

EVOLUCIÓN

Miguel Ángel Betancourt Suárez




Editorial Atril

EVOLUCIÓN

Evolución

Miguel Ángel Betancourt Suárez



**Editorial
Alfíl**

Evolución

Todos los derechos reservados por:
© 2008 Editorial Alfil, S. A. de C. V.
Insurgentes Centro 51-A, Col. San Rafael
06470 México, D. F.
Tels. 55 66 96 76 / 57 05 48 45 / 55 46 93 57
e-mail: alfil@editalfil.com
www.editalfil.com

ISBN 978-968-9338-07-9

Dirección editorial:
José Paiz Tejada

Editor:
Dr. Jorge Aldrete Velasco

Revisión editorial:
Berenice Flores

Ilustración:
Alejandro Rentería

Diseño de portada:
Arturo Delgado-Carlos Castell

Impreso por:
Solar, Servicios Editoriales, S. A. de C. V.
Calle 2 No. 21, Col. San Pedro de los Pinos
03800 México, D. F.
Abril de 2008

Contenido

Introducción	VII
1. De la teoría de la evolución	1
2. De la esencia de la evolución	55
3. De la historia natural	117
4. Del origen del hombre a la distribución y destino de los humanos .	177
Referencias	229

Introducción

INTRODUCCIÓN

Más atrás, en el tiempo, comienza a dificultarse el discernimiento de las relaciones entre los principales tipos de animales pero, como veremos más adelante, existen signos claros en el material genético que indican que todos compartimos un ancestro común conocido como LUCA (por las iniciales en inglés de *Last Universal Common Ancestor*).

Hace menos de 450 años, cualquier europeo con escolaridad media y superior creía que la Tierra era el centro del Universo, cuya extensión se limitaba a tan sólo algunos pocos millones de kilómetros y que los planetas, el Sol y otras estrellas giraban en torno de ella. Hace menos de 250 años se pensaba que el Universo había sido en esencia igual a su imagen actual desde hace 6 000 años, aunque para entonces también sabían que la Tierra orbitaba al Sol, al igual que los otros planetas, y se aceptaba que el Universo era de mucho mayor tamaño de lo que se creía. Finalmente, hace menos de 150 años se aceptó la idea de que la Tierra era el producto actual de por lo menos decenas de millones de años de cambios geológicos constantes y muy dinámicos; éste fue el pensamiento predominante entre la comunidad científica, pero la gran mayoría seguía pensando que todas las especies vivientes habían sido creadas por un Dios.

Como el lector lo habrá notado, la aplicación del método científico mediante la observación y la experimentación, sin hacer referencia a la autoridad religiosa, política o gubernamental, ha transformado completamente la visión de nuestros orígenes y relación con el Universo en menos de 500 años. Además de esta nueva

y fascinante visión del mundo y del Universo, arrojada a la luz gracias a la ciencia, se ha generado un enorme impacto en la filosofía, dado que los hallazgos implican que los seres humanos somos el producto de fuerzas impersonales, de fenómenos naturales que se rigen a sí mismos y que nuestro mundo, el único lugar habitable del cosmos hasta donde se sabe, forma una parte diminuta de un Universo de tamaño y duración inmensos.

El estudio de la evolución no ha escapado de someterse al método científico, y lo que primero fue considerado como una hipótesis pasó a ser una teoría para finalmente ser aceptado como un fenómeno que se vive día a día y que experimentamos todos los seres vivos, unos con otros, con el medio ambiente. En el análisis de la evolución se han revelado nuestros nexos con otras especies que habitan en la Tierra, lo cual nos lleva a reflexionar que, si deseamos evitar una catástrofe ecológica, las relaciones y conexiones entre seres vivos de cualquier tipo deben ser respetadas.

El propósito de este libro es introducir al lector a uno de los más importantes hallazgos de la biología: el fenómeno evolutivo y su aplicación al entendimiento sobre el origen y destino del hombre.

Exploraremos cuáles son nuestros orígenes y nos daremos cuenta de cómo la evolución provee un principio unificador para toda la biología, ya que es aplicable tanto para los virus como para las bacterias, los hongos, las plantas y los animales. También ilumina la relación que guardamos los seres humanos con el Universo y, por si esto no fuera suficiente, muchos aspectos de la evolución cuentan con una gran importancia práctica, como los problemas de salud suscitados por la rápida evolución y la aparición de resistencias bacterianas a los antibióticos.

Por otro lado, vale la pena mencionar que pocas ideas han engendrado tanta resistencia emocional como la teoría de la evolución. La publicación de Charles Darwin, en 1859, conocida como *El origen de las especies*, ocasionó una reacción sin precedentes en los periódicos y otros medios de comunicación de la época, la mayoría en contra de sus ideas, lo cual le ganó muchos enemigos. Ahora, en pleno siglo XXI, nos damos cuenta de que la situación no ha cambiado significativamente.

¿Por qué es tan irritante la teoría de la evolución? En su libro *La teoría de la evolución*, Cynthia L. Mills propone un par de razones que explican dicha cuestión. Primero, dice Mills que la evolución es personal; la evolución indica algo de cada uno de nosotros, señala que somos simples criaturas de la naturaleza y que no fuimos creados de manera única y magistral por un ser supremo y todopoderoso como creíamos que era (o como quisiéramos que hubiera sido); en efecto, parecemos monos, pero si queremos sentirnos más especiales, podemos decir que los monos se parecen a nosotros. Para fines prácticos, y desde el punto de vista de la evolución, ambos enfoques son lo mismo. Lo anterior puede parecer chocante, sobre todo si tendemos a menospreciar a nuestros peludos parientes más cercanos.

Mills indica en segundo lugar que la teoría de la evolución, en particular la teoría de Darwin acerca de la selección natural, está al alcance de todos, es accesible y no es difícil de entender como bien pueden serlo la teoría de la relatividad de Albert Einstein o la teoría de la gravitación de Isaac Newton. La teoría de la evolución cuenta con la claridad y elegancia inconfundibles de una gran teoría. Una vez que se lee, podemos preguntarnos lo mismo que Thomas Huxley (principal defensor de la teoría darwiniana): ¿Por qué no pensé lo mismo antes? O ¿Por qué no se me ocurrió a mí la misma idea? La idea de la evolución propuesta por Darwin es tan clara que todos podemos entenderla y al mismo tiempo captar la evidencia que le da soporte. ¿Cuántas otras teorías científicas son como ésta? La mayoría de nosotros no podemos argumentar con física newtoniana, o con la relatividad de Einstein, porque no somos capaces de reproducir fácilmente las matemáticas utilizadas para tal fin. Sin embargo, la teoría de la evolución carece de tanta matemática que algunos científicos desearían descalificarla como teoría. Carece de leyes y postulados, y es sólo la descripción de un fenómeno natural; menciona que la selección natural es la responsable de los cambios que se observan en la historia viva de nuestro planeta, pues la selección natural provee de una maquinaria al cambio; una fuerza análoga a la gravitación propuesta por Newton. Recordemos que la fuerza de gravitación es la arquitecta o la directora “tras bambalinas” de todo el cosmos.

Después de leer a Charles Lyell, quien descubrió y describió que la forma de la superficie de la Tierra cambia lentamente con el tiempo, Darwin y su contemporáneo Wallace llegaron a una simple e inevitable conclusión: si el medio ambiente geológico cambia, entonces también deben cambiar las formas de los seres vivos que habitan en él. La selección natural indica que los organismos cambian, generaciones tras generaciones, en una cadena ininterrumpida de formas vivientes, como dictado por el medio ambiente en el que viven o se desarrollan. Por tanto, *evolución* significa: “los cambios que se observan en la vida a través del tiempo”.

Según Darwin, los cambios se dan a partir de la supervivencia y reproducción del más apto (o el mejor adaptado a su medio ambiente) y a la falla o fracaso reproductivo del menos apto. Si los organismos son aptos, quizá no muestren cambio. Si no son aptos, entonces deben cambiar y, si el cambio no se da, entonces se extinguirán, desaparecerán para siempre como especies. La mayoría de los cambios son lentos y casi imperceptibles, pues ocurren en el transcurso de largos periodos de tiempo, miles o millones de años, en los cuales los organismos toman nuevas formas que finalmente dan origen a especies diferentes. Y así pensaron Darwin y Wallace. Mencionemos tres puntos importantes para esta teoría: primero, no existe un diseño, idea o plan último por alcanzar; el cambio se da exclusivamente a través de la supervivencia o reproducción del más apto. El cambio no sigue, ni debe seguir un plan premeditado o predeterminado para alcanzar una

meta. Los organismos no necesariamente deben ser cada vez más complejos o más inteligentes, a menos que dichas características (entre muchas otras) contribuyan a su supervivencia y su reproducción. Segundo, ni Darwin ni Wallace mencionaron cómo es que ocurrían o se daban los cambios en los organismos, debido a que la genética, como ciencia, no había nacido. Simplemente no existía. Tercero, Darwin reconocía y sabía que tendrían que establecerse ciertos requerimientos para que su teoría pudiera trabajar y ponerse en práctica. Para entonces, su teoría fue vulnerable a una gran cantidad de ataques. Aun aquellos que estaban de acuerdo con Darwin se sentían desconfiados cuando tenían que entrar en detalles explicativos. Quizá sabían que Darwin estaba en lo correcto en lo relacionado con el cambio que se daba en las especies, pero tal vez no estaban de acuerdo con la selección natural y con su idea de cómo podría darse el cambio. Es probable que otros científicos hayan estado de acuerdo con la selección natural, pero negaban que el cambio fuera gradual. En fin, en aquella época, la falta de pruebas científicas para dar soporte y rigidez a la teoría de la evolución fue un campo fértil para los ataques religiosos que trataron de ridiculizarla durante más de un siglo.

El peor daño a la reputación de Darwin lo produjeron quienes adoptaron los conceptos de la evolución y de la selección natural con fines propios y propagandísticos. La teoría de Darwin fue rápidamente adoptada, mal interpretada y escrita una y otra vez para promover ideologías dañinas, física y psíquicamente. Hay que aclarar que en ningún momento Darwin le otorgó cualquier valor a lo que mucho tiempo después se conoció como “darwinismo social” y que no debemos otorgar crédito a quienes quisieron justificar sus acciones llevadas a cabo durante el holocausto nazi argumentando que la teoría evolucionista tenía una función importante en sus procedimientos para purificar la raza aria.

Charles Darwin fue un producto de su tiempo, pero reprimido por una cultura victoriana limitante. Adelantado a su época, Darwin mostró que no hay grandes distancias entre nosotros y el resto de los animales, que toda la biología está conformada por los mismos ingredientes y que somos un producto de la naturaleza; además, logró dirigir nuevamente nuestra mirada en dirección a ella.

Para entender el origen del hombre es indispensable conocer la teoría de la evolución y su mecanismo operativo. El primer capítulo trata precisamente de la teoría de la evolución. ¿Qué es? ¿De dónde viene? ¿Por qué pensamos que Darwin tuvo razón? Y su finalidad es hacer un breve recuento histórico y sentar las bases de la filosofía de la evolución, explicar la teoría en sí, las reacciones científicas y sociales con su aparición, así como su impacto. En el segundo capítulo se detallan los mecanismos biológicos y genéticos utilizados por la célula y por los organismos para asegurar su supervivencia como especie y al mismo tiempo para facilitar la variabilidad en su descendencia. Se analizan también las relaciones que los organismos guardan con el medio ambiente. Aunque el segundo capítulo puede resultar un tanto árido, es necesario para conocer detalles y satisfacer la

curiosidad natural que sentimos por entender cómo es posible que una especie pueda dar origen a otra diferente. Menciono que es árido porque aquí tienen que ver los sistemas biológicos involucrados en los mecanismos mediante los cuales los genes son capaces de llevar a cabo dos de las funciones que desde el punto de vista de la evolución indispensable conocer: la capacidad de mantener la información vital para lograr que una especie permanezca con vida generación tras generación, y la capacidad que tienen los genes para permitir cierto grado de variabilidad en la descendencia. Ambas son parte de la materia prima sobre la cual actúa la selección natural. Sin embargo, si el lector prefiere no entrar en detalle, puede dar por hecho que los genes tienen las propiedades de mantener información útil o vital para transmitirla a sus descendientes y al mismo tiempo no ser tan rígidos y permitir algo de variabilidad en las generaciones subsecuentes.

El tercer capítulo relata una historia de nuestros ancestros, desde el origen de la vida hasta el origen del hombre. Hace hincapié en las novedades evolutivas que desde entonces y hasta ahora han venido moldeándose para dar origen a nuestra especie. También hace un recuento de los hallazgos anatómicos y fisiológicos adquiridos con anterioridad para especificar los que nos definen como seres humanos, así como de los pequeños grandes detalles que nos han llevado a colocarnos en la punta de la pirámide del reino animal. Por último, en el cuarto capítulo se analiza el surgimiento de las principales características del *Homo sapiens*, el cómo, el cuándo y el porqué aparecieron la bipedestación, la habilidad manual, el crecimiento del cerebro y el desarrollo del lenguaje; así como por qué, si en esencia todos los seres humanos somos iguales, algunas culturas se desarrollaron con gran éxito científico, tecnológico y bélico mientras que otras permanecieron rezagadas o se colapsaron y desaparecieron para siempre.

