto dedicó el inglés Thomas Robert Malthus su *Ensayo sobre el principio de la población* (1798), donde afirmaba que la capacidad de crecimiento de la población es infinitamente mayor que la de la tierra para producir alimentos. La población, si no encuentra obstáculos, aumenta en progresión geométrica, mientras que los alimentos lo hacen en progresión aritmética. Pero Malthus se equivocó en sus previsiones. No en el crecimiento de la población, pero sí en el incremento de la producción de comida. No tuvo en cuenta que los métodos fundamentales para proporcionar alimentos a los seres humanos (agricultura, ganadería y pesca) iban a experimentar su propia revolución.

En todos los países desarrollados comenzaron a aplicarse innovaciones técnicas y mecánicas para crear nuevas máquinas cada vez más eficaces para llevar a cabo cualquier tarea agrícola que antes exigía mucho tiempo y un gran esfuerzo físico. Así, los abonos, los plaguicidas, las tecnologías agrícolas, los regadíos, los drenajes de los campos, etc., unidos a los nuevos procedimientos de comercialización de los productos, dieron como resultado un incremento creciente en la producción agrícola.

La ganadería, que se regía por los mismos procedimientos utilizados en los últimos miles de años, también se vio favorecida por las innovaciones tecnológicas, industriales y sanitarias. Esto permitió un desarrollo creciente de la producción y aumentó el consumo de carne. La ganadería, en sus principales variantes, intensiva, extensiva o trashumante, llegó a ocupar mayor extensión de terreno que la agricultura, ya que el ganado se puede criar en áreas donde no podrían crecer los cultivos. Además, las técnicas de estabulación y de alimentación contribuyeron a disminuir la dependencia de las condiciones del medio. De la ganadería surgieron industrias para la transformación y comercialización de productos animales como la leche, los huevos y la miel. La pesca pasó de ser una actividad artesanal que se realizaba cerca de las costas a tecnificarse, incorporando las novedades técnicas e instrumentales que se comenzaron a desarrollar durante las grandes exploraciones marítimas.

## LA REVOLUCIÓN SEXUAL Y REPRODUCTIVA

Hasta el siglo XIX todo lo referente a esta Fuerza de la Vida en sus dos vertientes esenciales, reproductora y sexual, permanecía prácticamente inalterable desde hacía miles de años. Solo con el avance de este siglo aparecieron los primeros movimientos que propugnaban cambios revolucionarios en la reproducción y la sexualidad, amparados en doctrinas de carácter político como el marxismo, el socialismo, el anarquismo y el feminismo. Estos criticaban la sociedad existente e instituciones como el matrimonio y la familia, al mismo tiempo que reivindicaban, desde posiciones diversas, la igualdad de derechos en el mundo laboral, legal y familiar, el sufragio universal, la maternidad libre, así como la igualdad en el matrimonio y el acceso a los métodos anticonceptivos.

La mujer jugó un importante papel activo en la primera guerra mundial, en la asistencia médica, la manufactura del armamento y el desarrollo de tareas hasta entonces reservadas a los hombres, como la conducción de vehículos, la distribución de la correspondencia, etc. Esto proporcionó a las mujeres una nueva identidad y facilitó su incorporación productiva a la sociedad, hecho que ocasionó cambios importantes y casi siempre irreversibles como la concesión del derecho al voto, del que carecían en la mayor parte de los países democráticos antes de 1910. Del mismo modo, la segunda guerra mundial permitió una participación mucho más activa de la mujer que en los conflictos anteriores.

El término revolución sexual y reproductora hace referencia al profundo y generalizado cambio ocurrido tras la segunda guerra mundial en numerosos países del mundo occidental. Durante la segunda mitad del siglo XX se produce un choque contra los códigos masculinos tradicionales referentes a la concepción de la moral y el comportamiento sexual, las relaciones sexuales y la reproducción, que habían permanecido inalterables durante más de dos mil años. La liberación sexual tuvo su inicio en la década de 1950 y su punto álgido se produjo entre 1960 y 1980, aunque sus consecuencias y extensión siguen vigentes y en pleno desarrollo. Sus fundamentos principales fueron la igualdad entre los sexos, la reivindicación y recuperación plena del cuerpo humano y su desnudez, la sexualidad como parte integral de la condición humana individual y social, el feminismo, los métodos anticonceptivos, así como el reconocimiento y la mayor aceptación de la homosexualidad. También proponía cambios en la estructura familiar, incluida su institución por excelencia, el matrimonio, lo que trajo consigo un aumento de las uniones sin nupcias, el retraso en la edad de casarse, el nacimiento de hijos cuyos padres no estaban casados, las uniones civiles y el matrimonio entre personas del mismo sexo, así como la aparición de nuevos tipos de familias (monoparentales y homoparentales). Muchos de los cambios revolucionarios en las normas sexuales de este período se han convertido con el paso de los años en normas aceptadas, legítimas y legales en muchos países.

La liberación sexual fue posible gracias a la difusión y uso generalizado de los métodos anticonceptivos (la píldora, el DIU, el preservativo, la contracepción de emergencia) así como a la legalización, en numerosos

países, de plazos para la práctica del aborto a petición libre de la mujer.

## LA REVOLUCIÓN EN LA DEFENSA

A fines del siglo XIX, se encontraban funcionando todas las armas de fuego que podemos considerar modernas: cañones de retrocarga estriados, fusiles de repetición, pistolas automáticas, ametralladoras, morteros, obuses, etc., y además comenzaron a fabricarse las primeras granadas de mano y las minas. Asociada a la revolución industrial y tecnológica, la industria armamentística inició una carrera imparable.

En 1914 estalló la primera guerra mundial y todas las armas en uso se perfeccionaron rápidamente, pero también aparecieron algunas nuevas. El submarino se convirtió en un arma temible contra el tráfico mercante, se crearon los gases letales, nació el carro de combate y se amplió y perfeccionó el uso de la aviación como elemento ofensivo. En septiembre de 1939 estalló la segunda guerra mundial y aparecieron las nuevas armas combinadas: la aviación táctica y las masas de carros de combate habían comenzado. Durante la guerra se utilizó también una nueva arma: el radar, con el que se abrió la era de la guerra electrónica, que fue seguido por el sonar, creado para detectar submarinos. Así, los cazas nocturnos utilizaron radares incorporados para guiar el fuego, al mismo tiempo que aumentó la precisión y el poder de los bombarderos, que utilizaron nuevos tipos de explosivos. Alemania perfeccionó el uso de proyectiles autoguiados propulsados por motores de reacción o cohetes. Las demás naciones beligerantes también comenzaron a usar torpedos de diferentes tipos y modelos. En las postrimerías de la guerra, hizo su aparición el avión de reacción y, en agosto de 1945, dos artefactos nucleares arrojados sobre Hiroshima y Nagasaki inauguraron la «era atómica». En los veinte años que siguieron al final de la guerra el arsenal nuclear se intensificó en el restringido club de las bombas atómicas. Se desarrolló la cohería intercontinental y se hizo una gran inversión para desarrollar todo tipo de terroríficos agentes químicos y biológicos (afán que aún continúa en las grandes potencias). En marzo de 1983, el entonces presidente de Estados Unidos, Ronald Reagan, anunció la intención de su gobierno de desplegar un sistema defensivo con base en el espacio, el



Strategic Defense Initiative (SDI), al que la prensa puso el sobrenombre de «Guerra de las galaxias», pues empleaba armas de rayos láser y de partículas cargadas, diseñadas para destruir cabezas nucleares dirigidas a Estados Unidos durante su trayectoria orbital. Ningún campo de las ciencias y la tecnología escapa ahora a la posibilidad de ser utilizado como arma.

## REVOLUCIÓN SOCIAL

El enorme crecimiento de las ciudades, sobre todo durante la primera mitad del siglo XIX, fue un fenómeno demográfico sin precedentes. A partir de 1870 el campo se fue vaciando a favor de las grandes capitales. Masas de gente, atraídas por los puestos de trabajo que ofrecía la industria e impulsadas por la tecnificación agraria que reducía la mano de obra, provocaron que las ciudades comenzaran a crecer de manera desordenada. Los obreros se hacinaban en inmundas casas de vecindad, en sótanos de viejos arrabales o en chabolas del extrarradio. Las zonas residenciales, los centros administrativos y políticos apenas tenían que ver con los barrios fabriles y obreros y se zonificaron las ciudades.

Otro fenómeno acompañó al crecimiento demográfico: la emigración. Se ha calculado que entre 1800 y 1930 abandonaron Europa unos cuarenta millones de habitantes. El proceso fue lento, hasta las crisis económicas y políticas de 1846-1848, momento en que se acentuó, aunque no alcanzó gran intensidad hasta el último cuarto del siglo XIX. Entre 1900 y 1914 se acrecentó aún más.

## Presente y futuro

A lo largo de las páginas precedentes hemos visto cómo el clima y el ineludible cumplimiento de las Fuerzas de la Vida han dirigido la evolución y la historia de la especie humana. En el futuro, nuestra evolución biológica y cultural seguirá condicionada por el mejor cumplimiento de tales exigencias.

Numerosos científicos y estudiosos de diversas materias aseguran que hemos dejado atrás la era geológica del Holoceno para adentrarnos en una nueva etapa, el Antropoceno. El término fue propuesto por el premio Nobel Paul Crutzen en el año 2000 para indicar que muchos de los cambios que suceden hoy en el planeta son de origen humano. En el Holoceno las transformaciones que se produjeron en el clima, la geología y la biología de la Tierra fueron provocadas por causas naturales: acontecimientos astronómicos y de la radiación solar, caídas de algunos meteoritos o la actividad volcánica. En el Antropoceno los cambios climáticos, geológicos y biológicos que están comenzando a producirse son, en gran parte, achacables a la actividad del ser humano.

En el Congreso Internacional de Geología celebrado en 2016 en Ciudad del Cabo se acordó como fecha oficial de inicio del Antropoceno el 16 de julio de 1945, cuando se hizo explotar la primera bomba atómica. A partir de ahí, una serie de repetidos ensayos nucleares han llenado la atmósfera y el suelo de nuestro planeta de un material poco abundante durante toda la historia de la Tierra: los elementos radioactivos. Se ha llegado a decir que de la misma forma que una capa de sedimento de iridio marcó el acontecimiento catastrófico que ocasionó la extinción de los dinosaurios, la señal que

permitirá a los geólogos del futuro identificar el comienzo del Antropoceno serán los sedimentos de material radioactivo en las rocas y en el fondo de los océanos. Varios cambios definen este período geológico en el que nos vamos adentrando:

1. El aumento de la extinción de animales y plantas, que podría llegar a ocasionar la desaparición del setenta por ciento de las especies en pocos siglos. Es lo que algunos científicos denominan «la sexta extinción».

2. El aumento de la temperatura media, de los niveles de CO<sub>2</sub> y de otros gases en la atmósfera.

3. Las modificaciones geológicas y ecológicas de amplios territorios a causa de la deforestación, los cambios artificiales de los cursos de las aguas y de las costas marinas y la urbanización sin control.

4. La abundancia de plásticos en los océanos, que llegan a entrelazarse y constituir estructuras permanentes, a modo de islas de basura de grandes dimensiones.

5. El aumento de nitratos y fosfatos en los suelos y acuíferos, debido al abuso de los fertilizantes agrícolas y de partículas de carbón procedentes de la utilización de los combustibles fósiles.

El planeta constituye nuestra casa y es el que nos proporciona, en las dosis necesarias, la materia y la energía que necesitamos los seres vivos para sobrevivir y evolucionar. Pero el equilibrio se está alterando y, si la humanidad no pone algún remedio, tendrá consecuencias impredecibles.

## EL CLIMA HOY

La Antártida es un inmenso continente helado, pero tan seco como el desierto del Sahara. Cada año caen solo unos pocos centímetros de nieve, que se congela y se transforma en una fina capa de hielo sobre la que caerá la nieve del año siguiente. Al caer, la nieve aprisiona entre sus copos motas de polvo atmosférico y burbujas de aire que se quedan encerradas en el nuevo manto de hielo. De esta manera, a lo largo de miles de años se han ido depositando capas sucesivas de hielo, gases y polvo atmosférico como si fueran las páginas del libro de la historia climática de la Tierra.

A finales del siglo pasado un grupo de investigadores realizó una perforación de 3.600 metros de profundidad en un lugar del centro de la Antártida llamado Vostok, que pertenece a la zona controlada por Rusia. En la estudio se obtuvieron unas muestras de hielo que se remontaban a cientos de miles de años de antigüedad. Los cilindros de hielo fósil fueron debidamente guardados para su posterior análisis en el laboratorio y en ellos se podían identificar con facilidad, a simple vista, los segmentos de hielo correspondientes a cada año.