Antes de empezar con esta historia vale la pena aclarar cómo ha funcionado el mecanismo del conocimiento científico. A las personas que hacen ciencia se les llama científicos, y cualquier científico honesto sabe que su trabajo consiste en tratar de conocer, lo más aproximadamente posible, la verdad. Sin embargo, el conocimiento generado por un científico, o grupo de científicos, es susceptible de modificación futura. Esto significa que el conocimiento científico es un principio válido hasta que pueda resistir los intentos que demuestren que es un principio equivocado. Así es como evoluciona la ciencia. Generalmente pensamos en la ciencia como el conocimiento concebido por una constante acumulación de verdades, como si los descubrimientos se conformaran por una profundización cada vez mayor en la verdad; pero la ciencia no funciona así. Lo que realmente resulta interesante es que la ciencia es un sistema de conocimiento provisional.

Thomas Samuel Kuhn es un historiador y filósofo de la ciencia estadounidense que publicó en 1962 *La estructura de las revoluciones científicas*, libro en donde explica que las ciencias también han llegado a muchas conclusiones disparatadas y que la refutación de estos disparates ha contribuido, sin lugar a dudas, al pro-

greso. La ciencia no sólo puede concebirse como una acumulación de verdades, sino también como una acumulación de disparates. Según Kuhn, las ciencias no progresan siguiendo un proceso uniforme por la aplicación de un método científico hipotético, sino que se verifican dos fases diferentes de desarrollo científico: una en la que se percibe un amplio consenso en la comunidad científica sobre cómo explotar los avances conseguidos en el pasado ante los problemas existentes, para crear soluciones universales, a las que Kuhn denomina “paradigmas”. En griego, paradigma quiere decir modelo o ejemplo. En su actividad investigadora, la mayoría de los científicos confirman el paradigma dominante como el modelo a seguir o el conocimiento más o mejor aceptado, pero no significa que sea necesariamente *el* conocimiento, único y verdadero. La segunda fase se caracteriza por el hecho de que, junto a los científicos que forman la mayoría, se van haciendo lugar minorías de científicos inconformes, que se sienten fascinados por problemas que no encuentran solución en el seno del paradigma dominante. Esta oposición va acumulando hechos y reuniendo adeptos hasta que arremete contra el paradigma dominante, impone su teoría como el nuevo dogma científico y difunde el nuevo lenguaje de la ciencia. Si se demuestra que la nueva teoría es superior a la existente, entonces se acepta y se produce una “revolución científica”. Para los miembros del antiguo conocimiento científico (primera fase) este proceso es sumamente doloroso, ya que echa por la borda toda una vida dedicada a la ciencia. Por eso defienden hasta la muerte el viejo paradigma. Ciertamente, esta obstinación demuestra el carácter doctrinario de los científicos instalados en el paradigma dominante, pero por otro lado favorece el progreso de la ciencia, pues obliga a la oposición a hacer una investigación sólida. Naturalmente, el nuevo paradigma permanece en el poder hasta que vuelven a adquirirse nuevos conocimientos que no encajan en él, y después empieza de nuevo todo el proceso. La ciencia es, pues, controvertida y a veces polémica.

En algunos casos, las revoluciones que permitieron la implantación de un nuevo paradigma fueron tan espectaculares, y los nuevos paradigmas tan importantes, que trajeron consigo un profundo replanteamiento en áreas decisivas del conocimiento humano y se convirtieron en las bases de nuestro saber. Un ejemplo muy conocido es el tema principal de este libro, consistente en el fenómeno de la evolución propuesto por Charles Darwin. En su libro *El origen de las especies* Darwin revolucionó la concepción del mundo de su época. Sus tesis eran novedosas y muchos se sintieron insultados. Primero, la historia de la creación que presenta la Biblia no es la Palabra de Dios dictada de viva voz, sino una colección de leyendas bien escogidas entre muchas otras y de procedencia dudosa. Segundo, ni el hombre ni las demás criaturas hemos sido creados por Dios, el hombre procede de una familia de homínidos cuyos antepasados, a su vez, comparten un ancestro común con el gorila y el chimpancé. Tercero, el planeta no tiene, como se había creído siempre, 60 000 años de edad, sino que se originó hace 4 500 mi-

llones de años. La idea del fenómeno de la evolución propuesta por Darwin cambió por completo la percepción que tiene la humanidad del lugar que ocupa en la naturaleza. Hoy ningún biólogo pone en cuestión la teoría de Darwin porque el paradigma de la evolución revolucionó la ciencia de la biología.

Dispongamos, pues, del tiempo para aventurarnos en esta historia que tiene como fin último el reencuentro de nosotros mismos con la Naturaleza.

*Para Paulette, Michelle y Margaux,
con todo mi amor.*

De la teoría de la evolución

*Los grandes descubrimientos científicos son como los amaneceres,
al principio iluminan sólo las agujas y los exteriores
de los campanarios de lo desconocido y luego todo su interior.*
Edward O. Wilson

Durante algún tiempo los seres humanos percibimos un mundo cuya naturaleza permanecía estática. Lo que nuestros sentidos eran capaces de captar era todo con lo que contábamos. Un pato no era más que eso: un pato; eso era lo que tenía que ser. Esa era en esencia su naturaleza, siempre había sido un pato y lo seguiría siendo por toda la eternidad.

Después de haber encontrado la manera de satisfacer sus necesidades básicas, los humanos comenzaron a filosofar y llegaron a la conclusión de que los patos, al igual que el resto de la naturaleza, eran el producto final de alguien cuya inteligencia era muy superior. Aristóteles (384–322 a.C.) concluyó que la esencia de un pato venía del pato mismo, como si el pato contara con las instrucciones para su propia creación. No cabe duda de que esta filosofía estaba, por mucho, más cerca de la realidad que la “inteligencia superior”.

Para la gran mayoría de las personas, el mundo seguía siendo el mismo, día tras día. Percibiéndose tal y como lo indicaba el sentido común, la Tierra era plana, los planetas, el Sol y el resto de las estrellas giraban alrededor de nuestro planeta que, dicho sea de paso, se consideraba el centro del Universo. Los seres viejos morían pero otros nuevos nacían. Todo era cíclico, repetitivo.



Figura 1-1. Caricatura de Charles Darwin, dada a conocer después de la publicación de su libro *El origen de las especies*.

Después vino una época conocida como el oscurantismo y por desgracia el estudio de la naturaleza reposó en la religión durante aproximadamente 1 500 años. Los escritos de la filosofía griega se guardaron. No se necesitaba más. La Biblia contaba una historia de la creación accesible a cualquier individuo. Clara, concisa, fácil de recordar; en casi una semana se creó el Universo, la Tierra y todo lo que la conforma y ocupa, incluidos los seres humanos. Todo se creó en casi una semana porque el último día hubo que descansar. Merecido recreo para semejante jornada laboral. Los estudiantes de esta época debatían a detalle lo que las Sagradas Escrituras decían. La historia contada en la Biblia marcaba claramente un principio y no sólo eso, sino hasta un profético final. No había mucho que discutir, el mundo cristiano tenía un pasado, un presente y hasta un futuro.

La fuente de los conceptos y del conocimiento bíblico tiene un origen dudoso. Sin embargo, a lo largo de muchos años, lo anterior no le molestó a nadie. Después de todo, el mundo seguía siendo el mismo, nadie cambiaba sus opiniones acerca de la naturaleza, probablemente porque eran muy pocos los que se detenían a reflexionar sobre ella. La mayoría estaban muy ocupados en su lucha por sobrevivir, por conseguir el alimento para mantener a la familia. No se leía mucho y se escribía poco, pero sí se libraban batallas sangrientas, asesinando a sangre fría con tal de ganar desde un pequeño territorio hasta todo un continente en nombre y por la gracia de Dios.

La naturaleza, si en algún momento llegaba a considerarse, se apreciaba exclusivamente como un ejemplo del genio creativo del Ser Supremo. No obstante, a la gente se le ocurrió mirar a su alrededor y algunos osados exploradores decidie-

ron viajar en son de paz. A su regreso, relataban por escrito sus experiencias y cada vez más lectores disfrutaban de sus aventuras, luego intercambiaban opiniones y así se entusiasmaron por conocer más sobre el mundo en el que habitaban.

Existieron famosos viajeros, como Marco Polo (1254–1324), que viajó hacia el Oriente; Cristóbal Colón (1451–1506), que se dirigió al Occidente, y Fernando de Magallanes, navegante portugués que nació en 1480, que, desde España, intentó darle la vuelta al mundo pero murió el 27 de abril de 1521 en la isla de Mac-tan, en el archipiélago de las Filipinas. Sin embargo, una pequeña parte de su tripulación, dirigida por el capitán Elcano, logró circunnavegar el globo terráqueo y vivieron para contar la aventura. La mayoría de nosotros estamos familiarizados con los resultados de los viajes de Marco Polo y Cristóbal Colón, pero la expedición de Magallanes contribuyó con dos grandes progresos a la ciencia: en primer lugar demostró que nuestro planeta es redondo y no plano como se creía, y, en segundo lugar, hizo la primera demostración de la teoría de la relatividad. Cuando los acompañantes de Marco Polo regresaron a las islas de Cabo Verde, unos días antes de completar su travesía y llegar a España, se dieron cuenta de que, según su bitácora de navegación, el día de su arribo era un día previo al marcado en el calendario local. Claro que en ese entonces no se explicaban la razón de lo sucedido, pero tuvieron el valor de hacerlo saber.

El resultado de todos estos viajes fue que llevaron a Europa una gran cantidad de historias y muestras claras y vivas de otros tipos de plantas, animales e incluso personas. Mostraron seres inimaginables: iguanas, tucanes, guajolotes, maíz, calabacitas e indígenas. Muchas personas en Europa se dedicaron a coleccionar y a estudiar las novedades llevadas de todas partes. La mayoría querían tener en su hogar “algo” de aquellas misteriosas y lejanas tierras de las cuales siempre se leían aventuras interesantes y emocionantes.

Los descubrimientos demostraron dos cosas: primero, era claro que existía en la Tierra más vida y de mucha más variedad de lo que se pensaba; y segundo, se dieron cuenta de que cada una de las especies estaba perfectamente adaptada al medio ambiente donde fueron recolectadas, ya que muchas de ellas no lograban sobrevivir a las condiciones ambientales de Europa.

Los viajes de los exploradores trajeron consigo un número tan grande y diverso de animales que se empezó a dudar de la capacidad del arca de Noé. Resultó ser incómodamente claro que no pudo haber existido espacio suficiente en esa nave para albergar a una pareja de cada uno de los animales del mundo y salvarlas del diluvio universal. Aunque los estudiosos de la materia religiosa ayudaron a quitarle peso al arca, alegando que los organismos marinos y las aves no habían sido requeridos a bordo, ya que podían sobrevivir por sí mismos en el agua y en el aire, eso no fue suficiente para darle cabida a millones de especies de plantas y animales. Además, la capacidad del arca de Noé no era el único problema a resolver, existía otro: ¿Cómo podrían los seres perfectamente adaptados a un medio

ambiente determinado, como un oso polar o una rana de la selva tropical, sobrevivir a una larga migración de regreso a su lugar de origen partiendo de las regiones desérticas del monte Ararat?

Hay que recordar también el descubrimiento de un Nuevo Mundo, pero no el de Cristóbal Colón, sino el de Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723), quien con su invención del microscopio logró observar pequeños “animálculos”, como él los denominó, extendiendo la biología a una realidad hasta entonces insospechada. Las Sagradas Escrituras nunca mencionaron la creación del mundo microscópico que tanta gracia y desgracia nos ha proporcionado. La existencia de los seres microscópicos fue clave para desacreditar la teoría de la generación espontánea, que sostenía que la vida podía generarse de la materia inerte y de que las moscas nacían directamente de la carne en descomposición.

Por si todo esto fuera poco para exaltar el interés, la fascinación y la pasión por el mundo natural de la época, también se descubrieron fósiles por todo el mundo. Ya los griegos habían sugerido que los fósiles eran de seres que deseaban vivir pero que por encontrarse en un medio ambiente inapropiado no lo habían logrado, petrificándose para siempre. Después empezó a ser cada vez más claro y aceptable que la superficie visible de la Tierra tenía un pasado que podía descifrarse y que los fósiles eran parte de esa historia. Lo anterior porque las fisuras, cañones y demás accidentes geográficos dejaban ver cómo se acomodaron las rocas en diferentes capas.

Después de toda esta revolución biológica, donde Dios dejó de ser el hacedor artesanal de cada ser viviente y pasó a ser la “inteligencia suprema” que diseñó las fuerzas que hacen que se desarrolle el Universo, llegó finalmente el siglo XVIII y la nueva biología racional tuvo su cuna en París.

HISTORIA DE LA TEORÍA DE LA EVOLUCIÓN

Los ejemplares y especímenes recolectados alrededor del mundo por varios de los exploradores empezaron a concentrarse en las colecciones de plantas y animales exóticos de las principales ciudades europeas. El *Jardín du Roi*, después conocido como *Museum du Histoire Naturelle* (Museo de Historia Natural de París), fue uno de esos lugares, en el que además se realizaban investigaciones y se debatían grandes ideas. Georges Louis Leclerc, conde de Buffon (1707–1788), es un claro y digno representante de esa época (figura 1–2), que al concluir la educación básica estudió un año en Inglaterra, donde desarrolló una gran pasión por la física y las matemáticas, y también estudió la fisiología de las plantas. Su principal inspiración fueron los trabajos de Isaac Newton. Aunque su formación profesional no fue principalmente en el área de la biología, Buffon ocupó el cargo



Figura 1–2. Georges Luis Leclerc, conde de Buffon (1707–1788), autor de *Histoire naturelle*.

de director del *Jardin du Roi* y decidió que su función fuera la de “newtonizar” la biología y escribir una enciclopedia de historia natural. Así, logró escribir 35 extensos volúmenes, conocidos como *Histoire naturelle*, entre 1749 y 1788. Lo interesante de estos volúmenes es que reflejan, no sólo las ideas de Buffon, que cambiaron durante el desarrollo de su obra, sino las presiones políticas, religiosas y científicas de su tiempo. En su obra, al principio hizo notar un fervor newtoniano, pues negó autoritariamente la existencia de las especies y se expresó de los organismos como seres individuales; se le notó influido en gran medida por sus antecedentes escolares religiosos. De igual forma, al principio de su obra trató de esquematizar la biología de una manera análoga a como Newton veía al mundo de la física. Después aceptó la existencia de las especies y trató, sin éxito, de clasificarlas mediante la selección de unas cuantas características escogidas de manera arbitraria. Buffon también criticó a su contemporáneo sueco, el botánico Carl von Linné (1707–1778), quien afirmaba que cada uno de los elementos de la naturaleza, incluidas las especies, contaba con alguna cualidad constante, que no cambiaba. Linné construyó su taxonomía basándose en la presencia o ausencia de ciertas características predeterminadas (figura 1–3). Pero a pesar de todo, Buffon llamó a Linné *nomenclateurs*, insinuando que lo único que hacía era ponerles nombres a los especímenes.

La idea de que posiblemente las especies cambiaran y dieran origen a otras era algo insólita y casi insospechada para la época. Sin embargo, el descubrimiento de los fósiles y la posibilidad de que éstos representaran organismos que ya no existían empezaron a modificar la idea preconcebida sobre la naturaleza permanente e indefinida de las especies.



Figura 1–3. Carl von Linneo (1707–1778), denominado por el conde de Buffon como el *nomenclateurs*.

En un momento dado, Linneo consideró que las especies eran permanentes y que estaban exentas de poder cambiar, pero después se retractó. Él consideró que una fuente importante para inducir la aparición de una nueva especie era la hibridación, o sea, el cruzamiento de dos especies diferentes, como por ejemplo un caballo con un asno, lo cual era un principio equivocado. Sin embargo, Linneo contribuyó a la teoría de la evolución de manera intencional gracias a su sistema de clasificación. Antes mencioné “un principio equivocado”, porque no es fácil que se crucen individuos de dos especies diferentes y porque la palabra *especie* se define como un grupo de seres vivos que comparten la mayoría de sus características físicas y de apareamiento. Linneo fue el primero en agrupar a los organismos más o menos de manera paralela, en lugar de hacerlo de manera lineal en la escala de jerarquías como lo había organizado Aristóteles. El reino animal de Linneo adoptó entonces una forma de ramificaciones de árbol.

Buffon, a pesar de lo disparatado de sus primeros volúmenes, simplemente no pudo negar la conveniencia del sistema de nomenclatura propuesto por Linneo. Más tarde, Buffon inició un nuevo estilo de anatomía, la anatomía comparativa, la cual podía detectar unidad en el tipo entre miembros de una misma especie; cualquier diferencia anatómica indicaba entonces una divergencia del tipo. También concibió la idea de lo que él llamó *moule interieur*, o molde interno, que era lo que se encargaba de informar al embrión sobre su desarrollo. Otra vez, como Aristóteles, se anticipó a la descripción de un código genético.

Con especímenes de todas partes del globo terráqueo, Buffon empezó a notar similitudes en especies diferentes que provenían de climas parecidos; por ejem-

plo, la iguana y el cocodrilo son especies diferentes, pero ambos cuentan con una piel gruesa y escamosa, y los dos viven en clima cálido y tropical. Basándose en estas observaciones propuso que el medio ambiente podía influir o surtir efecto en las especies: en un medio ambiente similar los animales podían experimentar cambios parecidos. Con todos estos estudios anatómicos, Buffon se dio cuenta de que muchos animales estaban conformados con base en un plano corporal común o muy parecido, pero con ciertas modificaciones; incluso pensó que las especies tenían que surgir de otras especies. Pero Buffon se retractó inmediatamente y, al parecer, el arrepentimiento tuvo una causa externa. Buffon fue víctima de la poderosa influencia de la Sorbona de París, una de las academias con mayor liderazgo de la época y con una inclinación fuertemente religiosa. Hay que recordar que el nombre de la Sorbona deriva de una escuela de teología fundada hacia el año de 1257 por Robert de Sorbon. Así que Buffon se vio forzado a convertir su teoría de la evolución en degeneración o involución, afirmando que: “desde que Dios creó al mundo perfecto, cualquier cambio que se presente es porque ha caído de la gracia divina”. Estuvo muy cerca de concebir la idea más importante en la historia de la biología. Aseguró que el asno y el simio alguna vez habían sido perfectos, que en un inicio eran caballo y hombre, pero cambiaron y no precisamente para mejorar, sino para dar lugar a una forma degenerada o degradada. Al final, se retractó de su idea de que las especies podían cambiar y dar origen a otras nuevas y argumentó que nunca nadie había sido testigo de un cambio, que ningún hombre había logrado observar cómo una especie podía cambiar y dar origen a otra. Pero es que no tenía noción de que el tiempo requerido para tal fin era muy largo. Asimismo afirmó que no existían registros fósiles, o eslabones perdidos, que hicieran evidente un cambio gradual entre una especie y otra, pero es que no se habían descubierto aún. Hoy, por ejemplo, se cuenta con registros fósiles de unos seres conocidos como *Pakicetus* y *Ambulocetus*, que se han definido como intermediarios entre un mamífero terrestre y la ballena. Finalmente, Buffon argumentó que un ser resultado de un cambio en su naturaleza no podría ser exitoso y mencionó que cuando surgían los híbridos eran estériles, como la mula, aunque hoy se sabe que no todos están impedidos para procrear.

Irónicamente, al argumentar en contra de la evolución, Buffon logró establecer una serie de preguntas inteligentes. Al final, muchas de esas cuestiones fueron contestadas mediante la teoría de la evolución.

Jean Baptiste de Lamarck (1744–1829) fue un protegido de Buffon y la primera persona en aceptar y divulgar que las especies cambiaban con el tiempo. Nació en una familia noble, pero pobre, y después de servir varios años en el ejército desarrolló un intenso interés por la botánica (figura 1–4). Posteriormente escribió una obra de cuatro volúmenes sobre la flora de Francia que llamó la atención de Buffon, quien después de esto lo contrató como acompañante de viajes y tutor de su hijo, además de conseguirle un trabajo de asistente, poco remunerado, en el



Figura 1–4. Jean Baptiste de Lamarck (1744–1829), primera persona en aceptar y divulgar abiertamente que las especies cambian con el tiempo.

departamento de botánica del Museo de Historia Natural, donde laboró durante cinco años a partir de 1788. Después de la muerte de Buffon y ya sin su patrocinio, Lamarck perdió su trabajo en el museo. En 1793 (el mismo año en el que María Antonieta fue llevada a la guillotina después de que Luis XVI pasó por la misma desgracia unos meses antes), y posterior a la reorganización del museo, Lamarck obtuvo un nuevo empleo como profesor en la cátedra de animales inferiores, gusanos e insectos, y creó un nuevo campo de estudio en la biología al denominar a los invertebrados y reorganizarlos de una manera tan brillante, la cual se sigue utilizando en la actualidad. Subrayó la importancia del estudio de los invertebrados, dada su enorme diversidad y sus sistemas de organización. El estudio de estos animales nos ha permitido conocer a fondo lo bien organizados que están en su esquema social y nos ha ayudado a entender un fenómeno que con frecuencia se observa en la evolución de las especies, que se denomina “coevolución de las especies”.

A continuación nos permitimos citar un ejemplo con la única intención de recalcar la importancia que Lamarck le otorgó a los invertebrados, para después regresar a lo que fue su principal aportación a la teoría de la evolución. La mayoría de nosotros hemos observado largas filas de hormigas rojas cargando pedazos de hojas sobre su cuerpo y nos hemos impresionado al ver cómo una hormiga tan pequeña puede cargar una hoja tan grande. Éstas son las hormigas cortadoras, las más grandes de su colonia, que cortan un pedazo de hoja y lo transportan hasta el hoyo del hormiguero, donde se la dejan a otra hormiga un poco más pequeña, para que corte la hoja en pedazos más pequeños; luego, otras hormigas acarrean

las diminutas porciones al interior del hormiguero donde se las dejan a otras hormigas todavía más pequeñas, para que reduzcan aún más los pedazos de hoja. Las hormigas utilizan este polvo de hoja para alimentar y cultivar un hongo con el cual ellas se nutren. A veces, el hongo que les sirve de alimento se ve afectado por un hongo parásito que daña la siembra de las hormigas. Para resolver esta disyuntiva, las hormigas han utilizado la coevolución como estrategia de subsistencia, y han permitido que sobre sus cuerpos viva una bacteria del género *Streptomyces*, la cual produce un compuesto químico que aniquila al hongo parasitario y favorece el crecimiento del que cultivan. De esta manera, las hormigas utilizan las leyes naturales en su beneficio. Una lección suprema de la naturaleza...

Después de impartir durante varios años la cátedra de los invertebrados, Lamarck empezó a revelar un nuevo abordaje al mundo natural, una visión en la cual las especies podían cambiar y de hecho cambiaban. Estaba impresionado por la tendencia observada en los organismos de progresar a partir de formas simples a otras cada vez más complejas. Reemplazó la forma tradicional de ver los acontecimientos biológicos, de una cadena lineal en la cual se van uniendo eslabones de manera progresiva hasta llegar a la perfección (el hombre) a una progresión de los eventos más generales y dirigida no a la perfección (que dicho sea de paso es una utopía, ya que ni el hombre es perfecto), sino a la complejidad. Al morir, Jean Guillaume Bruguière, uno de sus mejores amigos del museo, le heredó una colección de moluscos vivos y fosilizados. Al reunirlos, Lamarck se percató de que algunas especies fosilizadas de moluscos eran análogas a ciertos especímenes vivos. Ahora podía crear una secuencia cronológica de estos grupos de animales acomodándolos del más arcaico al más reciente, de acuerdo con el desarrollo (aparición y desaparición) gradual de ciertas características. Concluyó que en definitiva las especies cambiaban con el tiempo.

Como estudioso aficionado a la geología, Lamarck creía en que la superficie de la Tierra no era estática sino dinámica y, si la Tierra cambiaba, entonces las especies podían perder las características que les habían permitido adaptarse a determinado medio ambiente. Conceptualmente estaba en lo correcto: tenemos una especie adaptada a su medio ambiente, luego el medio ambiente cambia y la especie junto con él, dada su lucha por la supervivencia. Sin embargo, estaba equivocado en el ejemplo clásico que él mismo utilizaba para explicar el mecanismo mediante el cual se daba el cambio. Para tal efecto, Lamarck decía que el cuello tan largo de la jirafa se dio como consecuencia a los intentos por alcanzar su alimento localizado en las hojas de los árboles que cada vez eran más altos y que esta característica adquirida por la necesidad de alimentarse podía heredarse a la descendencia. Aunque es un argumento sin duda muy tentador, es falso. Lo calificamos como “tentador” porque ¿cuántos de nosotros quisiéramos que ciertas experiencias, habilidades y destrezas adquiridas durante nuestra vida, incluso vocaciones o entretenimientos, pudieran heredarse a nuestros hijos? Sería como

perfeccionar nuestra descendencia a satisfacción plena. Por desgracia o por fortuna, no es así. Las características adquiridas en el transcurso de una vida no podemos transmitirlos de manera consciente ni inconsciente a nuestras células germinales (óvulos y espermatozoides) para que posteriormente puedan manifestarse en nuestra descendencia. Pero por otro lado, sí es posible heredar algunas características de manera no germinal, como la cultura, el idioma o el nicho ecológico (hábitat), que también forman parte de la evolución. En fin, que el gran logro de Lamarck fue aceptar que las especies cambian con el transcurso del tiempo y que las transformaciones que sufre el medio ambiente son un estímulo importante para que dichos cambios se lleven a cabo. Esto es evolución.

Cuando Lamarck se estaba muriendo (1829), Charles Robert Darwin (1809–1882) contaba ya con 20 años y el conocimiento del mundo se había expandido en todas direcciones (figura 1–5). Se tenía la idea precisa de nuevos continentes, nuevos mundos y de organismos tan pequeños que nunca nadie los había siquiera imaginado. La Tierra misma estaba revelando su edad gracias a los hallazgos sedimentarios y de fósiles. Las monarquías caían y eran reemplazadas por gobiernos constitucionales; muchas colonias se independizaron. Aquellos individuos fieles y aferrados al conocimiento antiguo se sentían día a día más incómodos al darse cuenta de que sus ideas cuadraban cada vez menos con la realidad. La gente de la época se veía a sí misma con la capacidad de entender mejor el mundo que la rodeaba, incluso el mundo natural. Las mentes humanas trabajaban con ecuaciones la gravitación y con reacciones químicas combinando partículas elemen-



Figura 1–5. Charles Darwin (1809–1882), en su juventud. Así era el autor de la idea más importante en biología antes de iniciar su viaje alrededor del mundo.

tales conocidas como átomos. Así, Charles Darwin se encontró inmerso en esta revolución científica, tecnológica y sociopolítica. Él nació en Shrewsbury (Shropshire), Inglaterra, en una zona denominada Midlands, el 12 de febrero de 1809 (el mismo día que nació Abraham Lincoln), en el seno de una familia acomodada.