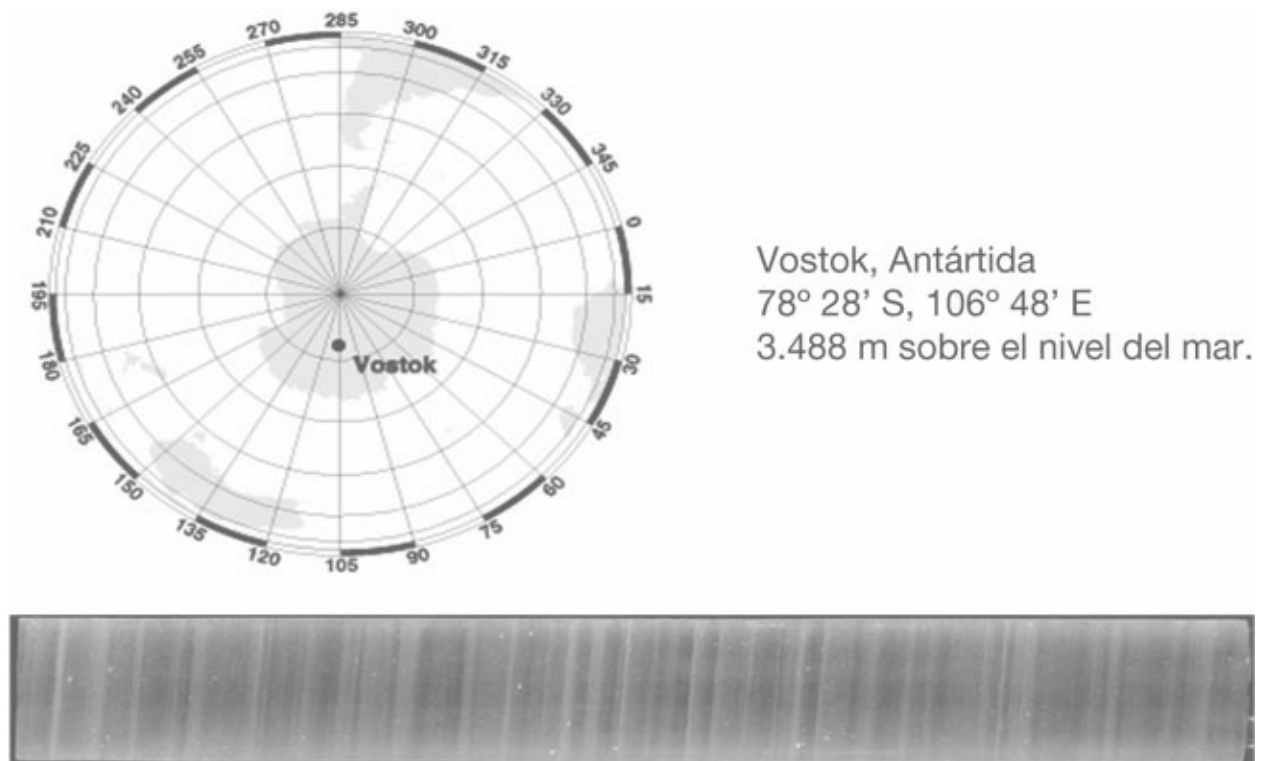


Figura 26.1. Ejemplo de una porción de cilindro de hielo antártico extraído mediante perforación en la base de Vostok. Petit *et al.*, *Nature*, 1999.

Los análisis realizados permitieron conocer, por ejemplo, las variaciones de temperatura y de contenido de gases a lo largo de los últimos miles de años. En las páginas precedentes hemos recurrido en varias ocasiones a los datos de Vostok para describir cómo en los últimos cuatrocientos mil años la temperatura ha ido oscilando en ciclos alternativos de calor y frío. Pero estos estudios también muestran de qué modo la concentración de gases

atmosféricos ha fluctuado en paralelo con la temperatura a lo largo de ese gran intervalo de tiempo: cuanto más alta era la temperatura, tanto mayor resultaba ser la concentración de dióxido de carbono y viceversa.

La concentración atmosférica del  $\text{CO}_2$  comenzó a aumentar en el siglo XX y el fenómeno continúa en el siglo XXI. Antes del comienzo de la revolución industrial la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera era de unas 280 partes por millón (ppm), pero en el año 2010 se alcanzó la cifra de 390 ppm. La subida es aproximadamente de un cuarenta por ciento. Aunque la mayor parte de este incremento es atribuible a la quema de combustibles fósiles en la generación de electricidad, y a la actividad de la industria y del transporte, se calcula que un 35 por ciento del aumento en los últimos trescientos años se debe a los cambios de usos del suelo producidos por el desarrollo de la agricultura y la ganadería. En las últimas décadas, el incremento anual de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el aire, con grandes variaciones entre unos años y otros, fue de unas 2 ppm, es decir, un 0,5 por ciento por año. De continuar este ritmo de crecimiento se alcanzaría en el 2100 algo más de las 600 ppm. Muy por encima de las 300 ppm de dióxido de carbono alcanzadas en los máximos históricos.

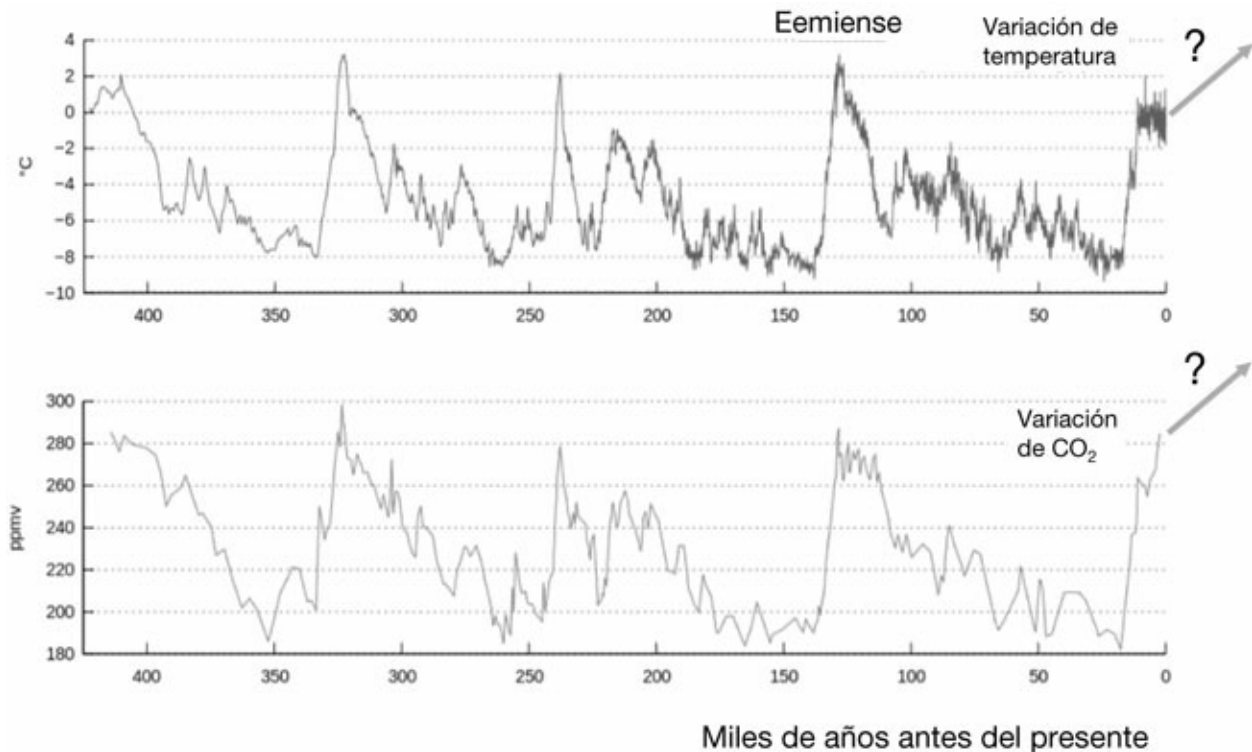


Figura 26.2. Variaciones en la temperatura atmosférica (grados centígrados) y en los niveles de CO<sub>2</sub> (partes por millón en volumen) medidos en las muestras extraídas de los hielos antárticos. Petit *et al.*, *Nature*, 1999.

## EL CLIMA DEL FUTURO

Los factores que pueden determinar el clima del planeta son tan diversos y aleatorios que es muy difícil elaborar una predicción con visos de certeza. Tampoco podemos estar seguros de que un calentamiento del planeta sea especialmente perjudicial. Se ha reiterado a lo largo de las páginas de este libro que la sequía ha acompañado siempre a los períodos fríos y las hambrunas y que, por el contrario, los períodos cálidos se han asociado con un aumento de la humedad, de las precipitaciones y la abundancia de alimentos.

Es arriesgado extrapolar conclusiones, pero la mayor parte, si no todas, de las peores etapas de la historia de la humanidad desde el último máximo glacial sucedieron en períodos fríos y secos. Con frecuencia las penurias climáticas se agravaron por las guerras y las epidemias desencadenadas por el propio cambio del clima. La gente es capaz de pelear hasta la muerte cuando se está muriendo de hambre o de sed. Es casi imposible encontrar alguna evidencia arqueológica o histórica de una crisis humana negativa ocasionada por un calentamiento climático y un aumento de la humedad. El calentamiento reciente (unos 0,85 °C desde 1880 hasta 2012) es muy pequeño en comparación con otras fases de calentamiento ocurridas en el reciente Holoceno, todas por causas naturales.

Se ve claro a través de la historia que las fuerzas naturales pueden ocasionar cambios climáticos significativos. A lo largo de los últimos dieciocho mil años, el nivel de los océanos subió a un ritmo mayor que el que se observa en la actualidad. En el próximo siglo el calentamiento global va a ser inferior al sufrido hace once mil seiscientos años. Al final del Dryas reciente la temperatura global media aumentó en 7 °C mientras que la predicción del aumento para los próximos cien años es de menos de 3 °C.

Cuando se consideran los datos obtenidos del hielo antártico se ve que temperaturas y niveles de dióxido de carbono fluctúan en paralelo. Pero el aumento del CO<sub>2</sub> podría haber causado el incremento de la temperatura y

también podría darse lo contrario. Por ejemplo, una mayor temperatura podría ocasionar una mayor densidad de la vegetación a nivel mundial o contribuir a una mayor salida a la atmósfera del gas disuelto en los océanos. Numerosos estudios señalan el gran efecto invernadero que ocasionan los gases (sobre todo metano) expulsados por las ventosidades de los herbívoros a causa de la fermentación intestinal de los vegetales que ingieren. Por otra parte, no conviene olvidar que todas las plantas están lanzando continuamente CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Es el producto natural de su metabolismo oxidativo, que es la forma mediante la cual las plantas obtienen energía. Solo durante el día, cuando reciben los fotones de la energía solar, realizan el proceso de fotosíntesis, en el cual liberan a la atmósfera el oxígeno que producen.

#### EL FUTURO DE LAS FUERZAS DE LA VIDA

A partir de la mitad del siglo pasado, tras la segunda guerra mundial, se inició el proceso de creación de un nuevo orden mundial con tantas repercusiones para las Fuerzas de la Vida como supuso hace cinco mil años la creación de los grandes imperios: es la llamada globalización. Vamos a ver cómo esta influye, o puede influir en el futuro, desde una perspectiva fisiológica, en la nutrición, la reproducción, la defensa y la comunicación. La era en la que la humanidad ha comenzado a dar sus primeros pasos se caracteriza por la globalización e informatización de estas fuerzas. Y la presión más fuerte que se ha de soportar es el extraordinario crecimiento demográfico que ya padecemos y que se prevé que aumentará en un futuro inmediato. Según todos los estudios, a mediados de siglo, si no sobreviene algún cataclismo, habremos superado los nueve mil millones de habitantes. Toda esta ingente masa de seres humanos se moverá a impulsos del único estímulo que ha animado la vida sobre este planeta. Todo el orden político y económico mundial en el futuro estará basado en financiar este empeño.

Año	<i>Millones de habitantes</i>			
	2015	2030	2050	2100
Todo el mundo	7.349	8.501	9.725	11.213
África	1.186	1.679	2.478	4.387
Asia	4.393	4.923	5.267	4.889
Europa	738	734	707	646
Latinamérica y Caribe	634	721	784	721
Norteamérica	358	396	433	500
Oceanía	39	47	57	71

En 2015, el 50,4 por ciento de la población mundial eran hombres y el 49,6 por ciento, mujeres.

Tabla 26.1. Previsiones de crecimiento de la población mundial. Datos obtenidos de Naciones Unidas, Departamento de Economía y Asuntos Sociales, Sección de Población (2015).

## ALIMENTACIÓN Y NUTRICIÓN

Una parte de la población se enfrenta al hambre constante con la misma crudeza que hace doscientos mil años y, en la actualidad, sigue viviendo en la desnutrición y la miseria: miles de millones de habitantes continúan padeciendo el hambre, la sed y las enfermedades asociadas con la escasez.