Erasmus Darwin fue su abuelo, un médico sobresaliente y exitoso, contemporáneo de Lamarck y con quien compartía el mismo pensamiento acerca de las especies. Aunque cercanos, nunca llegaron a conocerse. Erasmus cuestionaba fuertemente la autoridad de la Biblia pero no era ateo; decidió reverenciar a la ciencia como una manera muy propia de honrar a la creación.

El abuelo de Darwin se casó en segundas nupcias con una viuda adinerada y en total tuvo 12 hijos. Erasmus Darwin fue una persona sensualista que llegó a escribir poesía erótica y a prescribir tener relaciones sexuales como tratamiento para los pacientes hipocondriacos. Entre algunas de las obras que escribió sobresale una escrita en verso, titulada *Zoonomia*, en la cual describía, junto con otros temas, el origen de la vida.

Charles Darwin reconoció y admiró la fama de su abuelo y se aficionó a la lectura de *Zoonomia*. Su padre, Robert Darwin, también fue médico, aunque con una débil vocación, menos ambicioso y sin tanta afinidad o inclinación por las ciencias. Fue un padre muy estricto que a la muerte de su esposa mantuvo un ambiente hogareño muy opresivo; para entonces, Charles Darwin contaba con apenas ocho años y quedó al cuidado de sus tres hermanas mayores. Siempre estuvo maravillado por la belleza de los bosques y le fascinaba coleccionar insectos, por lo que su hermana Carolina lo calificaba de cruel.

Como era de esperarse, Charles Darwin fue obligado a estudiar medicina, su abuelo lo había hecho, al igual que su padre y que su hermano mayor, también llamado Erasmus en honor a su abuelo. Con el fin de iniciar los estudios correspondientes, llegó a Edimburgo (capital de Escocia) a los 16 años. Pero odió la medicina, y no por lo que como ciencia representaba, sino por los hábitos y la metodología de la impartición de clases. Dejó de asistir a las demostraciones de cirugía debido a que no soportaba que se llevaran a cabo las disecciones quirúrgicas en vivo y sin anestesia, pero se alejó definitivamente cuando tuvo que escapar corriendo de un procedimiento que se llevaba a cabo en un paciente pediátrico. Además, hay que agregar que era muy joven e indisciplinado para el estudio, y sospechaba que heredaría suficiente dinero como para preocuparse demasiado por tener una profesión.

Como era de esperarse, su padre Robert se inconformó y no dejó que perdiera el tiempo. Lo obligó a estudiar taxidermia (arte de disecar animales para conservarlos con apariencia de vivos) con un esclavo recién liberado y procedente de Guyana, quien a su vez le platicó algunas historias insólitas de los trópicos. También tomó clases de biología con Robert Grant, quien había estudiado en Francia

y era autoridad máxima en invertebrados con especialidad en larvas, y afanado devoto de Lamarck.

Grant sentía un afecto especial por Darwin, dado que era el nieto de Erasmus Darwin, cuyo libro *Zoonomia* leyó y estudió para realizar su tesis. Así que desde entonces Charles Darwin estuvo expuesto de una u otra manera al nuevo y controvertido pensamiento evolucionista. Se empezó a motivar con los retos intelectuales originados por las nuevas ideas y, aunque exaltado, supo mantenerse ecuaníme, pues tenía la experiencia vivida por su abuelo Erasmus, tan criticado por la sociedad debido a su “pensamiento inconveniente”.

Escocia también se convirtió en un centro importante para el estudio y el desarrollo de la filosofía moral, una disciplina que después se dividió en filosofía, sociología y economía (nótese que la moral no tiene nada que ver con la religión sino con la ética). Aunque Darwin no era estudioso de dichas materias, las ideas expuestas en ellas eran muy interesantes. Por ejemplo, una que marcó profundamente su pensamiento fue la expuesta por Adam Smith en Glasgow, con su obra *El bienestar de las naciones*, la cual relata cómo los individuos, en busca de su propio beneficio, trabajaban por el bienestar de la sociedad. Adam Smith contaba esta situación: un comerciante del mercado tenía que darse cuenta de la cantidad de mercancía que se vendía para poder planear la producción de lo que comercializaba; por ejemplo, si existía mucha competencia en la venta de pan, entonces tendría que cambiar y empezar a vender pasta; el resultado final era la diversificación en la distribución del trabajo que traía como consecuencia un beneficio para todos. Posteriormente, Darwin aplicó este concepto de competencia individual y diversificación a la biología.

Robert Darwin, exasperado por su hijo Charles y su fracaso en la escuela de medicina, lo sentenció: no habría dinero ni soporte económico si no estudiaba alguna profesión. Sería enviado a Cambridge para introducirlo al sacerdocio, lo cual sería difícil para Darwin, ya que había pasado más de un año en compañía de maestros y amigos que retaban fuertemente a la filosofía religiosa. Sin embargo, logró sobrellevar sus estudios religiosos gracias a que les dio el enfoque de la “teología natural”. En Cambridge, Darwin hizo buenas amistades, siendo la más importante la del reverendo John Henslow, la clase de clérigo con quien Darwin se identificaba y quien representaba la imagen de él mismo en el futuro, debido a que Henslow era una persona extraordinariamente competente en todas las áreas de las ciencias naturales y se llevaba a sus alumnos a caminar por el bosque para recolectar insectos, rocas y plantas. Estudiando con Henslow, Darwin encontró su verdadera vocación, de hecho se convirtió en su alumno favorito y luego fue reconocido como “el hombre que caminaba junto a Henslow”.

John Henslow fue entonces el hombre que marcó el camino de Charles Darwin en dirección a la gloria y a la inmortalidad. Él le regaló a Darwin los trabajos de Sir John Herschel basados en el estudio de la astronomía y también le obsequió

las publicaciones de Alexander von Humboldt sobre sus viajes a América del Sur. En una sola frase: Henslow preparó a Darwin para la vida que él había deseado para sí mismo: una vida de viajes y aventuras al servicio de la ciencia; y no sólo eso, sino que le complementó sus estudios mandándolo a trabajar como asistente de Adam Sedgwick, un conocido geólogo, en el norte de Gales, durante una temporada lo suficientemente larga como para convertirlo también en un eficiente geólogo.

En aquella época, también la geología era una ciencia revolucionaria. Intensos y fuertes debates se llevaban a cabo, con diferentes argumentos, cuyos propósitos se limitaban a definir la edad de la Tierra. Mientras el obispo James Usher analizaba cuidadosamente la historia medieval para fijar la fecha de la creación de la Tierra a las 09:00 horas del 23 de octubre del año 4004 a.C., los biólogos como Georges Cuvier (1769–1832), considerado el padre de la paleontología, y Buffon, daban modernas alternativas. Los análisis que ya habían realizado en diversas rocas y fósiles hacían difícil creer que la Tierra tuviera apenas unos cuantos miles de años de existencia.

Se empezó a ofrecer, entonces, una alternativa metafórica a la historia bíblica de la creación, mencionando que los seis días en los que supuestamente se había creado el cosmos eran en realidad seis épocas.

Cuando Darwin regresó de Gales se encontró con la siguiente propuesta: un viaje alrededor del mundo a bordo del HMS *Beagle*, cuyo capitán Robert Fitzroy solicitaba compañía, de preferencia un naturalista. El barco circunnavegaría durante dos años. Su misión era detallar las cartas de navegación, principalmente las de América del Sur, y poner a prueba los relojes del Imperio Británico. En un principio, dicha oferta se le había ofrecido a Henslow, quien la rechazó por motivos personales y familiares. Sin embargo, pensó que esa experiencia podría ser gratificante para Charles Darwin, dado que ya había mostrado suficiente entusiasmo por la naturaleza. Fitzroy aceptó la compañía de Darwin y se hicieron los arreglos para el viaje (figura 1–6).

Si Charles Darwin no hubiera realizado el viaje a bordo del *Beagle*, no podríamos hoy hablar del darwinismo. El viaje partió el 27 de diciembre de 1831, cuando Darwin contaba con 22 años, y duró cinco años y no dos como se había previsto. Observó, con su mente siempre despejada, cosas que cambiaron para siempre su manera de ver la vida y la naturaleza: experimentó las sensaciones ocasionadas por un terremoto, encontró fósiles y seres vivos nunca antes vistos y conoció a individuos de tribus primitivas que lo impresionaron por su civilidad y honor.

A bordo del *Beagle*, Darwin contaba con un pequeño camarote, donde además de dormir tenía que acomodar, en un espacio limitado y pequeño, sus libros, notas, equipo y especímenes recolectados. Por si fuera poco, mientras el *Beagle* navegó, Darwin estuvo mareado todo el tiempo y nunca logró adaptarse a la vida en el mar, al punto de que supo que jamás volvería a viajar en un barco. En algunas

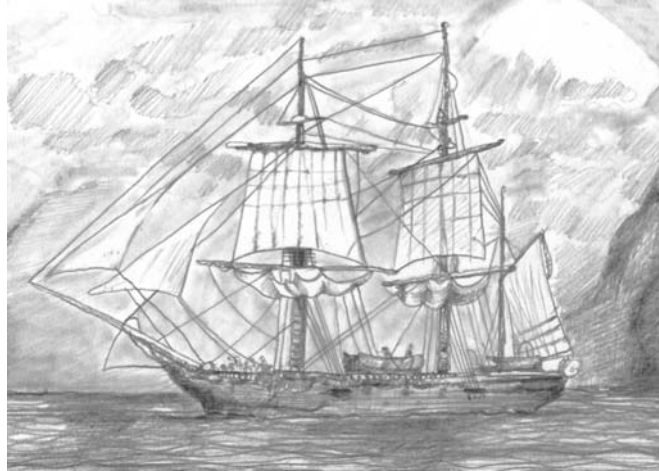


Figura 1-6. El HMS *Beagle*. Navío en el cual Charles Darwin realizaría la circunnavegación del mundo. Primer y único viaje de exploración científica realizada por el naturalista.

ocasiones decidió viajar por tierra y alcanzar al *Beagle* en otro puerto, lo cual le permitió caminar a través de la selva del Amazonas, cabalgar por las pampas argentinas y escalar un poco la cordillera de los Andes.

Justo antes de que zarpara la expedición, Sedgwick le regaló el libro *Principios de geología*, escrito por Charles Lyell, en el cual se exponía una teoría diferente de la formación de la Tierra: la teoría de la uniformidad. Ésta establece que todos los procesos naturales que cambian la Tierra en el presente lo han hecho de forma idéntica en el pasado. Lyell explicaba que la superficie terrestre cambia lentamente como resultado de los efectos causados por el vulcanismo y por los terremotos o movimientos sísmicos.

La apreciación que tenía Darwin de la Tierra era la de un geólogo naturalista, de modo que cuando recolectaba muestras hacía una descripción geológica. Coleccionó muestras de rocas y estudió la formación de islas y montañas de América del Sur. Al encontrarse con fósiles intactos de seres marinos en las alturas de las montañas se convenció de las ideas propuestas por Lyell.

En Chile, Darwin experimentó los efectos ocasionados por un terremoto devastador. Describió que la tierra, siendo tan sólida, se movía ondulante como una costra sobre un líquido, luego corrió hacia el *Beagle* y navegaron hacia el Norte para llegar a la ciudad de Concepción. Ahí se dieron cuenta de que el nivel de la costa había subido varios metros, que gran parte de la ciudad se encontraba en escombros, que en dicho lugar habían experimentado los efectos y secuelas de una ola de siete metros de altura (con seguridad un tsunami) y que varias personas habían muerto. Darwin estuvo afectado emocionalmente durante varios minutos,

nunca imaginó que la naturaleza pudiera actuar con una fuerza de tal magnitud. Supo todo lo que la Tierra podía cambiar en unos cuantos segundos.

Darwin continuó recolectando fósiles, muchas veces a pesar de la irritación o el descontento de Fitzroy, pues algunas de las piezas eran grandes y pesadas. Luego encontraron la manera de mandar por adelantado a Inglaterra algo del material recolectado para aligerar el navío. Aunque Darwin era incapaz de identificar todos los fósiles, anotó la observación de que algunos de ellos parecían versiones muy grandes de especies vivas más pequeñas.

De camino a casa, el *Beagle* se detuvo en el archipiélago de las islas Galápagos. En general, se tiene la noción de que fue aquí donde Darwin se inspiró para escribir su teoría de la evolución. Sin embargo, cuando llegó a estas islas volcánicas semidesérticas de clima bastante seco, él, Fitzroy y el resto de la tripulación se encontraban muy cansados y en lo único que pensaban era en el regreso a Inglaterra. Efectivamente, Darwin se maravilló con las tortugas gigantes que observó en las islas, así como con las iguanas y los pinzones. Recolectó varios especímenes con gran facilidad y se los envió a su familia y a Henslow, sin tomar la precaución de etiquetarlos cuidadosamente, error grave del que posteriormente se arrepentiría al no poder identificar de qué isla provenía cada uno de ellos. Lo único que en particular llamó la atención de Darwin en ese momento del viaje fue que los lugareños le comentaron que cada isla tenía sus propias especies.

Luego de un viaje exitoso, volvió a casa en octubre de 1836, y su padre estaba orgulloso porque finalmente se había definido el futuro de Charles Darwin. Para empezar, publicaría el relato de su viaje, que prometía ser mucho mejor que 99% de los relatos de otros viajes que ya estaban en la imprenta, e implicaría un ingreso económico importante.

Una vez en su hogar tuvo que iniciar el arduo y verdadero trabajo. Cajas y cajas repletas de rocas, aves, animales diversos y plantas tenían que ser identificados y clasificados por los mejores expertos disponibles. Para sorpresa de Darwin, una buena cantidad de ellos, si no todos, estaban dispuestos y entusiasmados por llevar a cabo dicha tarea. Dadas las características de las labores que tenían que realizarse, Darwin se vio forzado a vivir en Londres, cerca de los museos y donde su hermano mayor Erasmus ejercía exitosamente la práctica médica. En compañía de varias amistades, vivieron juntos una aventura intelectual muy agradable. Erasmus Darwin tuvo una relación casi escandalosa con Harriet Martineau, una escritora feminista y atea quien a su vez conocía y admiraba a Thomas Malthus. Así que, otra vez, Darwin estuvo expuesto a un mundo de ideas no precisamente relacionadas con el mundo natural sino con el pensamiento social moderno, propio de aquella época.

Al mismo tiempo se ocupó de participar también en la clasificación de las muestras recolectadas, a ordenar las notas de su viaje y a escribir su *Revista de las investigaciones sobre historia natural y geología de los países visitados du-*

rante el viaje del H. M. S. Beagle alrededor del mundo, bajo el comando del capitán Fitzroy.

Su colección llamó la atención de científicos de alto renombre, como Richard Owen (anatomista comparativo), quien aceptó trabajar con los fósiles; el ornitólogo John Gould, que se dedicó con gusto e interés a clasificar las aves; y Lyell, el gran geólogo autor del libro que cambió la manera en cómo Darwin apreciaba al mundo, se dedicó a estudiar las muestras de rocas. Rodeado de tan distinguidas personalidades, Darwin empezó a frecuentar diversos círculos y organizaciones científicas. Sin embargo, y a pesar de recibir la atención y reconocimiento de los grandes hombres de ciencia, él nunca dejó de verlos con respeto ni de admirarlos como los héroes que le dieron su formación.

Conforme se llevaba a cabo toda esta labor, la mente de Darwin trabajaba con las muestras que él mismo había coleccionado sobre una idea que al principio denominó “la transmutación (cambio de forma) de las especies”. Recordaba que los pinzones recolectados en las islas Galápagos no eran sólo variedades de aves de América del Sur sino que, al igual que las tortugas, eran especies diferentes. Por cierto, debido a las insistentes preguntas del ornitólogo Gould, con frecuencia Darwin tuvo que recurrir a Fitzroy y a su asistente para tratar de recordar en qué isla había recolectado cada una de las aves.

Un año después de haber regresado a Inglaterra empezó a escribir un ensayo llamado *Zoonomia*, el mismo título del libro del origen de la vida y la evolución que escribió su abuelo Erasmus. En esta obra, de apenas 27 páginas, Darwin inició con una serie de preguntas dirigidas a pensar en la transmutación. En ella postuló algunas respuestas que luego derivaron en una serie de experimentos cuya finalidad era tratar de contestar esas cuestiones. Mientras tanto, otros naturalistas propusieron sus versiones sobre la misma idea. En 1844 se publicó un libro anónimo, cuyo título era *Vestiges of the natural history of creation* (*Vestigios de la historia natural de la creación*), y 40 años después se descubrió al autor, Robert Chambers, quien guardó el secreto durante ese tiempo porque su empresa era una importante editorial de libros bíblicos. En dicho libro se indicaba que quizá los seres humanos evolucionaron a partir de los primates inferiores. Además, se hacía una clara referencia a la transmutación de las especies. A pesar de que estaba escrito con estilo popular y carente de un fundamento científico, vendió 24 000 ejemplares; mucho más que el libro de geología de Lyell y *El origen de las especies*, que publicó posteriormente Charles Darwin. Aunque *Vestiges of the natural history of creation* era un libro pobre en ciencia, inspiró a otros pensadores naturalistas y evolucionistas como Alfred Russel Wallace.

Charles Darwin continuó pensando en su propia teoría de la evolución y guardándola celosamente en su mente. Tenía planes para anunciarla y algún día darla a conocer, pero luego de reunir suficientes pruebas que no fueran sujetas a la controversia, sino por el contrario, que fueran contundentes. Además, guardaba la

esperanza de que cambiara el clima científico e intelectual de aquella época. Escribió libreta tras libreta de pensamientos desarrollados con base en su idea de la evolución; contactó a criadores de plantas y de animales, incluso él mismo empezó a criar palomas y continuó recolectando información y experimentando; todo con la finalidad de darle soporte a cualquier tipo de objeción que pudiera tener su teoría. Todo este trabajo lo realizó en silencio, sin comentar ni media palabra con ningún colega.

Y el clima intelectual cambió... Thomas Henry Huxley (1825–1895), un joven reformista y alborotador, entró en escena. Al principio no era evolucionista, sino que invertía su tiempo encontrando la manera para iniciar una profesión científica que estuviera exenta del reconocimiento del clero. Tomó como blanco estratégico al venerable Richard Owen, el anatomista comparativo que trabajó en la clasificación de fósiles de Darwin y presidente de la Asociación Británica para el Avance de las Ciencias. Al contrario que Darwin, Owen era un individuo que estaba más preocupado por mantener su lugar en la elite científica y social que en realizar estudios de investigación, y respondía veloz y mordaz a cualquiera que amenazara su reputación. Sin embargo, los argumentos a favor de su propia defensa fueron los responsables de su caída. Huxley, la nueva defensa de Darwin, había llegado, y se convertiría finalmente en un evolucionista.

Corría 1858, y hasta entonces, 20 años después de que iniciara sus notas sobre la evolución, Darwin empezó a considerar la divulgación de sus ideas. Los tiempos habían cambiado y también el medio ambiente ideológico concerniente a la historia natural. Las mentes modernas se frustraban con los modelos científicos viejos e inadecuados; las nuevas ideas empezaban a dominar en el campo de la biología.

Charles Darwin concertó una cita con Lyell y así, en una reunión en privado le comentó su nueva teoría de la evolución. Para entonces, Lyell había leído ya un artículo publicado en una revista de agricultura, cuyos tiraje y circulación eran reducidos, además de que carecía de un reconocimiento importante. El artículo había sido escrito por Alfred Russel Wallace, un coleccionista marginado y carente de aceptación en los círculos intelectuales de entonces. Pero tal publicación había impresionado a Lyell, pues trataba precisamente sobre lo que Darwin acababa de comentarle, así que no vaciló en presionarlo para que se diera prisa con la divulgación de su idea, ya que Wallace había mostrado intenciones de adelantarse.

A pesar de las advertencias de Lyell, Darwin continuó siendo (y no sin razón), muy cauto y sigiloso, recordaba con precisión los castigos aplicados a los otros autores que se habían atrevido a divulgar herejías. Además estaba sometido a una fuerte presión moral por parte de su prima y esposa Emma Wedgwood, quien temía que estuvieran separados para toda la eternidad, pues le comentaba que de seguir pensando de esa manera lo más probable era que, al morir, él se fuera al

infierno y ella al cielo. Por otro lado, Darwin no podía arriesgarse a perder su posición en la comunidad científica por no haber reunido pruebas fuertes e infalibles. Así que al principio, aunque el terreno se estaba preparando, en parte por él mismo y en parte por el tiempo que aportaban nuevos y entusiastas biólogos, permaneció en silencio. También leyó el trabajo publicado por Wallace que impresionó a Lyell, pero no se preocupó, ya que según Darwin ese artículo no decía “nada nuevo” y era demasiado “creacionista” (creacionismo es el término utilizado para referirse a la hipótesis que hace referencia a que todo lo que observamos en la naturaleza es producto de una inteligencia suprema, llámese Dios u otra); pero existía un error en la interpretación de Darwin del trabajo de Wallace. Según Darwin, el artículo de Wallace mencionaba algo sobre la “creación de las especies” pero Wallace no lo hacía en el sentido bíblico de su significado. Después de las advertencias de Lyell, Darwin volvió a leer una y otra vez el trabajo de Wallace hasta que cayó en la cuenta de que, efectivamente, la publicación, en un principio interpretada incorrectamente por él como insignificante e inofensiva, era en realidad un verdadero y amenazante riesgo.

Fue hasta entonces cuando cambió la idea que Charles Darwin tenía sobre Alfred Wallace y empezó a considerarlo no como a un enemigo intelectual, sino como a un tentativo miembro de su alianza. Le escribió y lo invitó a formar parte de su grupo de jóvenes biólogos con ideas nuevas. Wallace aceptó el trato. Darwin le pagaría por contribuir con especímenes a su propia colección de pollos, patos y palomas, pero del Lejano Oriente.

Darwin también le dijo a Wallace que los gastos de envío acabarían con su propia economía y que terminarían por llevarlo a la ruina, pero que los especímenes eran invaluable; asimismo, reconoció y elogió los pensamientos que Wallace tenía sobre las especies y le comentó que ambos tenían una manera de pensar muy similar. Con esto, y considerando la corta edad y los antecedentes de Wallace (que analizaremos posteriormente), era de esperarse que se sintiera halagado y satisfecho con dicho trato. Después de todo, se sentía privilegiado y alabado porque Darwin reconocía sus ideas como acertadas: eso era más que cualquier paga, una fuerte inyección de ánimo para trabajar como naturalista junto a él. Así Darwin se había sentido con Henslow durante un tiempo, sólo que en este caso Wallace estaría muy lejos, padeciendo fiebres, largas temporadas de intensas lluvias y buscando siempre un medio de transporte más o menos decente para que lo trasladara de una a otra isla de Indonesia.

Algún tiempo después, Darwin recibió un trabajo de Wallace que tenía la única intención de darle a conocer su opinión de lo que hasta entonces había visto y vivido. Para Darwin, este artículo significó un desastre, pues Wallace había escrito la misma teoría que él tenía en mente. Aunque Darwin no estaba del todo de acuerdo con algunas ideas que veremos más adelante, básicamente los dos describían la fuerza principal que dirige a la evolución: “la selección natural”. A conti-

nuación analizaremos la trayectoria de Wallace para después pasar específicamente a lo que nos dice la teoría de la evolución.

Alfred Russel Wallace nació en 1823 y falleció en 1913: era 14 años más joven que Charles Darwin y le sobrevivió 33 más; esto nos ubicará adecuadamente en el tiempo y en sus edades. Wallace y Darwin fueron “la imagen en espejo” uno del otro. A diferencia de Darwin, que provenía de una familia exitosa que se había acomodado en una clase social alta, Wallace tuvo su origen en una familia privilegiada cuyos padres perdieron su fortuna y orillaron a los hijos a abandonar sus estudios para que cada quien construyera su propio destino. Wallace se dio cuenta de cómo, de manera trágica, su familia perdía su fortuna mal gastada y en inversiones infructuosas. Sus padres vendían un inmueble tras otro y se veían forzados a mudarse a casas cada vez más pequeñas. Él interrumpió sus estudios a la corta edad de 14 años, cuando él y su familia formaban parte de la clase trabajadora. Intentó desempeñarse en varias labores, desde trabajar en la construcción de edificios hasta elaborar joyas, pero nada satisfacía tanto su curiosidad intelectual como la historia natural. Inspirado por los relatos de Alexander von Humboldt y Charles Darwin, no hacía otra cosa que pensar en cuándo podría él realizar una de esas expediciones para llevar a cabo lo que ya realizaba, pero en muy pequeña escala, como botanista por pasatiempo: coleccionar y clasificar especímenes del mundo natural.

Dada su afición por la naturaleza conoció a otro joven que pensaba como él, Henry Walter Bates, un entomólogo (especialista en zoología dedicado al estudio de los insectos) también por pasatiempo, pero con mejor educación y entrenamiento. Él, de 22 años, y Bates, de 23, planearon un viaje de exploración a la selva y al río Amazonas, en un sentido más aventurero que profesional. Financiaron su expedición con el dinero obtenido de la venta de especímenes al Museo de Historia Natural de Londres. Se prepararon para el viaje leyendo todo lo que pudieron sobre historia natural, incluido el famoso y anónimo libro *Vestigios de la historia natural de la creación*. La reacción de ambos al leer el contenido de esta obra fue muy diferente. Bates se mostró crítico e incrédulo mientras que a Wallace le pareció extraordinario y excitante en su tema principal; argumentó que lo que Chambers decía tenía sentido y supo que su verdadera vocación era la de encontrar pruebas suficientes para comprobar que las especies no eran inmutables como Lyell decía; demostraría que las especies cambiaban con el paso del tiempo.

Una vez en el Amazonas, Wallace y Bates se separaron. Bates permaneció ahí muchos años y se convirtió en un reconocido, renombrado y admirado entomólogo. Wallace recorrió miles de kilómetros río arriba, aprendió a hablar portugués y también a capturar y preparar especímenes. Observó y recolectó una gran cantidad de datos sobre historia natural, los cuales le darían soporte a su versión del origen de las especies. Realizó notas cuidadosas y detalladas acerca de la distri-

bución de las especies, una y otra vez se dio cuenta de cómo especies similares pero diferentes habitaban distintas zonas geográficas a lo largo del Amazonas. Comercializó exitosamente parte de su colección y, al final de tres años, decidió regresar.