Del otro lado están las sociedades desarrolladas y opulentas, que dedican tecnología y medios sofisticados para producir alimentos en cantidades como nunca los hubo en la historia de la humanidad. Esto va en contra de nuestro diseño ahorrador y provoca las enfermedades de la opulencia (obesidad, diabetes, hipertensión, problemas cardiovasculares, etc.). En las sociedades opulentas proliferan las industrias de los alimentos y las bebidas. Su negocio es aplacar el hambre y la sed y proporcionar en grandes cantidades los placeres de la saciedad y de los sabores. Se desarrollan y tecnifican las industrias agrícolas, pesqueras y ganaderas, con métodos que incluso llevan a criar vacas haciéndoles escuchar música de Mozart y dándoles masajes diarios. Nos asedian con programas televisivos sobre gastronomía y



alimentación, así como con anuncios publicitarios. Pero el enemigo no solo es el exceso de comida, sino también los contaminantes y aditivos necesarios para mantener ese nivel de producción y de distribución.

La desigualdad de este reparto estriba en que el ochenta por ciento de las personas que viven en los países pobres, en los que se pasa hambre, son las que producen las materias primas que sustentan la opulencia de los países ricos. Millones de hombres, mujeres y niños de naciones en desarrollo cultivan y preparan las materias primas para el puñado de empresas que se encargan de la distribución de los alimentos en los grandes supermercados de los países desarrollados y opulentos. Estos países pobres son también los que van a recibir y almacenar los desechos de la sociedad opulenta.

Los cultivos proporcionan el noventa por ciento de la ingesta calórica de la humanidad. Este porcentaje es tan elevado que la superficie de terrenos cultivables es un factor clave para la supervivencia de la especie humana y para que el crecimiento poblacional de las próximas décadas se pueda producir sin la amenaza de severas hambrunas. La población mundial seguirá creciendo, y eso traerá consigo que la demanda de alimentos no dejará de aumentar y, con ella, la superficie necesaria para producirlos.

Considerado el conjunto de la humanidad, el consumo de alimentos ha aumentado de 2.250 a 2.750 Kcal por persona y día. En términos absolutos, el mayor incremento se ha producido en la demanda de cereales. En términos relativos, los alimentos que más han aumentado su consumo son los vegetales, las frutas, las carnes, los aceites vegetales y los estimulantes (café, té, drogas). Tanto los tubérculos como las legumbres se consumen ahora en menor proporción que antes. En general, en las zonas ricas la ingestión de proteínas animales resulta elevada, mientras que en las zonas pobres tiene más importancia las de cereales y tubérculos.

La necesidad de suelo para producir alimentos ha aumentado en términos absolutos, pero ha disminuido la superficie necesaria por persona: en 1963 hacían falta 2.650 m<sup>2</sup> por persona y año, pero en 2005 esa necesidad era de 1.700 m<sup>2</sup>. Hoy se requieren dos tercios de la superficie que se necesitaba hace cuarenta años para alimentar a una persona. Los productos para los que más se ha reducido la superficie necesaria para su cultivo son los cereales y las proteínas animales, pero mientras los primeros han pasado de requerir el

cuarenta por ciento de la superficie agrícola en 1963 al 31 por ciento en 2005, la producción de proteínas animales ha pasado de utilizar el 35 por ciento de la superficie ganadera hace cuarenta y dos años a utilizar el 38 por ciento en la actualidad.

Una conclusión importante de este estudio es que si, efectivamente, se cumplieren las predicciones de una población de nueve mil millones de seres humanos en 2050, haría falta incrementar en un cien por cien (es decir, duplicar) la superficie de suelo destinado a la producción de alimentos, si todos consumieran lo mismo que consumen hoy los norteamericanos y contásemos con la tecnología agrícola actual. Si, en vez de los hábitos de consumo de los estadounidenses, todas las personas comiesen como los europeos occidentales, solo habría que incrementar la extensión de los cultivos en un setenta por ciento.

No obstante, esas no son previsiones realistas. Por un lado, las mejoras en la tecnología de los cultivos y la mayor productividad reducirán la cantidad necesaria de suelo por persona. Por otro, si bien es previsible que cambien los hábitos de consumo en los países emergentes y poco desarrollados, estos no tienen por qué acabar siendo iguales a los de los occidentales. Y finalmente, es también posible que la población mundial no alcance ese máximo de nueve mil millones que prevén las estadísticas. La tecnificación permitirá utilizar más cantidad de suelo, se incrementará el reciclaje y la reutilización de residuos, mejorará la genética de las especies animales y vegetales, se promoverá la educación nutricional de la población y, probablemente, seguirá habiendo presiones sobre los recursos básicos (agua, energía y fertilizantes). En cualquier caso, no parece mala idea seguir investigando en ciencia y tecnología agrícola y ganadera.

## LA HUELLA DE AGUA DE LA HUMANIDAD

El agua es el recurso más valioso que existe. Aunque normalmente la asociemos con su uso doméstico, para beber y para limpiar, la mayor parte del agua que se consume en el mundo se dedica a la producción de alimentos: la agricultura y la industria utilizan grandes cantidades, en comparación con el consumo doméstico, que resulta muy pequeño. Un estudio reciente ha

cuantificado la denominada «huella de agua» de la humanidad, un término acuñado por el profesor neerlandés Arjen Hoekstra en 2002. La huella hídrica es un indicador que define el volumen total de agua dulce usada para producir los bienes y servicios de una empresa agrícola, ganadera o industrial, o la consumida por los individuos o por la comunidad. Con el término «huella verde» se designa el agua de lluvia que riega, de forma natural, pastos y cultivos; la denominación «huella azul» se refiere al agua que se extrae de acuíferos subterráneos o se toma de reservas superficiales, como pantanos, y es consumida o se evapora; y el término «huella gris» hace referencia al agua que se contamina debido al uso que se hace de ella.

El destino mayoritario del agua utilizada en todos los países del mundo es la producción agrícola. Considerada en su conjunto, esa producción es responsable del 92 por ciento de la huella hídrica total. La producción industrial, sin embargo, utiliza menos agua, un 4,4 por ciento, aunque en algunos países esa fracción es muy superior. El 22 por ciento del uso mundial de agua con fines industriales se produce en China y el 18 por ciento en Estados Unidos. ¡Tan solo el 3,6 por ciento del agua que se consume en el mundo se utiliza para bebida y uso doméstico!

Pero no toda el agua circula por el planeta en forma de agua, como tal. Gran parte fluye de forma virtual. Los campos de maíz en América consumen mucha agua para que la planta crezca y madure la mazorca; después, algo más para el procesamiento industrial de lavado y preparación de los granos de maíz. Cada mañana, cuando ingerimos un tazón de cereales con leche, consumimos de manera «virtual» unos trescientos litros de agua utilizada en el cultivo y preparación del maíz y en la cría de las vacas y el procesamiento industrial de la leche. ¡Una bañera llena hasta rebosar de agua gastamos con cada ración de cereales del desayuno! La mayor parte del flujo virtual de agua (43 por ciento) corresponde al comercio de productos vegetales del tipo del algodón, la soja, la palma y el girasol, así como de los derivados de estos. Los mayores exportadores de agua virtual son Estados Unidos, Canadá, Brasil, Argentina, India, Pakistán, Indonesia, Tailandia y Australia, y los mayores importadores son el norte de África, Oriente Medio, México, Europa, Japón y Corea del Sur.

En la actualidad estamos llegando a la conclusión de que hay en el mundo mayores reservas de petróleo que de agua dulce. Con las nuevas técnicas de extracción que se están utilizando, como el fracking, las posibilidades de extracción de petróleo se han duplicado. En el siglo pasado y en el presente se han desencadenado muchas guerras por miedo a la escasez de este combustible fósil. En el futuro es posible que, al menos en ciertas áreas del mundo, se agudicen las tensiones que genera el consumo de agua y esta pueda ser causa de conflictos.

## REPRODUCCIÓN Y SEXUALIDAD

Esta es una de las Fuerzas de la Vida que más transformaciones está sufriendo hoy día con respecto a los mecanismos diseñados por la evolución y hasta las previsiones menos favorables auguran que los cambios por venir superarán con creces a los actuales. Una de las principales tendencias, que ya comienza a estar vigente en nuestros días, es la separación entre reproducción propiamente dicha y la actividad sexual.

En estos cambios hay implicaciones de diversa índole. En primer lugar, está la cuestión tecnológica. Es indudable que la tendencia en los avances en la tecnología biomédica permitirá una revolución reproductora fácil y barata. En segundo lugar, se hallan los aspectos sociales, legales y políticos que están implicados en la actividad reproductora de la especie, ya que es la base del más grave problema futuro: la superpoblación del planeta. En tercer lugar, se encuentran los problemas de índole ética y religiosa. Vamos a esbozar los principales cambios que se avecinan. Para el lector interesado le remito a la abundante bibliografía que existe.

### *1. El control de la fertilidad*

Este es uno de los aspectos de la reproducción que lleva en marcha desde los años cincuenta del siglo pasado, tras el desarrollo de los métodos anovulatorios hormonales, seguidos por los de barrera femeninos (diafragma), masculinos (preservativo) y los quirúrgicos irreversibles (ligadura de las

trompas en la mujer o de los conductos seminales en el hombre). En el futuro se dispondrá de métodos más eficaces sin los efectos secundarios ni las molestias que ocasionan los actuales.

## 2. Reproducción sin sexo y según diseño

Desde hace ya más de un cuarto de siglo se viene realizando con éxito y de manera rutinaria en todo el mundo la fertilización *in vitro*. Los espermatozoides se unen al óvulo en una placa llena de un líquido nutritivo. Luego varios de los embriones resultantes se introducen en el útero de una mujer y, días después, una vez comprobados cuántos se han implantado con éxito, se deja solo uno o más, según los deseos de la madre o a la espera de un tiempo prudencial por si hay problemas. Los gametos involucrados en el proceso pueden provenir de los propios padres o de donantes anónimos. Y los embriones pueden implantarse en el útero de la propia madre o en una mujer que voluntariamente y previo un acuerdo contractual, se somete a lo que se denomina técnicamente subrogación de maternidad o, vulgarmente, vientre de alquiler.

Las investigaciones genéticas y sobre las llamadas células madre van a permitir traer al mundo seres a los que se añadan, quiten o sustituyan genes a demanda de los progenitores o del consejo médico. Ya es posible hacer diagnóstico genético de los embriones fecundados *in vitro* antes de su implantación en el útero y con esa información decidir a cuál de ellos se da la oportunidad de convertirse en un niño o niña. Por el momento, esta técnica es principalmente informativa, muy cara y aún peligrosa y con pocas garantías. Pero, dado el ritmo en el progreso de la tecnología genética, en un futuro no muy lejano estos procedimientos serán rutinarios, baratos y con mínimas complicaciones. Permitirán evitar enfermedades, seleccionar las características físicas e intelectuales, la conducta y otros muchos rasgos en el embrión que vaya a convertirse en una criatura.

Por otra parte, las investigaciones van a permitir fabricar óvulos y espermatozoides a partir de las propias células madre de los progenitores. Con estas técnicas se podrán fabricar clones, individuos genéticamente idénticos a los progenitores. La clonación ya se viene practicando en animales

desde hace décadas (recuerden la oveja Dolly) mediante el trasplante de núcleos. Solo las consideraciones éticas y religiosas, que no tecnológicas, impiden actualmente la legalización de la clonación en los seres humanos.

En los próximos cincuenta años, para la mayoría de los seres humanos, la reproducción se realizará sin actividad sexual. Ya no concebirán sus hijos en la cama, en el asiento trasero del coche o tras una tapia de piedra. Sus gametos se unirán en la atmósfera estéril de una clínica de fertilización *in vitro*. El material genético de los embriones se analizará cuidadosamente para decidir a cuál de ellos se le dará la oportunidad de continuar el proceso hasta su nacimiento. Más pronto de lo que imaginamos, los seres humanos podrán seleccionar conscientemente las características físicas e intelectuales de sus hijos, como ya se viene pronosticando desde tantas novelas de ciencia ficción, comenzando por el clásico *Un mundo feliz*, de Aldous Huxley.

### *3. El nuevo concepto de familia*

El núcleo familiar formado por los padres y las crías correspondientes es una forma de cooperación parental que solo se da en algunas aves y en los seres humanos. Ya comentamos que ello surgió a lo largo de la evolución para poder sacar adelante a crías que nacían muy desvalidas, incapaces de alimentarse por sí mismas. En los seres humanos, la familia ha llegado hasta nuestros días como la manera más eficaz de superar ese período crítico en la vida que es la infancia. Pero en la actualidad los sistemas sociales, educacionales y sanitarios han cambiado la situación modificando la estructura familiar tradicional y, en ciertos términos, haciéndola innecesaria.

Hoy día, y se acrecentará en el futuro, es posible criar a un niño con un solo progenitor. Es el caso de madres solteras que se inseminan con espermatozoides de donantes anónimos o de padres solteros que proporcionan sus espermatozoides para fecundar óvulos de donantes a desarrollar en úteros subrogados. Hoy abundan las familias en las que ambos progenitores son del mismo sexo (madres o padres homosexuales). Y saltando la barrera que la biología impuso a la edad de la maternidad y gracias a la tecnología obstétrica, hoy se pueden tener hijos propios a edades muy avanzadas, superando la frontera natural de la menopausia. Incluso están en fase avanzada

de investigación los llamados úteros artificiales. Esto permitirá que los últimos meses de desarrollo fetal transcurran en una burbuja mecanizada liberando a la madre de más de la mitad de los meses de embarazo.