Después de un incendio y un naufragio desafortunados, Wallace regresó a casa con las manos vacías pero con una buena reputación como explorador y coleccionista, lo cual le sirvió para conseguir un patrocinio para un viaje a Indonesia. En esta expedición duró ocho años viajando de isla en isla y así logró darse cuenta, con toda claridad, de los efectos geográficos del aislamiento en la evolución de las especies.

Fue en esa expedición y, específicamente en Singapur, en donde escribió su primer artículo intitulado *Sobre la ley que regula la introducción de las nuevas especies*, el mismo que leyó Lyell y del cual advirtió a Darwin. En esta publicación, Wallace comentó que las especies comienzan su existencia a partir de transformaciones previas e íntimamente relacionadas, que se dan lugar en el tiempo y en el espacio (entendiéndose como espacio a los diferentes lugares en la geografía de la Tierra); también describió la distribución de las especies semejan las ramas de un árbol, metáfora utilizada también por Darwin (figura 1–7).

Una palabra confundía a Darwin en el escrito de Wallace: “creación” en lugar de “evolución”, ya que esta última todavía era un vocablo de uso poco común. La oración de Wallace dice así: “que las islas fueron poblándose de manera sucesiva, una a seguir de otra y que las nuevas especies que las habitaban habían sido



Figura 1–7. Alfred Russel Wallace (1823–1913), autor de *Sobre la ley que regula la introducción de las nuevas especies*. Viajando de isla en isla logró darse cuenta de los efectos geográficos del aislamiento en la evolución de las especies.

creadas con base en planos corporales preexistentes”. Utilizar la palabra *creadas* confundió a Darwin y lo hizo pensar en que Wallace utilizaba dicho término en relación con el creacionismo, por ende, a la influencia de una inteligencia superior y a que Wallace pertenecía a la corriente del creacionismo. Luego, Darwin se percató de su error en la interpretación y reconoció que Wallace había escrito antes lo que él mismo había estado pensando desde hacía 20 años; que el misterioso y oscuro recolector Wallace estaba, si no muy cerca, en la misma posición que él en cuanto a la idea de la evolución de las especies; sólo que con una pequeña y gran diferencia, la cual representaba para Darwin un desastre: él era una persona educada profesionalmente y Wallace no.

Darwin fue cauteloso; preparó y escogió con mucho cuidado los argumentos que le darían soporte a su teoría; así lo quiso hacer por miedo a perder su puesto y su credibilidad si es que lo llegaban a destruir en los debates científicos, pero Wallace, como no tenía nada que perder, se precipitó a divulgar su idea.

Entonces, ¿a quién se le debe otorgar la autoría de la teoría de la evolución? A Darwin se le otorgó un crédito mayor por su idea de la evolución debido a que sólo él desarrolló la teoría con gran detalle, mucho más que Wallace; además, Darwin proveyó numerosas pruebas y se responsabilizó públicamente por la aceptación de su pensamiento. Por otro lado, Wallace difería de Darwin en varios puntos; aunque ambos pensaban que el origen del hombre y su evolución eran el producto de la selección natural, Wallace insistía en que las capacidades mentales superiores del *Homo sapiens* (o sea nosotros) no podían haberse originado por la selección natural, como Darwin lo argumentaba, sino que algún factor no biológico tenía que ser el responsable. De esta manera dejó ver sus convicciones espirituales.

En este momento hago un pequeño paréntesis para mencionar una reflexión sobre Thomas Malthus (1766–1834), quien nació y vivió en Surrey, Inglaterra, el mismo lugar de donde era originario Alfred R. Wallace. Thomas Malthus fue un pensador sobresaliente en el área económica y social. Advirtió sobre el hecho de que las poblaciones humanas crecían muy rápidamente, en cuanto al número de sus habitantes se refiere; demasiado rápido para los recursos de los que tenían que echar mano para sobrevivir. Si esto no se tomaba en cuenta, y el número de humanos seguía creciendo exponencialmente, mientras que el incremento en los recursos necesarios para vivir se daba aritméticamente porque su producción se basaba en áreas limitadas, entonces llegaría un momento en el que, en especial los más pobres, tendrían que librar una lucha importante por la sobrevivencia. Todo parece indicar que tanto Darwin como Wallace adoptaron este pensamiento para aplicarlo a la biología. Continuamos...

Con el trabajo de Wallace publicado y bajo la presión de Lyell, Charles Darwin se vio obligado a divulgar un ensayo de su teoría que había escrito tiempo atrás. Lyell y otros miembros de la academia decidieron presentar ambos documentos,

tanto el de Wallace como el de Darwin en una misma sesión de la Sociedad Científica Linneana (en honor a Linneo). Sin embargo, no causó mayor reacción entre la comunidad científica, pero Darwin se dio cuenta de que tenía que escribir rápidamente sus ideas para una publicación seria. Esto significaba que no podría completar una obra con muchos volúmenes, que era lo que había deseado, porque el tiempo se venía encima, así que empleó el siguiente año para dedicarse fervientemente a la preparación de su obra maestra, con la cual ganaría la inmortalidad: *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life* (*El origen de las especies por selección natural o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida*).

Wallace continuaba viajando por las islas de Indonesia cuando Darwin publicó su libro. Sin embargo, se sintió profundamente complacido cuando se enteró de que su trabajo había sido presentado en sesión académica junto con el de Darwin. Incluso le escribió una carta a su madre con algo que decía más o menos así: “he recibido una carta del Sr. Darwin, una de las más grandes eminencias en ciencias naturales de toda Inglaterra, que me ha hecho sentir muy agraciado... Le mandé al Sr. Darwin un ensayo que trata un tema relevante sobre el cual se encuentra escribiendo un libro muy importante...”

Pero, después de todo esto, ¿en qué consistía exactamente la idea que a ambos se les ocurrió? Nada más y nada menos que en la selección natural.

La selección natural provee la maquinaria necesaria para que las especies puedan cambiar, es una fuerza externa a los organismos, una fuerza análoga a la fuerza de gravitación de Newton. Después de todo, si Lyell concluyó que la superficie terrestre cambiaba lentamente con el tiempo, entonces los seres vivos tendrían que cambiar también.

La selección natural significa que los organismos cambian de acuerdo con el medio ambiente en el que habitan. Es un proceso mediante el cual el medio ambiente conduce a un grado variable de éxito reproductivo entre los individuos de una población con características o rasgos diferentes y heredables. Las características que inhiben el éxito reproductivo se hacen menos frecuentes de generación en generación y el incremento resultante en la proporción de individuos que son reproductores eficaces mejora la adaptación de la población a su medio ambiente. Al final, y después de mucho tiempo, parece que cada organismo está previamente diseñado, a la perfección, de acuerdo con la región que habita. Significa también que el cambio se da a través de la supervivencia y reproducción del organismo que se acopla mejor a su medio ambiente; si se acopla a su medio, entonces sobrevive con facilidad y tiene más oportunidades de apareamiento, logrando así transmitir a su descendencia las características que a su vez le permitieron sobrevivir. Si sus características biológicas no le permiten adaptarse al medio para sobrevivir y reproducirse, entonces tiene que presentar un cambio. Si el cambio no se presenta, entonces el organismo se extingue. También, cuando los cambios se

presentan, lo hacen lentamente y son casi imperceptibles, pero finalmente lograrán que el organismo adquiera nuevas formas, anatomías diferentes que implican desarrollo o aparición de una nueva especie, que se separa de otra, a partir de un tronco común entre ambas, como las ramas de un árbol.

Es muy notable y digno de admiración cómo fue que Darwin y Wallace concibieron la teoría de la evolución mediante la observación, el pensamiento y la reflexión. Me permito hacer este comentario por tres razones: primera, aunque ciertos fenómenos geológicos como los sismos y el vulcanismo eran bien conocidos, los mecanismos precisos mediante los cuales se llevaban a cabo y el grado en el cual modifican el paisaje y el medio ambiente no lo eran. No se tenía una remota idea de la edad de la Tierra. Tampoco se sabía que en el transcurso de 4 500 millones de años nuestro planeta había cambiado considerablemente en su apariencia. Las suposiciones de Lyell eran acertadas pero no se conocían en detalle. Recordemos que la teoría de la “tectónica de placas” fue propuesta en 1912 por Alfred Wegener y finalmente formulada en 1960. Tampoco se imaginaban que un objeto proveniente del espacio exterior (digamos un meteorito) podría impactarse en la Tierra y ocasionar un sinnúmero de cambios geológicos y ambientales que se traducen en una fuerte presión de selección natural para impulsar la evolución de ciertas especies y llevar a la extinción a otras. Segunda, a pesar de que para entonces no se había descubierto el genoma ni las características del funcionamiento de los genes, lograron suponer dos de las funciones principales, las “dos caras del genoma”, es decir, por un lado, la capacidad que tiene el genoma para conservar estrictamente la información que determina las características que a su vez permiten a determinado organismo ser apto y transmitirla, en la mayoría de los casos sin errores, a su descendencia; y la otra cara, la de no ser tan rígido y permitir variabilidad en la información. Darwin observó que los individuos de una misma especie mantenían ciertas características o rasgos físicos que eran transmitidos o heredados sin errores generación tras generación y que precisamente estas características compartidas los identificaban como miembros de una misma especie; pero, aunque muy parecidos, ninguno era igual a otro. Lo observó hasta en sus propios hijos, unos fueron fuertes, nacieron y se desarrollaron sanamente, pero otros, como su hija Anne, fueron débiles. Anne o Annie, como le llamaba de cariño Darwin, padeció una enfermedad pulmonar, al parecer una tuberculosis, y su médico, el Dr. James Clark (el mismo que trataba a Federico Chopin), no pudo hacer mucho y lamentablemente falleció. Este hecho hizo reflexionar a Darwin sobre una gran cantidad de detalles para su teoría de la evolución. Tercera, efectivamente los organismos cambian. Aunque para entonces no se conocían, hoy se sabe que existen muchos mecanismos que propician el cambio. Muchos de estos cambios genéticos se presentan de generación en generación pero en su mayoría no tienen repercusión alguna, otros pueden mejorar o empeorar la adaptabilidad de una especie, y otros, aunque permanecen neutrales durante

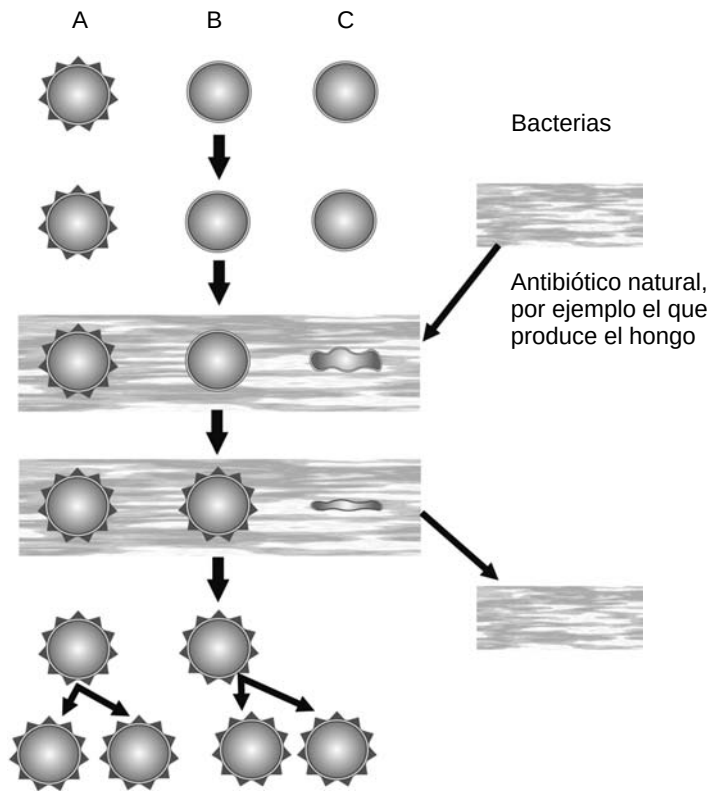


Figura 1–8. Un modelo simple de selección natural: las bacterias **A**, **B** y **C** se someten a una presión de selección natural (el antibiótico penicilina). **A**. Bacteria con resistencia a la penicilina, se adapta fácilmente a su nuevo hábitat rodeado de penicilina. **B**. Bacteria que realiza un cambio adaptativo y sobrevive a la presión de selección natural. **C**. Bacteria que no logra adaptarse al medio ambiente cambiante y muere. **A** y **B** han sido relacionadas de manera natural. **C** no ha sido seleccionada. **A** y **B** continuaran reproduciéndose.

algún tiempo, los puede modificar el ambiente y traducirse en una característica que mejore o que empeore la adaptabilidad, según el caso (figura 1–8). Darwin tenía todas estas ideas en la mente pero no podía detallarlas ni aclararlas como lo hizo Newton con sus ecuaciones porque los mecanismos mediante los cuales se presentan no eran conocidos en ese tiempo.