#### *4. El placer del sexo*

La reproducción sexual en los animales es una actividad arriesgada y no estrictamente necesaria para la supervivencia del individuo, sino de la especie. Por esta razón, la naturaleza premia a los individuos que contribuyen a la realización de esta Fuerza de la Vida, que no les atañe de manera individual, con el placer sexual. La sensación placentera asociada al orgasmo es especialmente intensa en la especie humana. Por eso el sexo siempre ha sido una circunstancia importante en nuestra evolución y en nuestra historia. Sin embargo, jamás ha alcanzado las cotas que se han logrado en la actualidad y que, según se prevé, se incrementarán en el futuro. Los factores involucrados son, fundamentalmente, la práctica del sexo sin prejuicios sociales o morales, la prostitución, la pornografía y el sexo virtual mediante las nuevas tecnologías informáticas. El sexo constituye hoy una de las actividades empresariales más productivas en el mundo y emplea (con o sin su voluntario consentimiento) a muchos millones de personas.

Desde los movimientos de liberalización sexual asociados a grupos juveniles, como el movimiento *hippie* de los años sesenta del siglo pasado, el sexo se ha desmitificado en la mayor parte de las sociedades desarrolladas. Además, hoy existe un elevado grado de educación sexual desde la escuela. Esto ocasiona que la mayor parte de la gente que habita las sociedades democráticas practique sexo como una opción madura, libre y responsable (algunos no tanto) de disfrute personal sin necesidad de estar vinculado al matrimonio u otras formas de relación estable de pareja.

La pornografía hoy ha abandonado su marco tradicional de dibujos, revistas y novelas para irrumpir con fuerza en las nuevas tecnologías. Hoy día cada uno de nosotros tiene al alcance de un clic del ratón de su ordenador miles de películas X gratuitas con una extraordinaria variedad capaz de satisfacer los requerimientos más exóticos de cada usuario. Además, esta pornografía permite una intimidad que favorece su utilización por todos los

públicos y ha facilitado el acceso de las mujeres a una actividad que antes estuvo monopolizada por los hombres. Un estudio asegura que, actualmente, cada segundo hay treinta mil personas consumiendo pornografía a través de Internet. El negocio del porno mueve tal cantidad de dinero que estimaciones del año 2006 (y desde entonces han aumentado sus ganancias) le adjudican unos beneficios anuales de casi cien mil millones de dólares.

A la prostitución se la ha denominado el oficio más viejo del mundo. Es posible que ya en la cueva prehistórica se intercambiaban favores sexuales por un pernil de bisonte. Yo personalmente creo que la profesión más antigua del mundo es la mía, la de médico. Pienso que es probable que en la cueva prehistórica, antes que una prostituta, hubiera una mujer, la más vieja de la tribu, que conociese cómo utilizar remedios para sanar las dolencias, quizá también a cambio de un pernil de mamut. Por desgracia, hoy día la prostitución es también uno de los negocios más boyantes a nivel mundial y me temo que lo seguirá siendo a pesar del esfuerzo de diversas organizaciones sociales y gobiernos para evitarlo.

Los avances tecnológicos van a revolucionar la sexualidad en las próximas décadas, como ya lo está haciendo en el presente. Se están fabricando robots con programación de actividad sexual, ya se puede practicar sexo con un holograma y se venden pantis vibradores que proporcionan orgasmos en el metro mientras se regresa de una larga jornada de trabajo, condones inteligentes y todo lo que usted pueda imaginar.

## *5. El antinatalismo*

En los últimos años está poniéndose en boga un movimiento relacionado con la reproducción humana que se denomina «antinatalismo». El principal inspirador de este movimiento es David Benatar, director del departamento de Filosofía de la Universidad de Ciudad del Cabo, Sudáfrica, a través de su obra «Better Never to Have Been (Mejor nunca haber existido)». Su pensamiento radical proclama que lo mejor que puede hacer la humanidad es dejar de procrear para lograr la extinción de los seres humanos de la faz de la Tierra. En su versión más suave este movimiento aboga por una reducción drástica de la población mundial hasta unos límites tolerables para la ecología



del planeta. Los medios principales para lograr estos objetivos serían la anticoncepción irreversible (esterilización de hombres y mujeres), el uso de métodos anticonceptivos reversibles y el aborto.

## DEFENSA

La especie humana va a seguir desarrollando métodos que le permitan una defensa eficaz frente a enemigos internos y externos. Veamos cuáles son.

### *1. Enemigos internos*

Este apartado se refiere a los agentes vivos, como virus, bacterias, hongos y parásitos diversos, que cada vez nos acechan con más virulencia, fundamentalmente a causa de dos fenómenos propios de nuestro tiempo: la globalización y la densidad de población. Recuerden cómo en los últimos años están rebrotando formas de enfermedades que creíamos controladas, ocasionadas sobre todo por virus y bacterias. Se favorece su transmisión por la globalización, la congestión demográfica y el contacto social y sexual. Los mecanismos de defensa se sustentan en tres pies: los gobiernos, la medicina moderna y las potentes industrias farmacéuticas. De nuevo, una Fuerza de la Vida es origen de un gran negocio mundial.

La medicina personalizada basada en los genes ya ha comenzado. Pronto, todos conoceremos desde el nacimiento nuestras miserias y glorias genéticas. Desde hace decenios se vienen haciendo pruebas a los niños para determinar algunos problemas metabólicos, como la fenilcetonuria. En unos pocos años, también se realizará un mapa genético completo al nacer. Desde el nacimiento dispondremos de un DIG, un documento de identidad genética. ¿Qué implicaciones podrá tener esto en relación con los seguros de vida, los contratos laborales, el encontrar pareja, etc.? Si esto les parece ciencia ficción recuerden que hasta hace poco en algunos estados de Estados Unidos se exigía un certificado médico de los contrayentes antes de la boda.

Gran parte de los problemas médicos del futuro tendrán que ver con las enfermedades crónicas degenerativas, ya sean mentales, como la enfermedad de Alzheimer y otras demencias, u orgánicas. La medicina del futuro será preventiva y sustitutiva. Cuando un órgano se vea dañado por cualquier causa será suplido mediante un trasplante de otro órgano sano o por la colocación de un artilugio que cumpla esas funciones. Ya se hace, por ejemplo, con el corazón y algunos de sus componentes, como las válvulas o los marcapasos.

## *2. Enemigos externos*

La industria armamentística maneja presupuestos que superan los de muchos estados desarrollados. El gasto militar global anual se cifra en casi un billón de dólares. Según el dato que poseo, del año 2008, Estados Unidos facturó en armamento más de seiscientos mil millones de dólares. Y por el momento no hay ningún indicio de que la voluntad de los gobiernos sea reducir esas cifras; me temo que las cosas irán en sentido contrario.

Además de los enemigos vivos, la humanidad tiene que estar dispuesta a enfrentarse con éxito a los otros peligros que nos acechan. Los seres humanos pueden verse amenazados por la caída de algún objeto espacial de tamaño voluminoso, por las erupciones volcánicas catastróficas que pueden desencadenarse en cualquier momento, así como por los terremotos, los huracanes o las tormentas magnéticas solares. Si tenemos en cuenta la historia del planeta, sabemos que cualquiera de estos percances va a ocurrir. La única duda es cuándo.

## DOLOR, INFELICIDAD Y ABURRIMIENTO

Nuestros antecesores prehistóricos, como cualquier otro animal, dedicaban gran parte de sus horas de actividad a sobrevivir. Pero, a medida que los progresos tecnológicos les facilitaban esa tarea, comenzaron a disponer de horas de ocio. Su cerebro consciente se encargó de llenar esos huecos con el entretenimiento. Y comenzaron los mitos, los relatos, la expresión artística, la música, las creencias y demás manifestaciones de ese deseo ineludible del ser

humano de llenar con actividad cerebral inventada la ausencia de ocupación mental real. Incluso la necesidad del cerebro de llenar ese vacío llevó a nuestros ancestros a explorar todas las posibles drogas que les facilitaran esa ocupación virtual, desde el alcohol, descubierto muy pronto, hace diez mil años, hasta todas las plantas y hongos que, al consumirse en ciertas cantidades, proporcionaban las experiencias y la felicidad que sus cerebros ociosos reclamaban.

En el mundo en que vivimos cualquier habitante de los países desarrollados tiene cubiertas todas las necesidades vitales. Incluso en las naciones en vías de desarrollo, a las que los países ricos denominamos pobres por sus múltiples carencias, sus habitantes cumplen hoy con las Fuerzas de la Vida en mejores condiciones que lo hacían nuestros ancestros hace cien mil años. Hoy día existen en el mundo miles de millones de cerebros ociosos que disfrutan de una vivienda, comida suficiente, cuidados para su prole, sexo fácil, tratamiento de sus enfermedades, un gobierno y un ejército que les garantiza una defensa frente a los peligros y una cierta seguridad para los años difíciles de la vejez. Y, sin embargo, pertenecen a miles de millones de personas infelices, vacías, pues los cerebros ociosos exigen actividad, ya sea real o imaginada. En el futuro, y ya en nuestros días, una enorme actividad económica y laboral estará dedicada a proveer de ese complemento necesario a nuestro cerebro cada vez más ocioso: las drogas y los entretenimientos.

Las drogas naturales, fundamentalmente heroína, cocaína, marihuana, tabaco y alcohol, mueven muchos miles de millones de euros al año en todo el mundo, ocupan enormes extensiones de cultivos y emplean a millones de personas en todos los escalones del negocio: producción, elaboración y distribución. Pero desde hace unos años están aumentando las drogas sintéticas, elaboradas por imitación de la estructura química de los más potentes neurotransmisores cerebrales o de sus mecanismos de acción: son las llamadas también drogas de diseño. Son fáciles de fabricar en el cuarto de baño de cualquier domicilio y de distribuir, gracias a su pequeño tamaño. En tercer lugar, debemos considerar también las drogas de uso terapéutico, las que el médico debe recetar para tratar esas enfermedades que hoy arrasan en las sociedades opulentas y que, en gran parte, son la consecuencia negativa de

la ociosidad cerebral. En la actualidad el consumo de tranquilizantes y pastillas para dormir está alcanzando cotas alarmantes en España y, por supuesto, en los países con nuestro mismo nivel de ociosidad.

Desde la prehistoria, una de las formas de combatir la ociosidad cerebral fue el juego, infantil o para adultos. De nuevo, en cualquier modalidad de este, ya sea deportivo o de mesa, la base del argumento siempre tiene relación con la caza, la defensa, como se observa con claridad en los deportes de competición, en el atletismo y en los juegos infantiles. Se ensayan y entrenan músculos y reflejos que solo están diseñados para la supervivencia y la caza. Eso mismo sucede cuando jugamos al ajedrez o las damas (unas batallas entre ejércitos imaginarios), al parchís o la oca (una competición por lograr una recompensa) o al monopolio. Hoy día los juegos tradicionales están siendo desplazados a gran velocidad por los electrónicos y cibernéticos; todos ellos con argumentos también relacionados con las Fuerzas de la Vida.

Finalmente, para llenar los ocios y las largas noches invernales, nuestros ancestros paleolíticos inventaron las narraciones, otro gran método que hoy se sacia mediante la lectura, el cine, la televisión y esa herramienta prodigiosa que es Internet, en todas su amplia gama de posibilidades.

## LA SOLEDAD ENTRE LA MULTITUD

Ya hemos visto cómo uno de los factores que han regido la evolución de nuestro cerebro es nuestra capacidad de socialización. También sabemos que uno de los elementos de esa socialización fue el lenguaje articulado y sintáctico que solo nosotros poseemos. Como señala Harari, es un lenguaje que nació para el cotilleo. Para alertar sobre las cosas importantes que tienen que ver con nuestra supervivencia (el merodeo de una leona, la situación de un rebaño de bisontes o la ubicación de una fuente de agua, por ejemplo) no hace falta mucha palabrería, solo algunos gritos, gruñidos y ademanes. Pero otra cosa diferente es contar a las otras hembras del clan a quién ha regalado el jefe de la tribu un collar de conchas que trajo al regresar de su último viaje. Este rico lenguaje luego nos ha servido para el arte, la ciencia, la educación, el amor y la familia, entre otros menesteres.

Hoy la humanidad hace más uso que nunca de esta potencialidad del lenguaje. Nos pasamos todo el día comunicándonos cotilleos, pero hoy lo hacemos a través de la tecnología de la comunicación: Internet, móviles, televisión, radio. Somos capaces de estar en contacto continuo con el resto de los seres humanos sin vernos, sin olerlos, sin tocarlos. Podemos asistir a una cena familiar en la que reina un silencio sepulcral mientras cada uno de los comensales se está comunicando con terceros a través de sus teléfonos móviles. Viajamos en el metro, paseamos por la calle o llevamos a nuestro hijo a un parque comunicándonos sin parar con el resto del mundo a través de los numerosos dispositivos que tenemos a nuestro alcance. Asistimos a un problema que se está dando entre la gente más joven: se les está olvidando hablar por falta de práctica. Esta situación se va a acrecentar en un futuro, puesto que las posibilidades de avances en la tecnología electrónica son casi infinitas. Y cada vez nos sentiremos más solos en medio de esa multitud de miles de millones de seres humanos tan solos como nosotros.

## EL FUTURO IMPERFECTO

¿Sobrevivirá el ser humano los próximos mil años? Ni idea. Hacer previsiones a escala de milenios es una garantía de equivocarse. Son meras conjeturas sin ninguna base en la que sustentarse; es pura fantasía. Ni el escritor de ciencia ficción más imaginativo fue capaz de prever Internet. No tenemos ni idea de las posibilidades tecnológicas que se desarrollarán en el futuro. Mirar dentro de la bola de cristal es un ejercicio muy arriesgado. Por otra parte, algún impredecible accidente, como la caída de un meteorito voluminoso o la explosión de uno de los grandes volcanes como Yellowstone daría al traste con cualquier previsión futura.

Lo único cierto es que nosotros estamos condenados a desaparecer. El destino de cualquier especie es su desaparición y ser sustituida por otra mejor adaptada. Pero el cuándo es imposible de conocer. Pueden ocurrir catástrofes o desarrollarse inventos extraordinarios, como la fusión fría, o conseguir una gran longevidad por métodos genéticos.

Llevamos tres mil quinientos millones de años de vida orgánica, basada en el carbono, y resulta casi seguro que el futuro va hacia la vida inorgánica, basada en el silicio y otros elementos. Desde el 2005 funciona el llamado Proyecto Cerebro Humano, financiado por millonarias dotaciones gubernamentales, que espera recrear en los circuitos electrónicos de un ordenador el funcionamiento de los circuitos neuronales de un cerebro humano. Se dice que en unas pocas décadas podremos disponer de un programa informático que se comportará y realizará todas las funciones intelectuales de un cerebro humano, pero en una máquina.

Puede que el *Homo sapiens sapiens* sea sustituido por el *Homo sapiens ciberneticus*, compuesto por una amalgama de componentes naturales y artificiales, fruto de la robótica y la inteligencia artificial. Ya en la actualidad se pueden implantar chips, circuitos integrados y detectores que permiten suplir funciones que se han perdido, como la vista, el oído o el habla, mediante un ordenador. También se puede disponer de piernas y brazos biónicos que se activan con el cerebro. Uno de los autores citados en la bibliografía de este libro, Stephen Hawking, lleva una vida activa y productiva gracias a los complementos cibernéticos que utiliza.

Desde mi personal punto de vista y según lo aportado por las páginas precedentes, solo podemos estar seguros de que el futuro pertenece a las bacterias. La vida surgió con ellas y, en la actualidad, dominan la vida en el planeta, pues todos los seres vivos somos portabacterias, grandes colonias bacterianas dotadas de movimiento. Por eso es casi seguro que, cuando todo termine, solo quedarán ellas, posiblemente para iniciar un nuevo intento de crear formas de vida más eficaces y seguras.

Lo único cierto es que ninguno de nosotros lo veremos.

# Bibliografía

## INTRODUCCIÓN

- Alvarez, W., *El viaje más improbable*, Crítica, Barcelona, 2017.
- Chaisson, E. J., «The Natural Science Underlying Big History», *Scientific World Journal*, 2014.
- Christian, D., *Mapas del tiempo. Introducción a la «Gran Historia»*, Crítica, Barcelona, 2005.
- García González, J. A., «El determinismo ambiental en dos autores clásicos: Hipócrates y Heródoto», *Baetica, Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 27, Málaga, 2005, pp. 307-329.
- Hamilton, R. H. *et al.*, «Understanding Climate's Influence on Human Evolution. Committee on the Earth System Context for Hominin Evolution»; National Research Council, 2010.
- Hansen, J. E. y M. Sato, «Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change», en A. Berger *et al.* (eds.), *Climate Change*, Springer, Berlín, 2012.
- International Big History Association: <http://www.ibhanet.org/>
- Savater, F., *Las preguntas de la vida*, Ariel, Barcelona, 2005.
- Smithsonian National Museum of Natural History, «Climate Effects on Human Evolution»: <http://humanorigins.si.edu/research/climate-and-human-evolution>.
- Uriarte Cantolla, A., *Historia del clima de la Tierra*, Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz, 2003.

## CAPÍTULO 1

- Aminoff, B. Z., «Entropic definition of human happiness and suffering», *Philosophy Study*, 3, 2013, pp. 609-618.
- Bataner, E., *¿Qué es el universo? ¿Qué es el hombre?*, Alianza, Madrid, 2011.
- Casas, A., «¿Qué había antes del Big Bang?», *El País*, 27/11/15: [http://elpais.com/elpais/2015/11/17/ciencia/1447754148\\_458128.html](http://elpais.com/elpais/2015/11/17/ciencia/1447754148_458128.html)
- Chown, M., *El universo en tu bolsillo*, RBA, Barcelona, 2015.
- Corbella, J., «El universo no empezó con un bang», entrevista a John Mather, *La Vanguardia*, 11/10/16: <http://www.lavanguardia.com/vida/20161011/41909868437/el-universo-no-empezo-con-un-bang.html>
- Gribbin, J., *Biografía del universo*, Crítica, Barcelona, 2007.
- Hawking, S. W., *Historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 2011.
- Lane, N. *et al.*, «Energy, genes and evolution: introduction to an evolutionary synthesis», *Philosophical Transactions of Royal Society of London B, Biological Sciences*, 368, 2013.
- Navratil, V., «Health, ageing and entropy», *School and Health*, 21, 2011, pp. 319-335.
- Schneider, E. D. y D. Sagan, *La termodinámica de la vida*, Tusquets, Barcelona, 2008.
- Smith, K. R. *et al.*, «Energy and Human Health», *Annual Review of Public Health*, 34, 2013, pp. 159-188.
- Toharia, M., *Hijos de las estrellas*, Temas de Hoy, Madrid, 1998.

## CAPÍTULO 2

- Csizmadia, I. G., «From submolecular biology to submolecular medicine. The legacy of Albert Szent-Györgyi», *Journal of Molecular Structure*, 666-667, 2003, pp. 11-24.
- Fernández-Vidal, S. y F. Miralles, *Desayuno con partículas*, Plaza & Janés, Barcelona, 2013.
- Lincoln, D., «The good vibrations of quantum field theories», *Public Broadcasting Service*, 2005.  
<http://www.pbs.org/wgbh/nova/blogs/physics/2013/08/the-good-vibrations-of-quantum-field-theories/>
- Lobo, V. *et al.*, «Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health», *Pharmacognosy Reviews*, 4, 2010, pp. 45-50.
- Rees, M., *Just six numbers*, Basic Books, Nueva York, 2000.
- Srinivasan, T. M., «Prana and electrons in health and beyond», *International Journal of Yoga*, 7, 2014, pp. 1-3.
- Szent-Györgyi, A., «The electronic theory of cancer», *International Journal Quantum Chemistry, Quantum Biology Symposium*, 3, 1976, pp. 45-50.
- Toharia M., *Hijos de las estrellas*, Temas de Hoy, Madrid, 1998.

## CAPÍTULO 3

- Alvarez, W., *El viaje más improbable*, Crítica, Barcelona, 2017.
- Barreiro, M., Balance de energía terrestre.  
[http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico\\_climatologia/Clase3.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/climatologia/teorico_climatologia/Clase3.pdf)
- Font Tullot, I., «La influencia de la electricidad atmosférica en los seres vivos», en *El hombre y su medio ambiente atmosférico*, AEMET, Madrid, 1991. <http://foro.tiempo.com/la-influencia-de-la-electricidad-atmosferica-en-los-seres-vivos-t50900.0.html;msg1082176#msg1082176>
- Hansen, J. E. y M. Sato, «Paleoclimate implications for human-made climate change», en A. Berger *et al.* (eds.), *Climate Change*, Springer, 2012.
- Kirchner, J. W., «The Gaia hypothesis: conjectures and refutations», *Climatic Change*, 58, 2003, pp. 21-45.
- Lean J. *et al.*, «SORCE 4th Annual Science Team Meeting», *The Earth Observer*, NASA, 2006.
- Lovelock, J. *et al.*, *Gaia*, Kairós, Barcelona, 1989.
- Madrid, J. A., M. A. Roly y F. J. Sánchez, «Una aproximación al tiempo en biología», *Eubacteria*, Murcia, 2003.
- OSS Foundation, «Global warming natural cycle», <http://ossfoundation.us/projects/environment/global-warming/natural-cycle>
- Pfeilsticker, K., «Paleo-Climate», Instituto de Física Ambiental, Heidelberg: <http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/>
- Ralf, H., R. H. Anken y H. Rahmann, «Gravitational zoology: How animals use and cope with gravity», en G. Horneck y C. Baumstark-Khan, *Astrobiology. The Quest for the Conditions of Life*, Springer, 2002.
- Riebeek, H., «Paleoclimatology: Understanding the past to predict the future», *The Earth Observer*, NASA, 2006, [http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Paleoclimatology\\_Understanding/](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Paleoclimatology_Understanding/)
- Uriarte Cantolla, A., *Historia del clima de la Tierra*, Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz, 2003.
- Toharia, M., *El clima*, Debate-Random House Mondadori, Barcelona, 2008.



## CAPÍTULO 4

- Arndt, M. *et al.*, «Quantum physics meets biology», *Human Frontier Science Program Journal*, 3, 2009, pp. 386-400.
- Ball, P., «Physics of life: The dawn of quantum biology», *Nature*, 474, 2011, pp. 272-274.
- Bradley, W. L., *Information, Entropy, and the Origin of Life*, Dembski & Ruse, Wako, 2004.
- Campillo, J. E., *Razones para correr*, Ediciones B, Barcelona, 2015.
- Cohen, I. R. y D. Harel, «Explaining a complex living system: dynamics, multi-scaling and emergence», *Journal of Royal Society of Interface*, 4, 2007, pp. 175-182.
- Cooper, G. M., *The Cell: A Molecular Approach*, Sinauer, Sunderland, 2000.
- Crofts, A. R., «Life, Information, Entropy, and Time», *Complexity*, 13, 2007, pp. 14-50.
- Egel, R., «Life its Order, Complexity, Organization, and Its Thermodynamic and Holistic Imperatives», *Life*, 3, 2012, pp. 323-363.
- Francis, M., «Schrödinger's gardenia: Does biology need quantum mechanics? A review of the processes that might exploit quantum weirdness», *Nature Physics*, 2012.
- Gribbin, J., *Solos en el Universo. El milagro de la vida en la Tierra*, Pasado y Presente, Barcelona, 2011.
- Koshland, D. E.Jr., «The Seven Pillars of Life», *Science*, 295, 2002, pp. 2.215-2.216.
- Regis, E., *¿Qué es la vida?*, Espasa, Barcelona, 2009.
- Schneider, E. D. y D. Sagan, *La termodinámica de la vida*, Tusquets, Barcelona, 2005.
- Schrödinger, E., *What is Life?*, Cambridge Press, Cambridge, 1967. (Hay trad. cast.: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1984).
- Shanno, C. E., «A Mathematical Theory of Communication», *The Bell System Technical Journal*, 27, 1948, pp. 379-423.

## CAPÍTULO 5

- Ayala, F. J., *Darwin y el diseño inteligente*, Alianza, Madrid, 2007.
- Chen, I. A., «The Emergence of Cells During the Origin of Life», *Science*, 314, 2006, pp. 1.558-1.559.
- Dawkins, R., *El relojero ciego*, Labor, Barcelona, 1986.
- Gilbert, S. F., «Developmental Biology», Sinauer, Sunderland, 2000<sup>6</sup>; «The Evolution of Developmental Patterns in Unicellular Protists», disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10066/>
- Hawking, S. y L. Mlodinow, *El gran diseño*, Crítica, Barcelona, 2010.
- Hessler, A. M., «Earth's Earliest Climate», *Nature Education Knowledge*, 3, 2011, p. 24.
- Lane, N., *La cuestión vital. ¿Por qué la vida es como es?*, Ariel, Barcelona, 2016.
- Margulis, L. y D. Sagan, *¿Qué es el sexo?*, Tusquets, Barcelona, 1998.
- Michaelian, K., «Entropy Production and the Origin of Life», *Journal of Modern Physics*, 2, 2011, pp. 595-601.
- Monod, J., *El azar y la necesidad*, Barral, Barcelona, 1970.
- Oparin, A. I., *Teoría evolutiva del origen de la vida*, Plaza & Janés, Barcelona, 1979.
- Otto, S., «Sexual Reproduction and the Evolution of Sex», *Nature Education*, 1, 2008, p. 182.
- Sampedro, J., *Deconstruyendo a Darwin. Los enigmas de la evolución a la luz de la nueva genética*, Crítica, Barcelona, 2007.
- Soler, M. *et al.*, *La evolución. La base de la biología*, Proyecto Sur, Armilla, 2003.