Darwin también sabía que el cambio se daba, pero que carecía de dirección o fin último, es decir, que los organismos cambian pero no necesariamente con el fin de hacerse más complejos o más inteligentes, sino simplemente para lograr sobrevivir y reproducirse. Muy a su pesar, no podía mencionar cómo es que estos cambios se llevaban a cabo, ya que la genética, como ciencia, no había nacido

para el momento en el que Darwin y Wallace desarrollaron sus modelos acerca de la evolución. Finalmente, Darwin reconocía que se necesitaban ciertos requisitos, ignorados en ese entonces, para que su teoría pudiera trabajar. ¿Qué hacer? ¿Cuál fue la solución? Darwin tenía una teoría que él sabía era correcta, pero no contaba con pruebas científicas. Carecía de la precisión de Newton y de la reconfortante claridad del libro del Génesis. Solucionó el problema escribiendo un solo argumento, extenso e impresionantemente completo, pero pesado por la cantidad de detalles; lo tenía que hacer así para lograr convencer a sus lectores, pues carecía de método científico. A su argumento lo denominó *El origen de las especies* y lo publicó en 1859, a los 50 años. En su libro decidió sustituir el método científico con ejemplos familiares, optó por discutir la selección artificial o la manipulada por el hombre, o sea la crianza de animales domésticos, en un intento por demostrar con elementos de la vida real su teoría de la selección natural. Y lo logró con éxito. Muchos estaban familiarizados con la crianza de perros, caballos o vacas, donde existen hasta concursos para premiar al mejor ejemplar. Utilizando estos ejemplos, y para apoyar su teoría de la evolución, Darwin estableció en su libro dos requisitos previos: uno, que existe variabilidad en los individuos de una misma especie; aceptar la variabilidad era esencial para su teoría, ya que las diferencias entre los individuos son la materia prima en donde ejerce la selección natural. Fue un gran acierto escoger a las especies de animales domésticos para explicar la variabilidad, ya que existe o se observa más variación en ellas que en las especies en estado salvaje o natural. Tan sólo pensemos en la diferencia de tamaño y forma entre un perro chihuahua y un perro gran danés: son muy diferentes pero ambos pertenecen a la misma especie, *Canis familiaris*. Lo mismo es cierto o se aplica a las especies salvajes, como los pinzones de las islas Galápagos. Así, las aves que tienen picos grandes y fuertes no sólo pueden comer semillas pequeñas sino también grandes, lo cual significa que pueden alimentarse mejor, vivir más y reproducirse exitosamente.

Para comprobar la variabilidad con fines de experimentación, Darwin se dedicó a la crianza de palomas. Tomaba medidas de sus plumas, huesos, patas, etc., para comprobar que entre ellas no existían dos individuos idénticos. Además de la variabilidad, Darwin tenía que demostrar que las características deben ser transmitidas a la descendencia, lo cual se conoce como herencia. De nuevo la selección artificial llevada a cabo en los animales domésticos fue el ejemplo ideal. Ciertas características importantes que los criadores observaron en sus mejores ejemplares y que deseaban que se siguieran manifestando en las generaciones subsecuentes se lograban conservar. No tenían idea del mecanismo por el cual se llevaba a cabo, pero funcionaba. Ahora sabemos que es gracias a una molécula conocida como DNA, pero entonces, Darwin postuló la existencia de algún tipo de información “empaquetada” en las células germinales, a la cual denominó “gémula”.

Además de la selección natural, de la variabilidad y de la herencia en la descendencia, Darwin, seguramente por influencia de su abuelo Erasmus, extendió su teoría a la aseveración de que todas las especies descendíamos de un ancestro común y denominó este hecho como la “descendencia con modificación”, dando a entender que había existido un evento generador de vida a partir del cual se habían originado y diversificado las especies. Esto conlleva al siguiente y muy importante punto: Charles Darwin nunca escribió ni mencionó que el hombre descendía del mono. Esta idea fue con toda intención mal interpretada por sus enemigos para ridiculizarlo y desacreditar su teoría; incluso dibujaban caricaturas en donde aparece la cabeza y cara de Darwin con el cuerpo en forma de chimpancé. Lo que Darwin dijo muchos años después de la publicación de *El origen de las especies* fue que dado el parecido morfológico que guardamos los hombres con los monos, desde el punto de vista de la anatomía comparativa, deberíamos compartir un ancestro común y, que debido al número tan importante de especies de primates que habitan en África, era muy probable que el hombre se hubiera originado en ese continente. Ahora sabemos que esto también es cierto.

Luego, Darwin sometió a prueba su propia teoría y la comparó con lo que observó en su viaje, principalmente en las islas Galápagos y en las islas de Cabo Verde, en donde los hechos observados no correspondían con la teoría del creacionismo, que mencionaba a un Creador colocando a las especies perfectamente adaptadas a cada lugar; sino que, más bien las especies que observó en las islas se parecían mucho a las que habitaban en la superficie continental más cercana, aunque con algunas diferencias. Notó que en las islas habitaban sobre todo artrópodos terrestres (y marinos también), reptiles y aves. Estas últimas se consideran una especie endémica dado que se desplazan con gran facilidad (volando). Pero, ¿por qué sería que en esas islas no habitaban mamíferos ni anfibios? Quizá porque no podían soportar un viaje tan largo a través del mar, a bordo de ramas o de algún tronco, como lo lograron los artrópodos y los reptiles. Una vez en su nuevo nicho ecológico (lugar con capacidad de ser habitado) encontraron un sitio adecuado para sobrevivir y reproducirse en aislamiento o por separado de la población que les dio origen en la superficie continental. Con el tiempo fueron desarrollando características particulares que finalmente las convirtieron en especies diferentes a las que pertenecían su progenitores continentales.

En suma, el aislamiento geográfico (habitando un nuevo nicho ecológico), la herencia, la variabilidad, la descendencia con modificación, la selección natural y el tiempo daban como resultado una nueva especie derivada de otra preexistente (figura 1–9).

Darwin argumentó adecuadamente su teoría utilizando las herramientas con las que contaba en su época. Sabía también que su argumento sobre la evolución de las especies carecía de otras pruebas que le pudieran dar soporte y, por lo mismo, la debilitaban, convirtiéndola en un blanco fácil para sus enemigos. Una de

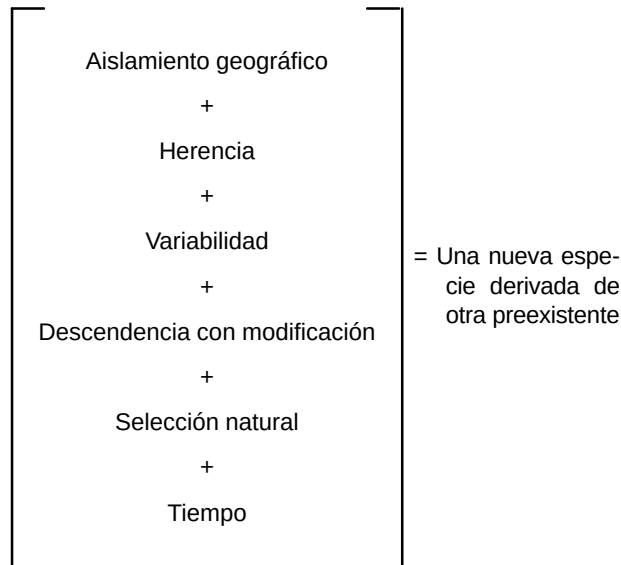


Figura 1–9. Recursos utilizados por Charles Darwin para explicar su idea sobre la evolución, sobre cómo una especie puede originar a otra diferente.

estas carencias era la ausencia de los famosos “eslabones perdidos” o sea, fósiles que representaran la transición lenta, gradual y progresiva de una especie a otra. Pero, aunque en la actualidad los paleontólogos nos han ilustrado con muchas evidencias de este tipo, sabemos también que no necesariamente es así, sino que también algunas especies han mostrado desapariciones o apariciones repentinas.

En esencia, Darwin descubrió una nueva ciencia que en la actualidad se sigue estudiando en los mismos términos que él la utilizó. Y, aunque no le fue posible explicar con claridad todos los mecanismos que tienen que ver en la evolución, siempre permaneció con la mente abierta, escuchando con interés los debates científicos y sometiendo a prueba una y otra vez su propia idea.

Pero, ¿qué fue de su vida personal? Después de circunnavegar el mundo, regresó a Inglaterra, se casó con su prima Emma Wedgwood y procrearon diez hijos. Vivió en su domicilio de Down House y nunca volvió a salir de su país natal, quizá por razones de salud; se cree que padeció la enfermedad de Chagas (tripanosomiasis), que tal vez adquirió en América del Sur al recibir la picadura de un insecto. Su adorada hija Annie fue la única que mostraba gran interés en lo que él hacía y cuando ella falleció Darwin sufrió tremendamente, abandonando cualquier remanente de fe que tuviera en un creador. De cualquier manera, su padre era ateo y sus intentos de unirse al clero fueron exclusivamente para obtener una carrera profesional que le permitiera tener el tiempo y el acceso a las ciencias



Figura 1–10. Charles Darwin. Autor de la revolucionaria idea que cambió la noción que tenía el hombre sobre el lugar que ocupa en la naturaleza.

naturales, aunque, como mencionamos con anterioridad, trató de mantener cierta simpatía con la fe por la única razón de que su esposa Emma era muy devota.

A menudo Charles Darwin fue honrado en vida, pero nunca por la autoría de *El origen de las especies* sino por otros trabajos. La Real Sociedad le otorgó la prestigiosa “Copley Medal” por sus publicaciones de geología, zoología y botánica, y no por sus teorías evolucionistas. La Sociedad Linneana honró a Darwin sin aceptar sus ideas revolucionarias. Nunca se le nombró caballero, aunque a su muerte en Down House, en 1882, se le enterró en la abadía de Westminster, al lado de Isaac Newton (figura 1–10).

REACCIÓN

Las reacciones a la teoría de la evolución no se hicieron esperar. Finalmente, Charles Darwin se armó de valor y le anunció al mundo su teoría. Con toda intención trató de ser lo más cauto e inofensivo posible. Después de su publicación siguió mostrándose modesto y paciente. En su libro *El origen de las especies* (porque escribió varios más) mantuvo a los seres humanos fuera de la consideración de su teoría, a excepción de una referencia en la que sugiere que los mismos principios pueden ser ciertos también para el *Homo sapiens*. En privado sostenía que los seres humanos no podían ser organismos diferentes y quedar al margen del proceso evolutivo.

Recordemos que cuando se expusieron los trabajos de Wallace y Darwin en la Sociedad Linneana no despertaron inquietudes ni sorpresas en la audiencia;

fueron casi invisibles. En cambio, en la publicación de *El origen de las especies* no fue así. El libro se agotó en su primera impresión de 3 000 ejemplares e inmediatamente tuvo que ponerse en marcha la segunda impresión. Algunos dicen que el éxito en su demanda se debió a que las personas no tenían mucho que hacer sino leer, especialmente durante el frío invierno. Sin embargo, como era de esperarse, la reacción fue dramática y las opiniones se polarizaron. Al principio no fue escandalosa, gracias a que Charles Darwin le había dedicado 20 años a la preparación de su público. La polarización en los comentarios a su teoría fue muy clara en los ámbitos social y político, pero a Harriet Martineau (compañera de su hermano Erasmus) le gustó mucho.

El libro nunca se vio sometido a escándalos reprobatorios como el de *Vestigios* o el de la teoría de Lamarck, debido a que, como dijimos antes, consciente o inconscientemente Darwin preparó muy bien a su público. Desde la publicación de sus experiencias en el viaje del *Beagle* construyó una reputación respetable como científico y trató con éxito de mantener esa imagen. Además, al mismo tiempo, cultivó amistades y aliados, muchos de ellos jóvenes ambiciosos de ciencia y conocimiento, y fue amigable con ellos tanto en lo profesional como en lo personal. Les escribía solicitándoles ayuda para recolectar especímenes y resultados de sus estudios, discutían las opiniones y los invitaba a su casa para hacerles sentir que las relaciones iban más allá de lo intelectual y que podían encontrar en él a un verdadero amigo.

Una de esas personas fue Thomas Henry Huxley, apodado por la prensa londinense de la época como “el bulldog de Darwin”. Él constituía la primera línea de defensa a la teoría de la evolución de Darwin y era apenas unos pocos años más joven que Wallace. Huxley se dio cuenta, al principio, de que la teoría de Darwin era lo que necesitaba para conmocionar e incluso derribar a la “vieja guardia” y no tardó en demostrarle a Darwin que definitivamente contaría con él.

La reacción científica (no la emocional) fue diferente. El periódico *Daily News* de Inglaterra fue muy cruel; en otros, como en el *Edinburg Review*, escribió Richard Owen calificando *El origen de las especies* como un “abuso a la ciencia”, lo cual le quitó el sueño a Darwin durante varias noches. Owen logró despertar la crítica de los creacionistas preguntándole públicamente a Darwin si en verdad imaginaba a su progenitores como entes destellantes proviniendo de átomos elementales. Situación que, ahora sabemos, también es cierta.

Adam Sedgwick, el viejo profesor de geología de Darwin, le escribió diciéndole que había leído su libro con dolor más que con placer... que en partes le admiraba pero que en otras lo aborrecía.

Esto no sorprendió a Darwin, ya que sabía lo excepcionalmente estricto que era Sedgwick en cuanto a la publicación de la investigación científica. Recordó las críticas tan intensas y agraviantes que le había hecho al libro *Los principios de geología*, de Lyell.