Universidad de Montreal, «Earth's Original Ancestor Was "LUCA"». *ScienceDaily*, 2008. [www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081217124200.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081217124200.htm).

## CAPÍTULO 6

Enders, G., *La digestión es la cuestión*, Urano, Madrid, 2015.

Goodenough, U. Y. y J. Heitman, «Origins of eukaryotic sexual reproduction», *Cold Spring Harbor Laboratory Press, Perspectives in Biology*, 2014.

Haeusser, D. P., «By Chance and Necessity: The Role of the Cytoskeleton in the Genesis of Eukaryotes», *Evolution, Physiology and Genetics, Teachers Corner*, 2014. <http://schaechter.asmblog.org/schaechter/2014/04/by-chance-and-necessity-the-role-of-the-cytoskeleton-in-the-genesis-of-eukaryotes.html>

Jékely, G., «Origin and evolution of the self-organizing cytoskeleton in the network of eukaryotic organelles», *Cold Spring Harbor Laboratory Press, Perspectives in Biology*, 2, 2014, p. 9.

Knoll, A. H. *et al.*, «Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans», *Philosophical Transactions of Royal Society of London B, Biological Sciences*, 361, 2006, pp. 1.023-1.038.

Lane, N., *La cuestión vital. ¿Por qué la vida es como es?*, Ariel, Barcelona, 2016.

Moeller, A. H. *et al.*, «Cospeciation of gut microbiota with hominids», *Science*, 353, 2016, pp. 380-382.

Smith, P. A., «The tantalizing links between gut microbes and the brain», *Nature*, 526, 2015, pp. 312-314.

Speer, B. R., «The Archean eon and the Hadean», Museo de Paleontología de la Universidad de California, [http://www.ucmp.berkeley.edu/precambrian/archean\\_hadean.php](http://www.ucmp.berkeley.edu/precambrian/archean_hadean.php)

Tremaroli, V. y F. Bäckhed, «Functional interactions between the gut microbiota and host metabolism», *Nature*, 489, 2012, pp. 242-249.

Wu, G. D. y J. D. Lewis, «Analysis of the human gut microbiome and association with disease», *Clinical Gastroenterology Hepatology*, 11, 2013, pp. 774-777.

## CAPÍTULO 7

Brandt-Bohne, U., «Neurobiología del miedo», *SMS*, 2010. <http://www.science-meets-society.com/wissenschaft-gesellschaft/neurobiologia-del-miedo/>

Cacioppo, J. T. *et al.*, «Social isolation», *Annals of New York Academy of Sciences*, 1.231, 2011, pp. 17-22.

Cortijo, I. *et al.*, «Late Ediacaran skeletal body fossil assemblage from the Navalpino anticline, central Spain», *Precambrian Research*, 267, 2015, pp. 186-195.

Elvira, M. *et al.*, «Regulación neuroendócrina del hambre, la saciedad y mantenimiento del balance energético», *Investigación en Salud*, 2006.

Goldman, J. C., «¿Copulan los animales por placer?», *BBC*, 2014. [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/06/140619\\_vert\\_futsexo\\_animales\\_placer\\_np](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/06/140619_vert_futsexo_animales_placer_np)

Gould, S. J. *et al.*, *El libro de la vida*, Crítica, Barcelona, 1993.

Kelley, A. E. y K. C. Berridge, «The Neuroscience of Natural Rewards: Relevance to Addictive Drugs», *Journal of Neuroscience*, 22, 2002, pp. 3.306-3.311.

Linden, D. J., *La brújula del placer*, Paidós Ibérica, Barcelona, 2011.

Price, T. J. y G. Dussor, «Evolution: the advantage of 'maladaptive' pain plasticity», *Current Biology*, 2014.

- Rüdiger, V., «Mente y cerebro», *Investigación y Ciencia*, 2002.
- Uriarte, A., «El clima del Paleozoico», *RAM*, 13, 2003.
- You, Y. J. y L. Avery, «Appetite Control: worm's-eye-view», *Animal Cells and System*, 16, 2012, pp. 351-356.

## CAPÍTULO 8

- Allman, J. M., *El cerebro en evolución*, Ariel, Barcelona, 2003.
- Cowen, R., «The K/T extinction. History of Life», *Blackwell Science*, 2000.  
<http://www.ucmp.berkeley.edu/education/events/cowen2b.html>
- Kappeler, P. M. *et al.*, «Constraints and flexibility in mammalian social behaviour: introduction and synthesis», *Philosophy Transactions Royal Society of London B, Biological Sciences*, 2013.
- Kass, J. H., «The Evolution of Brains from Early Mammals to Humans», *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Sciences*, 4, 2013, pp. 33-45.
- Scotese, C. R., «Paleomap Project», [www.scotese.com](http://www.scotese.com), 2002.
- Scott, J. P., «Social Mammals», *Access Science*, McGraw-Hill Education, 2016.

## CAPÍTULO 9

- Álvarez-Lario, B. y J. Macarrón-Vicente, «Uric acid and evolution», *Rheumatology*, 49, 2010, pp. 2.010-2.015.
- Blythe, A. W., «Effects of Climate Change on Primate Evolution in the Cenozoic», *Nature Education*, 2016.
- Brosnant, S. F., *A different approach to human evolution. A review of Baboon metaphysics: the evolution of a social mind*, Elsevier, Ámsterdam, 2008.
- Carrigan, M. A. *et al.*, «Hominids adapted to metabolize ethanol long before human-directed fermentation», *PNAS*, 13, 112, 2015, pp. 458-463.
- Drouin, G. *et al.*, «The Genetics of Vitamin C Loss in Vertebrates», *Current Genomics*, 12, 2011, pp. 371-378.
- Dudley, R., *The drunken monkey*, University of California Press, Berkeley, 2014.
- Johnson, R. J. *et al.*, «The Planetary Biology of Ascorbate and Uric acid and their Relationship with the Epidemic of Obesity and Cardiovascular Disease», *Medical Hypotheses*, 71, 2008, pp. 22-31.
- Mondragón Ceballos, R., «La inteligencia maquiavélica de los primates y la evolución del cerebro social», *Salud Mental*, 25, 2002, pp. 29-39.
- Watanabe, S. *et al.*, «Uric acid, hominoid evolution, and the pathogenesis of salt-sensitivity», *Hypertension*, 40, 2002, pp. 355-360.

## CAPÍTULO 10

- Behrensmeyer, A. K., «Climate Change and Human Evolution», *Science* 311, 2006, pp. 476-478.
- Denise, F. S., «The Earliest Hominins: Sahelanthropus, Orrorin, and Ardipithecus», *Nature Education Knowledge*, 4, 2013, p. 11.

- Shannen, L., S. L. Robson y B. Wood, «Hominin life history: reconstruction and evolution», *Journal of Anatomy*, 212, 2008, pp. 394-425.
- Switek, B., «Did Hunger Drive the Evolution of Homo sapiens?», *Wired News*, 2011.
- Teaford, M. F. y P. S. Ungar, «Diet and the evolution of the earliest human ancestors», *PNAS*, 97, 2000, pp. 13.506-13.511.
- The Smithsonian Institution, «Ardipithecus ramidus, Orrorin tugenensis, Sahelanthropus tchadensis», <http://humanorigins.si.edu/evidence/human-fossils/species/>
- Wood, B. y G. B. Richmond, «Human evolution: taxonomy and paleobiology», *Journal of Anatomy*, 197, 2000, pp. 19-60.

## CAPÍTULO 11

- Coppens, Y., *La rodilla de Lucy. Los primeros pasos hacia la humanidad*, Tusquets, Barcelona, 2005.
- Holbourn, A., «Middle to late Miocene stepwise climate cooling: Evidence from a high-resolution deep water isotope curve spanning 8 million years», *Paleoceanography*, 28, 2013, pp. 688-699.
- Kaifu, Y., «Tooth Wear and the “Design” of the Human Dentition: A Perspective From Evolutionary Medicine», *Year Book of Physical Anthropology*, 46, 2003, pp. 47-61.
- Kovacs F., *El libro de la espalda*, Editorial Temas de Hoy, 2015.
- Leakey, R. E., *La formación de la humanidad*, Óptima, Barcelona, 1993.
- Lewin, R. y R. A. Foley, *Principles of human evolution*, Wiley-Blackwell, Hoboken, 2004.
- Neel, J. V., «Diabetes Mellitus: A Thrifty Genotype Rendered Detrimental by Progress?», *American Journal of Human Genetics*, 14, 1962, pp. 353-362.
- Niemitz, C., «The evolution of the upright posture and gait. A review and a new synthesis», *Naturwissenschaften*, 97, 2010, pp. 241-263.
- Speliotes, E. K. *et al.*, «Association analyses of 249,796 individuals reveal eighteen new loci associated with body mass index», *Nature Genetics*, 42, 2010, pp. 937- 948.
- Ungar, P. S., «Dental Evidence for the Diets of Plio-Pleistocene Hominins», *Year Book of Physical Anthropology*, 54, 2011, pp. 47-62.
- William, R., W. R. Leonard *et al.*, «Evolutionary Perspectives on Human Diet and Nutrition», *Evolutionary Anthropology*, 19, 2010, pp. 85-86.

## CAPÍTULO 12

- Amen-Ra, N., «How dietary restriction catalyzed the evolution of the human brain: An exposition of the nutritional neurotrophic neoteny theory», *Medical Hypotheses*, 69, 2007, pp. 1.147-1.153.
- Arsuaga, J. L. e I. Martínez, *La especie elegida. La larga marcha de la evolución humana*, Temas de Hoy, Madrid, 1998.
- Bermúdez de Castro, J. M., *El chico de la Gran Dolina*, Crítica, Barcelona, 2002.
- Desilva, J. M. y J. J. Lesnik, «Brain size at birth throughout human evolution: a new method for estimating neonatal brain size in hominins», *Journal of Human Evolution*, 55, 2008, pp. 1.064-1.074.
- Hill, R. S. y C. A. Walsh, «Molecular insights into human brain evolution», *Nature*, 437, 2005, pp. 64-67.
- Potts, R., «Variability selection in hominid evolution», *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 7, 1998, pp. 81-96, 1998, (reimpresión online 2015).
- Somel, M. *et al.*, «Transcriptional neoteny in the human brain», *PNAS*, 106, 2009, pp. 5.743-5.748.

- The Smithsonian Institution's Human Origins Program, «Bigger Brains: Complex Brains for a Complex World», <http://humanorigins.si.edu/human-characteristics/brains>
- Vallender, E. J. *et al.*, «Genetic basis of human brain evolution», *Trends of Neurosciences*, 31, 2008, pp. 637-644.
- Vinicius, L., «Human encephalization and developmental timing», *Journal of Human Evolution*, 49, 2005, pp. 762-776.

## CAPÍTULO 13

- Aiello, L. C., «Brains and guts in human evolution: The Expensive Tissue Hypothesis», *Brazilian Journal of Genetic*, 1997.
- y J. C. K. Wells, «Energetics and the evolution of the genus Homo», *Annual Review of Anthropology*, 31, 2002, pp. 323-338.
- Crawford, M. A. y C. L. Broadhurst, «The role of docosahexaenoic and the marine food web as determinants of evolution and hominid brain development: the challenge for human sustainability», *Nutrition Health*, 21, 2012, pp. 17-39.
- Fehm, H. L. *et al.*, «The selfish brain: competition for energy resources», *Progress in brain research*, 153, 2006, pp. 129-140.
- Gowlett, J. A. J., «The discovery of fire by humans: a long and convoluted process», *Philosophical Transactions of Royal Society of London B, Biological Sciences*, 371, 2016, p. 1.696.
- Hubbard, T. D. *et al.*, «Divergent Ah Receptor Ligand Selectivity during Hominin Evolution», *Society for Molecular Biology and Evolution*, 33, 2016, pp. 2.648-2.658.
- Leonard, W. R. *et al.*, «Effects of Brain Evolution on Human Nutrition and Metabolism», *Annual Review of Nutrition*, 27, 2007, pp. 311-327.
- Liebenberg, L., «The relevance of persistence hunting to human evolution», *Journal Human Evolution*, 55, 2008, pp. 1.156- 1.159.
- Morgan, E., *The Aquatic Ape Hypothesis: The Most Critical Theory of Human Evolution*, Souvenir Press, Londres, 1999.
- Pobiner, B., «Meat-Eating Among the Earliest Humans», *American Scientist*, 2016.
- Roger, S. *et al.*, «Fossil skulls reveal that blood flow rate to the brain increased faster than brain volume during human evolution», *Royal Society Open Sciences*, 2016.
- Simopoulos, A. P., «Evolutionary Aspects of Diet: The Omega-6/Omega-3 Ratio and the Brain», *Molecular Neurobiology*, 44, 2011, pp. 203-215.
- Yin, S., «Smoke, Fire and Human Evolution», *The New York Times*, 05/08/2016.
- Zhou, M. S. *et al.*, «Link between insulin resistance and hypertension: What is the evidence from evolutionary biology?», *Diabetol Metab Syndr.*, 6, 2014, p. 12.

## CAPÍTULO 14

- Apostolou, M., «Sexual selection under parental choice: the role of parents in the evolution of human mating Menelaos Apostolou», *Evolution of Human Behavior*, 28, 2007, pp. 403-409.
- Buss, D. M., *The evolution of desire. Strategies of human mating*, Basic Books, Nueva York, 1994.
- Campillo, J. E., *La cadera de Eva*, Crítica, Barcelona, 2005.
- Charlesworth, B., «The Evolutionary Biology of Sex», *Current Biology*, 16, 2006, R693-R695.

- Dawkins, R., *El gen egoísta*, Bruño, Madrid, 1976.
- Fisher, H., *¿Por qué amamos?*, Taurus, Barcelona, 2004.
- Joseph, R., *Sexuality: Female evolution and erotica*, University of California Press, Berkeley, 2002.
- Kennedy, G. E., «From the ape's dilemma to the weanling's dilemma: early weaning and its evolutionary context», *Journal of Human Evolution*, 48, 2005, pp. 123-145.
- Morris, D., *Masculino y femenino. Claves de la sexualidad*, Plaza & Janés, Barcelona, 2000.
- Raynal, P. *et al.*, «Anthropologic evolution of women's pelvis», *Gynecology, Obstetrics and Fertility*, 33, 2005, pp. 464-468.
- Rosenberg, K. y W. Trevathan, «Birth, obstetrics and human evolution», *British Journal of obstetrics and Gynecology*, 2002.
- Symons, D., *The evolution of sexuality*, Oxford University Press, Oxford, 1981.
- Tosevski, J. *et al.*, «Concealed female external genitals: possible morpho-psychological clue to unique emotional and cognitive evolutionary matrix of man», *Medicine Science Monitor*, 2006.
- Zequi, S., «The neurobiology of love», *FEBS Letters*, 581, 2007, pp. 2.5752.579.

## CAPÍTULO 15

- Agustí, J. y M. Antón, *La gran migración. La evolución humana más allá de África*, Crítica, Barcelona, 2011.
- Arsuaga, J. L., *El collar del neandertal*, Temas de Hoy, Madrid, 1999.
- Baur, M. y G. Ziegler, *La aventura del hombre. Todo empezó en África*. Maeva, Madrid, 2003.
- Bednarik, R. G., «A figurine from the African Acheulian», *Current Anthropology*, 44, 2003, pp. 405-413.
- Ben-Dor, M. *et al.*, «Man the Fat Hunter: The Demise of Homo erectus and the Emergence of a New Hominin Lineage in the Middle Pleistocene (ca. 400 kyr) Levant», *Plos One*, 2011. [www.plosone.org](http://www.plosone.org).
- Fagan, B., *El largo verano*, Gedisa, Barcelona, 2007.
- , *Floods, famine and emperors: El Niño and the fate of civilizations*, Basic Books, Nueva York, 2009.
- Hamilton, M. J. *et al.*, «The complex structure of hunter-gatherer social networks», *Proceedings of the Royal Society of London Biological Sciences*, 274, 2007, pp. 2.195-2.202.
- Harari, Y. N., *Sapiens. De animales a dioses*, Debate, Barcelona, 2015.
- Hoffman, D. L., *et al.*, «U-Th dating of carbonate crusts reveals Neandertal origin of Iberian cave art», *Science*, 359, 2018, pp. 912-915.
- Johanson, D., «Origins of Modern Humans: Multiregional or Out of Africa?» *Action Bioscience*, 2001. <http://www.actionbioscience.org/evolution/johanson.html>
- Manzi, G., «Before the Emergence of Homo sapiens: Overview on the Early-to-Middle Pleistocene Fossil Record (with a Proposal about Homo heidelbergensis at the subspecific level)», *International Journal of Evolutionary Biology*, 2011.
- Martín-Loeches, M. *et al.*, «La evolución del cerebro en el género Homo: la neurobiología que nos hace diferentes», *Revista de Neurología*, 46, 2008, pp. 731-741.
- National Geographic, The Genographic Project: <https://genographic.nationalgeographic.com/>
- Oppenheimer, S., *Los senderos del Edén. Orígenes y evolución de la especie humana*, Crítica, Barcelona, 2004.
- Pearce, E. *et al.*, «New insights into differences in brain organization between Neanderthals and anatomically modern humans», *Proceedings of the Royal Society of London B*, 280, 2013, pp. 1-7.

- Prüfer, K., «The complete genome sequence of a Neanderthal from the Altai Mountains», *Nature*, 505, 2014, pp. 43-49.
- Rodríguez Vidal, J., «A rock engraving made by Neanderthals in Gibraltar», *PNAS*, 111, 2014, pp. 13.301-13.306.
- Stringer, C. y C. Gamble, *En busca de los neandertales*, Crítica, Barcelona, 1996.
- Zimmermann, K. A., «Pleistocene Epoch: Facts About the Last Ice Age», *Live Science*, 2013.

## CAPÍTULO 16

- Austad, S. N., «Menopause: an evolutionary perspective», *Experimental Gerontology*, 29, 1994, pp. 255-263.
- Buss, D. M., *The evolution of desire. Strategies of human mating*, Basic Books, Nueva York, 1994.
- Gatward, N., «Anorexia Nervosa: An Evolutionary Puzzle», *European Eating Disorders Review*, 15, 2007, pp. 1-12.
- Gribbin, J. y M. Gribbin, *La diferencia del uno por ciento. Sociobiología del ser humano*, Pirámide, Madrid, 1988.
- Guisinger, S., «Adapted to Flee Famine: Adding an Evolutionary Perspective on Anorexia Nervosa», *Psychological Review*, 110, 2003, pp. 745-761.
- Kardum, I., «Evolutionary Explanations of Eating Disorders», *Psychological Topics*, 17, 2008, pp. 247-263.
- Le Grange, D. *et al.*, «Bulimia nervosa in adolescents: a disorder in evolution?», *Archives of Paediatrics and Adolescent Medicine*, 158, 2004, pp. 478-482.
- Morris, D., *Masculino y femenino. Claves de la sexualidad*, Plaza & Janés, Barcelona, 2000.
- Putting, S. J., «The Men in Menopause. Can mating behavior explain the evolution of menopause in humans?», *The Scientist*, 01/09/2013. <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/37153/title/Putting-the-Men-in-Menopause/>
- Rask-Andersen, M. *et al.*, «Molecular mechanisms underlying anorexia nervosa: focus on human gene association studies and systems controlling food intake», *Brain Research Reviews*, 62, 2010, pp. 147-164.
- Rhawn, J., *Sexuality: Female evolution and erotica*, University of California Press, Berkeley, 2002.
- Shanley, D. P. y T. B. Kirkwood, «Evolution of the human menopause», *Bioessays*, 23, 2001, pp. 282-287.
- Surbey, M. K., «Anorexia Nervosa, Amenorrhea, and Adaptation. Part II. Ethological Perspectives on Specific Psychiatric Disorders», *Ethology and Sociobiology*, 8, 1987, 47S-61S.
- Symons, D., *The evolution of sexuality*, Oxford University Press, Oxford, 1981.

## CAPÍTULO 17

- Baur, M. y G. Ziegler G., *La aventura del hombre. Todo empezó en África*, Maeva, Madrid, 2003.
- Campillo, J. E. *et al.*, «Efecto antioxidante e hipolipemiante del pimentón ahumado en individuos sanos», *CyTA-Journal of Food*, 8, 2010, pp. 151-158.
- Campisano, C. J., «Milankovitch cycles, paleoclimatic change, and hominin evolution», *Nature Education Knowledge*, 4, 2012, p. 5.
- Cordón, F., *Cocinar hizo al hombre*, Tusquets, Barcelona, 1999.
- Fagan, B., *El largo verano*, Gedisa, Barcelona, 2007.

- Hamilton, M. J. *et al.*, «The complex structure of hunter-gatherer social networks», *Proceedings of the Royal Society of London Biological Sciences*, 2007.
- Johanson, D., «Origins of Modern Humans: Multiregional or Out of Africa?», *Action Bioscience*, 2001. <http://www.actionbioscience.org/evolution/johanson.html>
- Morris, D., *El mono desnudo*, Círculo de Lectores, Barcelona, 1969.
- National Geographic, The Genographic Project: <https://genographic.nationalgeographic.com/>
- Pedersen, M., W., «Postglacial viability and colonization in North America's ice-free corridor», *Nature*, 537, 2016, pp. 45-49.
- Sykes, B., *Las siete hijas de Eva. Nuestros orígenes genéticos*, Debate, Barcelona, 2001.
- Tormo, M. A. *et al.*, «The mechanism of the antioxidant effect of smoked paprika from La Vera, Spain», *CyTA-Journal of Food*, 11, 2012, pp. 114-118.

## CAPÍTULO 18

- Alford, A. F., *The Mystery of the Human Brain*, Eridu Books, Walshall, 2004. [http://www.eridu.co.uk/Author/human\\_origins/article2.html](http://www.eridu.co.uk/Author/human_origins/article2.html)
- Allman, J. M., *El cerebro en evolución*, Ariel, Barcelona, 2003.
- Arbib, M. A., «Co-evolution of human consciousness and language (revisited)», *Journal of Integrative Neurosciences*, 13, 2014, p. 187.
- Baluška, F. y S. Mancuso, «Deep evolutionary origins of neurobiology. Turning the essence of 'neural' upside-down», *Commun Integr Biol.*, 2, 2009, pp. 60-65.
- Bennett, M. *et al.*, *La naturaleza de la consciencia. Cerebro, mente y lenguaje*, Paidós Ibérica, Barcelona, 2008.
- Brüne, M. *et al.*, «Theory of mind--evolution, ontogeny, brain mechanisms and psychopathology», *Neuroscience Biobehaviour Review*, 30, 2005, pp. 437-455.
- Damasio, A., *Y el cerebro creó al hombre*, Destino, Barcelona, 2010.
- Eccles, J. C., *La evolución del cerebro: creación de la consciencia*, Labor, Barcelona, 1992.
- Edelman, G. M. *et al.*, «Biology of consciousness», *Frontiers in Psychology*, 2011. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00004>
- Graziano, M. S. A., *Consciousness and the social brain*, Oxford University Press, Oxford, 2015.
- Kotchoubey, B., «Objectivity of human consciousness is a product of tool usage», *Frontiers in Psychology*, 5, 2014, p. 1.152.
- LeDoux, J. E., «Evolution of emotions», *Progress in Brain Research*, 195, 2012, pp. 431-442.
- Macknik, S. L. y S. Martínez-Conde, *Los engaños de la mente*, Destino, Barcelona, 2012.
- Mancuso, S. y A. Vittola, *Sensibilidad e inteligencia en el mundo vegetal*, Galaxia Gutenberg, Barcelona, 2015.
- Mithen, S., *Arqueología de la mente*, Crítica, Barcelona, 1998.
- Punset, E., *Viaje al poder de la mente*, Destino, Barcelona, 2010.
- Ridley, M., *¿Qué nos hace humanos?*, Taurus, Barcelona, 2004.
- Sato, W. *et al.*, «The structural neural substrate of subjective happiness», *Science Reports*, 5, 2015, p. 16.891.
- Scaruffi, P., *El carácter de la conciencia*, autoedición, Estados Unidos, 2008. <http://www.scaruffi.com/nature/epreface.html>
- Thase, M. E., «Molecules that mediate mood», *New England Journal of Medicine*, 357, 2007, pp. 2.400-2.402.



## CAPÍTULO 19

- AA. VV., «Historia de las ideas», *Muy Especial*, 48, 2000.
- Camilli, A. *et al.*, «Bacterial Small-Molecule Signaling Pathways», *Science*, 311, 2006, pp. 1.113- 1.116.
- Chalmers, D. J., *The conscious mind: in search of a theory of conscious experience*, Oxford University Press, Oxford, 1997.
- Hoffman, D. D., «The interface theory of perception», UCI, [www.cogsci.uci.edu/](http://www.cogsci.uci.edu/)
- , «The evolutionary argument against reality», *Quanta Magazine*, 2016. <http://www.quantamagazine.org>
- Lanza, R. y B. Berman, *Biocentrism: How life and consciousness are the keys to understanding the true nature of the Universe*, BenBella Books, Dallas, 2010.
- Lledó Riquelme M. *et al.*, «La transducción visual», *Annals d'Oftalmologia*, 18, 2010, pp. 130-136.
- Mark, J. T. *et al.*, «Natural selection and veridical perceptions», *Journal of Theoretical Biology*, 266, 2010, pp. 504-515.
- Maturana, H., *Desde la biología a la psicología*, Lumen, Barcelona, 2004.
- Rubia Vila, F. J., «Constructivismo», Real Academia Nacional de Medicina, 03/05/16. Vídeo disponible en <http://www.ranm.tv/index.php/video/851/constructivismo-%C2%B7-sesi%C3%B3n-cient%C3%ADfica-%C2%B7-3-de-mayo-de-2016/#>
- Shermer, M., «Did Humans Evolve to See Things as They Really Are? Do we perceive reality as it is?», *Scientific American*, noviembre, 2015.

## CAPÍTULO 20

- Henrich, J., «A cultural species: How culture drove human evolution», American Psychological Association, 2011, <http://www.apa.org/science/about/psa/2011/11/human-evolution.aspx>
- Laland, K. N. *et al.*, «The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions», *Proceedings of the Royal Society of London*, 2016. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/282/1813/20151019>
- Lewens, T., «Cultural Evolution», *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2013.
- Mesoudi, A., *Cultural Evolution: How Darwinian Theory Can Explain Human Culture and Synthesize the Social Sciences*, University of Chicago Press, Chicago, 2011.
- Price, D., «Energy and human evolution. Population and Environment», *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*, 16, 1995, pp. 301-319.

## CAPÍTULO 21

- Angulo, J. y M. García, *Sexo en piedra. Sexualidad, reproducción y erotismo en la época paleolítica*, Luzán 5, Madrid, 2005.
- Aubert, M. *et al.*, «Pleistocene cave art from Sulawesi, Indonesia», *Nature*, 514, 2014, pp. 223-227.
- AA. VV., «Deesses, diosas, goddesses», Museo de Historia de la Ciudad, Ayuntamiento de Barcelona, 2000.
- Cieri, R. L. *et al.*, «Craniofacial Feminization, Social Tolerance, and the Origins of Behavioral Modernity», *Current Anthropology*, 55, 2014, pp. 419-443.

- Gabora, L., *Mind. Handbook of Theories and Methods in Archaeology*, AltaMira Press, Lanham, 2007.
- y A. Russon, «The evolution of human intelligence», en *The Cambridge Handbook of Intelligence*, Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
- García Guinea, M. A., *Altamira y otras cuevas de Cantabria*, Sílex, Madrid, 2001.
- Harari, Y. N., *Sapiens, de animales a dioses*, Debate, Barcelona 2016.
- Moalem, S. *et al.*, «The sweet thig about type 1 diabetes: A cryoprotective evolutionary adaptation», *Medical Hypotheses*, 65, 2005, pp. 8-16.
- Storey, K. B. y J. M. Storey, «Lifestyles of the cold and frozen», *The Science*, 39, 1999, pp. 32-37.

## CAPÍTULO 22

- Andrew, C., «Archaeology: The milk revolution», *Nature*, 500, 2013, pp. 20-22.
- Arranz-Otaegui, A. *et al.*, «Regional diversity on the timing for the initial appearance of cereal cultivation and domestication in southwest Asia», *PNAS*, 113, 2016, pp. 14.001-14.006.
- Carrigan, M. A. *et al.*, «Hominids adapted to metabolize ethanol long before human-directed fermentation», *PNAS*, 112, 2015, pp. 458-463, 2015.
- Fullola, J. M. y J. Nadal, *Introducción a la prehistoria. La evolución de la cultura humana*, UOC, Barcelona, 2005.
- Larson, G. y D. Q. Fuller, «The Evolution of Animal Domestication», *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 45, 2014, pp. 115-136.
- May, A., «Climate and human civilization over the last 18,000 years», *Watts up with that?*, 2010. <https://wattsupwiththat.com/2015/11/29/climate-and-human-civilization-over-the-last-18000-years-2/>
- Scham, S., «The World's First Temple», *Archaeology Archive*, 2008.
- Snir, A. *et al.*, «The Origin of Cultivation and Proto-Weeds, Long Before Neolithic Farming», *Plos One*, 2015.
- Tormo, M. A., «White bean amylase inhibitor administered orally reduces glycaemia in type 2 diabetic rats», *British Journal Nutrition*, 96, 2006, pp. 539-544.

## CAPÍTULO 23

- Ancient History Encyclopedia, «Eventos históricos». Timeline: <http://www.ancient.eu/timeline/>
- Bond, G. (1997). «A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates». *Science* (en inglés) 278 (5341): 12571266. doi:10.1126/science.278.5341.1257
- Cline, E. H., *1177 a. C. El año en que la civilización se derrumbó*, Crítica, Barcelona, 2015.
- Cordain, L., «Grains: Humanity's Double-Edged Sword. En: Simopoulos A.P. Evolutionary Aspects of Nutrition and Health. Diet, Exercise, Genetics and Chronic Disease», *World Review of Nutrition and Diet*, 84, 1999, pp. 19-73.
- Chaisson, E. J., «The Natural Science Underlying Big History», *Scientific World Journal*, 2014.
- Solar, D., *Cavernas, pirámides, imperios*, Espasa, Barcelona, 2011.
- Tsonis, A. A. *et al.*, «Climate change and the demise of Minoan civilization», *Climate of the Past*, 6, 2010, pp. 525-530.

## CAPÍTULO 24

- Aaron, W. *et al.*, «The Role of Epigenetics in Evolution: The Extended Synthesis», *Genetics Research International*, 2012.
- Cochran, G. y H. Harpending, *The 10.000 years explosion. How civilization accelerated human evolution*, Basic Books, Nueva York, 2009.
- Coen, E., *De las células a las civilizaciones. Los principios de cambio que conforman la vida*, Crítica, Barcelona, 2013.
- Dawkins, R., *El gen egoísta*, Salvat, Barcelona, 1993.
- , *El espejismo de Dios*, Espasa, Barcelona, 2007.
- Dunbar, R. I. M., *Religion, Intolerance, and Conflict*, Oxford University Press, Oxford, 2013.
- Harari, Y. N., *De animales a dioses*, Debate, Barcelona, 2015.
- Isidro A. y A. Malgosa, *Paleopatología. La enfermedad no escrita*, Masson, Madrid, 2003.
- Laland, K.N., T. Uller, M. W. Feldman, K. Sterelny, G. B. Müller, A. Moczek, E. Jablonka y J. Odling-Smee, «The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions», *Proceedings of the Royal Society of London B*, 282, 2015.
- Palermo, E., «The Origins of Religion: How Supernatural Beliefs Evolved», *Live Science*, 2015.
- Römer, T., *The Invention of God*, Harvard University Press, Cambridge, 2015.
- Rubia, F. J., *La conexión divina. La experiencia mística y la neurobiología*, Booket, Barcelona, 2014.
- Steve Clarke, S., R. Powell y J. Savulescu, «The Origin of Religion as a Small-Scale Phenomenon Religion, Intolerance, and Conflict: A Scientific and Conceptual Investigation», *Oxford Scholarship Online*, 2013.

## CAPÍTULO 25

- Cohen, J., «Little Ice Age, Big Consequences», *History in the Headlines*, 2012.  
<http://www.history.com/news/little-ice-age-big-consequences>.
- Fagan, B. M., *The Little Ice Age: how climate made history, 1300-1850*, Basic Books, Nueva York, 2000.
- Hub pages, «Effects of Climate on the Origins of the French Revolution», 2013.  
<http://hubpages.com/education/Effects-of-Climate-on-the-Origins-of-the-French-Revolution>
- Lamb, H. H., «The early medieval warm epoch and its sequel», *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Paleoecology*, 1, 1965, 13-37.
- Larsen, L. B., «New ice core evidence for a volcanic cause of the A.D. 536 dust veil», *Geophysical research letters*, 35, 2008.
- Little, L. K. (ed.), *Plague and the End of Antiquity. The Pandemic of 541-750*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- Mann, M. E., «Medieval Climatic Optimum», en *Encyclopedia of Global Environmental Change*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2002.
- , «Little Ice Age», en *Encyclopedia of Global Environmental Change*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2002.
- Méndez Jiménez, T., «La reproducción humana y la revolución científico-técnica», *Comunicación*, 19, 2010, pp. 43-51.
- National Academy of Sciences, *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2.000 Years*, National Academies Press, Washington D. C., 2006.

- Robinson, P. J., «Ice and snow in paintings of Little Ice Age winters», *Weather*, 60, 2005.
- Sayfo, O., «How Climatic Stress Possibly Shaped Early Islam and the History of the Middle East», *Core Spirit*, <http://www.corespirit.com/climatic-stress-possibly-shaped-early-islam-history-the-middle-east/>
- Walding, M., «Drought and the French Revolution: The effects of adverse weather conditions on peasant revolts in 1789», <https://personal.lse.ac.uk/fleischh/Drought%20and%20the%20French%20Revolution.pdf>

## CAPÍTULO 26

- AA. VV., «20 Big Questions about the Future of Humanity», *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/20-big-question-about-the-future-of-humanity/>
- Arjen, Y. *et al.*, «The water footprint of humanity», *PNAS*, 109, 2012, pp. 3.232-3.237.
- Azzellini, D., *El negocio de la guerra*, Txalaparta, Tafalla, 2005.
- Benagiano, G., S. Carrara y V. «Filippi, Sex and reproduction: an evolving relationship», *Human Reproduction Update*, 16, 2010, pp. 96-107.
- Cacioppo, J. T. *et al.*, «Alone in the crowd: The structure and spread of loneliness in a large social network», *Journal of Personality and Social Psychology*, 97, 2009, pp. 977-991.
- EPA (USA Environmental Protection Agency), «Future of Climate Change (2015)». <https://www.epa.gov/climate-indicators>
- M., *The Means of Reproduction: Sex, Power, and the Future of the World*, Paperback, The Penguin Press, 2010.
- Greely, H. T., *The End of Sex and the Future of Human Reproduction*, Harvard University Press, Cambridge, 2016.
- Harari, Y. N., *De animales a dioses*, Debate, Barcelona, 2014.
- Gelernter, J., «The Great Climate Lie», 2015. <http://www.nationalreview.com/article/427055/great-climate-lie-josh-gelernter>
- James, P. *et al.*, «Ending Malnutrition by 2020: an Agenda for Change in the Millennium. Final Report to the ACC/SCN by the Commission on the Nutrition», Challenges of the 21st Century, Organización de las Naciones Unidas, Nueva York, 2000.
- Kaku, M., *El futuro de nuestra mente*, Debate, Barcelona, 2014.
- Kastner, T. *et al.*, «Global changes in diets and the consequences for land requirements for food», *PNAS*, 109, 2012, pp. 6.868-6.872.
- Knufken, D., «The World's Most Lucrative Business Markets», *Business, Economy, Strategy, Business Pundit*, 2010. <http://www.businesspundit.com/the-worlds-most-lucrative-business-markets/>
- Pérez Iglesias, J. I., *La huella de agua de la Humanidad. Sociedad y desarrollo*, blog *La naturaleza humana*, 2012.
- Petit, J. R. *et al.*, «Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica», *Nature*, 399, 1999, pp. 429-436.
- Price, D., «Energy and human evolution. Population and environment», *Journal of Interdisciplinary Studies*, 16, 1995, pp. 301-319.
- Price, M., «Social networking is eroding our ability to live comfortably offline», *Monitor on Psychology*, 2011.
- Redacción, «Actividades que más dinero mueven a nivel global», *Eleconomista.es*, 2010.
- Spier, F., *El lugar del hombre en el cosmos. La gran historia y el futuro de la humanidad*, Crítica, Barcelona, 2011.

Tizzard, J., «The Future of Human Reproduction: Ethics, Choice and Regulation», *J Medical Ethics*, 26,2000, p. 294-295.

World Population Prospects, *The 2015 Revision Key Findings and Advance Tables*, Organización de las Naciones Unidas, Nueva York, 2015.  
[https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key\\_findings\\_wpp\\_2015.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf)

Zalasiewicz, J. *et al.*, «When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary is stratigraphically optimal», *Quaternary International*, 2015.

## Notas

\* En la nomenclatura moderna el término «homínidos» se utiliza para designar a todos los grandes simios modernos y extintos, que incluye chimpancés, gorilas, orangutanes y sus ancestros inmediatos. El término «homininos» se reserva para el grupo compuesto por los humanos modernos, especies humanas extintas y todos nuestros ancestros inmediatos. En este texto, para evitar confusiones, seguiremos utilizando solo el término tradicional de «homínidos» para referirnos a todas las especies.

*Homo climaticus. El clima nos hizo humanos*

José Enrique Campillo

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal)

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra.

Puede contactar con CEDRO a través de la web [www.conlicencia.com](http://www.conlicencia.com) o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47

© José Enrique Campillo, 2018

Autor representado por Silvia Bastos, S.L. Agencia literaria

© del diseño de la portada, Planeta Arte & Diseño

© de la imagen de la portada, lookatcia.com

© Editorial Planeta S. A., 2018

Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)

Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

[www.ed-critica.es](http://www.ed-critica.es)

[www.planetadelibros.com](http://www.planetadelibros.com)

Primera edición en libro electrónico (epub): abril de 2018

ISBN: 978-84-9892-994-2 (epub)

Conversión a libro electrónico: Newcomlab, S. L. L.

[www.newcomlab.com](http://www.newcomlab.com)