Sin lugar a dudas, el más acertado de todos fue su ayudante y pupilo Henslow, quien nunca condenó al libro pero tampoco le brindó su apoyo incondicional. Optó por una postura intermedia. Se limitaba a mencionar que el libro se encontraba “en la dirección correcta” pero no podía ni debía considerársele como una teoría sino como una hipótesis. Ciertamente, la idea hipotética de Darwin tenía que comprobarse científicamente y, de lograrlo, entonces pasaría a ser una teoría. Ahora sabemos que la evolución es un fenómeno tan claro y comprobable como la redondez del planeta en el que vivimos, pero para entonces, y según las palabras de Henslow, “le recordaba a la edad de la astronomía antes de Copérnico”.

El debate alcanzó su punto más álgido en una reunión pública de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia (*British Association for the Advancement of Science*) en 1860. Huxley había escuchado que a esta reunión asistiría el obispo de Oxford, Samuel Wilberforce y, aunque al principio consideró el foro demasiado ventajoso o a favor de Wilberforce, tomó la decisión de acudir, aunque preocupado porque era una oportunidad ideal para que Wilberforce expresara la refutación de la iglesia a la idea de la evolución de Darwin.

Thomas Huxley estaba en lo correcto; al final de la reunión, Wilberforce se puso de pie para exponer con todo detalle sus objeciones; al final dijo que él, en lo personal, se sentiría especialmente incómodo al tener que decir que un simio del zoológico bien podría ser su ancestro. Para dar la estocada mortal se dirigió a Huxley y sarcásticamente le preguntó si sus antecedentes simiescos le provenían por parte de su abuela o por parte de su abuelo, a lo que Huxley le respondió que prefería ser el descendiente de una pareja de simios y no un humano con miedo a encarar la verdad de la naturaleza. Thomas Huxley fue muy importante en muchos otros aspectos y no sólo defendiendo a Darwin en los debates científicos. Trató de educar a la clase trabajadora iniciando con una serie de lecturas y presentaciones que lo convirtieron en una persona extremadamente popular. De una manera muy entusiasta aplicó la teoría de la evolución en la política, utilizándola para desmentir cualquier tipo de privilegio divino otorgado por Dios a las clases sociales altas. Huxley estaba ahí para hacerle saber a la clase trabajadora que tenía un lugar importante en el mundo moderno y que debía luchar por obtenerlo.

Fue Thomas Huxley quien otorgó la principal victoria de Darwin sobre Owen cuando, en 1861, llegaron a Londres los primeros ejemplares vivos de gorilas. La extraordinaria similitud entre la anatomía del humano y la del gorila sugería que Darwin estaba en lo correcto. Owen se defendió mencionando que el gorila carecía de una estructura muy importante en el cerebro humano, el hipocampo; pero Huxley le demostró que estaba equivocado.

La teoría de Darwin se vio favorecida por otro descubrimiento. En el mismo año se encontró un fósil en Bavaria al que se le denominó *Archaeopteryx*, un ave ancestral, mitad dinosaurio y mitad ave. Darwin postuló que las aves habían evolucionado a partir de los reptiles, y esta criatura tenía las plumas de un ave pero

la cola y las vértebras de un reptil. Este hallazgo le dio soporte a la aseveración de Darwin acerca de que existían formas intermedias (eslabones perdidos) en la cadena evolutiva, pero que todavía no se habían descubierto.

Por desgracia, no todo era felicidad. Darwin recibió un tremendo golpe por parte del profesor William Thomson, del Oxford College, que posteriormente fue reconocido como Lord Kelvin, quien dio a conocer sus estimaciones sobre la edad de la Tierra. Thomson calculó (basado en cálculos sobre la temperatura) que la Tierra no podía tener más de 100 millones de años. Darwin estuvo en total desacuerdo a pesar de que Thomson había utilizado ciertas características sobre la disipación del calor para llegar a dicha cifra. Antes, Darwin anunció que la evolución había requerido por lo menos 300 millones de años para poderse llevar a cabo. Muchos años después, con la ayuda de la radiactividad, las estimaciones se acercaron más a la cifra de Darwin que a la de Thomson. Ahora se sabe que la explosión cámbrica, época caracterizada por la aparición en los registros fósiles que demuestran los planos corporales que hasta la fecha prevalecen, se remonta a 550 millones de años. Una vez más, Darwin tenía razón.

Charles Darwin escribió *El origen de las especies* con el único propósito de contar con una teoría más plausible que la creacionista. Su meta era demostrar que el mundo que observamos y experimentamos día con día podía ser explicado por la misma naturaleza y no por aparentes diseños caprichosos de una “inteligencia superior”. Al incluir a la mente humana como un producto de la misma naturaleza y no como una gracia divina (como lo seguía postulando Wallace) se ganó la enemistad de muchos de los que antes eran sus protectores. Darwin necesitaba, de manera urgente, encontrar una manera que explicara satisfactoriamente su idea de la evolución, que esclareciera los mecanismos de la herencia, la variabilidad y la selección natural. Aunque imaginó la existencia de las “gémulas” como pequeñas partículas de información generadas en algún órgano o extremidad alterado que pasaban luego a las células germinales (influencia de Lamarck) en forma de moléculas o grupo de moléculas, nunca pudo saber cómo se heredaban las características individuales de cada especie. Continuó pensando, convencido, que la evolución era un fenómeno que se daba de manera gradual, pero nunca lo pudo probar satisfactoriamente.

¿Qué sucedió después? Darwin tuvo un primo de nombre Francis Galton (1822–1911) que le brindó su apoyo en gran medida. Galton era un matemático talentoso que quiso aplicar las matemáticas a la herencia; trataba de medir todo lo medible en el campo de la biología. Comparó desde los índices de mortalidad en los barcos que llevaban misioneros contra los que no los llevaban, hasta las frecuencias de las habilidades humanas. En lo particular, trató de medir la inteligencia mediante el uso de cuestionarios con preguntas diversas (a menudo se le reconoce como el padre de las pruebas para medir la inteligencia) y fue capaz de crear un modelo para la herencia que predecía la influencia de los padres, abuelos

e incluso de la raza en o sobre las características heredadas a los hijos. Como podrá imaginarse, Galton fue un temprano entusiasta de la eugenesia, que es la aplicación del estudio de la herencia al perfeccionamiento de las cualidades de la raza humana.

Francis Galton fue el primero en iniciar la larga tradición de biólogos biométricos, profesionales que utilizan las matemáticas y la estadística para probar y predecir cualquier teoría biológica, que prevalece hasta nuestros días.

Por otro lado, y desde entonces, la tecnología ha sido invaluable para la investigación; incluso en varias ocasiones la tecnología dirige el curso de una investigación. Tal es el caso del microscopio, que para la segunda mitad del siglo XIX continuó mejorando y perfeccionándose, permitiendo el estudio y el examen de animales cada vez más pequeños, de diferentes células y de partes de células. Luego, la introducción de colorantes marcadores (la mayoría provenientes de la industria textil) marcó un gran avance en el estudio de seres tan diminutos. Por ejemplo, Walther Fleming fue el primero en identificar los cromosomas. Lo logró utilizando un colorante llamado cromatina, mismo que al aplicarlo a sus preparaciones microscópicas se fijó al núcleo de las células. Vale la pena aclarar en este momento que las células tienen o están conformadas por diversos componentes, cada uno de ellos con características bioquímicas diferentes, que les permiten, a su vez, fijar algún tipo de colorante, al que se denomina “tinción”. Así pues, cuando Fleming aplicó cromatina a sus preparaciones, notó que se fijó al núcleo celular y a “eso” que se encontraba en el núcleo de las células lo denominó cromosoma. Walther Fleming fue el primero en identificar los cromosomas y realizar una serie de descubrimientos importantes acerca de ellos. A saber, descubrió que absolutamente todas las células (a excepción de los glóbulos rojos de la sangre) tenían cromosomas y que todas las células de los diferentes organismos (individuos) de una misma especie contaban con el mismo número de cromosomas. Además, pudo atestiguar que cuando una célula se va a dividir en dos, entonces los cromosomas se juntan o se aglomeran y es hasta entonces cuando la célula puede dividirse. Él llamó a este proceso mitosis. Incluso llegó a especular, acertadamente, que los cromosomas tenían una función muy importante en la herencia. También sugirió, equivocadamente, que una división o separación desigual de los cromosomas durante la mitosis era el mecanismo mediante el cual surgían las nuevas especies. Sin embargo, las investigaciones de Fleming ayudaron a definir que los mecanismos hereditarios residían, definitivamente en el interior de las células, específicamente en el núcleo celular (figura 1–11).

Otro científico, Leopold Weismann, basándose en los descubrimientos de Fleming, fue todavía más lejos y le asignó a la célula la responsabilidad del mecanismo evolutivo con una arriesgada pero atinada publicación a manera de ensayo en el que especificó la idea de “la continuidad del plasma germinal” y la noción de que las células son inmortales desde el punto de vista de que ellas pasan o heredan

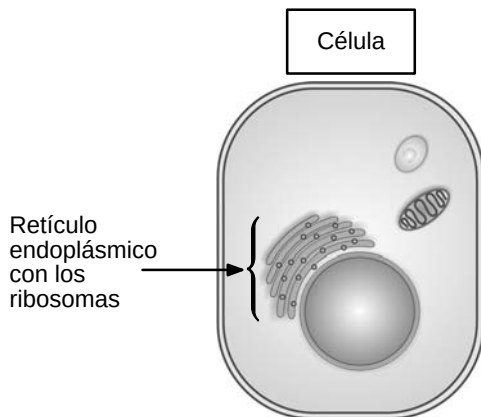


Figura 1–11. Walther Fleming descubrió la cromatina en el interior del núcleo de las células. Sus investigaciones llegaron al punto de lograr definir que los mecanismos hereditarios residían en el interior de las células.

su contenido (cromatina–cromosomas) a las células hijas de manera indefinida. Su pensamiento era impreciso pero correcto. Con estas investigaciones y muchas más, las células empezaron a convertirse en la base y en el modelo de toda la vida; los organismos multicelulares provenían del adecuado funcionamiento de una simple célula. La insistencia, por parte de la comunidad científica, de que la célula era la unidad indivisible de la vida (análoga al átomo en la materia) convirtió a Weismann en un arraigado opositor a la teoría lamarckiana sobre la herencia. Para demostrar que Lamarck estaba equivocado, les cortó la cola a mil seiscientos ratones a lo largo de 22 generaciones y corroboró que ninguno nació sin cola. Es decir, las características adquiridas no se heredaban.

LOS CHÍCHAROS Y LA SÍNTESIS MODERNA

Gregor Johann Mendel nació en Austria en el año de 1822 y falleció en 1884, y fue, por lo tanto, contemporáneo de Charles Darwin, pero nunca se conocieron, a pesar de vivir relativamente cerca: a 1 200 kilómetros de distancia el uno del otro. Fue hijo de una familia campesina e ingresó al monasterio de los agustinos de Brönn (hoy Brno, República Checa), reputado centro de estudio y trabajo científico, no por una verdadera vocación sacerdotal sino por la misma razón que Charles Darwin: podría brindarle una profesión que le permitiera estudiar y enseñar ciencia (figura 1–12). Empezó estudiando lo que más le gustaba: física y matemáticas, disciplinas que posteriormente aplicó con los mismos principios analíticos y rigurosos a sus trabajos sobre biología, principalmente con las plantas.



Figura 1–12. Gregor Johann Mendel (1822–1884). Padre de la herencia y de la genética. Su cuidadosa y estricta metodología en los trabajos de investigación lo llevó a concluir una importante cantidad de conocimientos sobre la herencia, al grado de convertirse en un ejemplo para muchos científicos que le siguieron.

Durante un tiempo estuvo en la Universidad de Viena, donde tomó clases con Franz Unger, un instructor botánico reconocido por haber desarrollado su propia teoría sobre la evolución de las plantas. Él publicó, en 1852, *An attempt of the history of the plant world*, que contiene un capítulo denominado “El origen de las plantas; su multiplicación y el origen de diferentes tipos”, y en él se postula que todas las variedades de plantas se originan a través de cambios ocurridos en las mismas plantas. Incluso menciona que todas las plantas debieron originarse a partir de una planta muy sencilla y ancestral, probablemente un alga.

Regresando con Gregor Mendel, una vez en el monasterio, dedicó gran parte de su tiempo a elaborar un meticuloso registro de las temperaturas diarias, humedad e incluso de la presión atmosférica. Fundó de manera local una sociedad de historia natural y empezó a cultivar plantas de chícharo en el jardín del monasterio. La inmortalidad de Mendel se debe precisamente a sus trabajos sobre las plantas, dado que fue el primero en establecer un nuevo estándar para la realización de experimentos biológicos. No sólo cultivó las plantas, las cruzó y observó los resultados como la mayoría de los científicos lo hacían, sino que estableció una hipótesis, llevó a cabo un experimento y posteriormente analizó los resultados (mecanismo que se utiliza actualmente en toda investigación biológica); al final, sus cuidados y estricta metodología le permitieron concluir y reportar una mayor cantidad de conocimientos sobre la herencia que cualquiera de sus predecesores.

Mendel se dedicó entonces a investigar activamente la variedad, herencia y evolución de las plantas. Llegó a estudiar 28 000 plantas de chícharo y en 1866

publicó su obra más importante, siete años después de que Darwin publicó *El origen de las especies*. La conclusión más importante a la que llegó Mendel fue que “los elementos”, como él los denominó (recordemos que para entonces no se conocían los genes), se expresan en carácter de dominantes o en carácter de recesivos. Cultivó una raza pura de planta de chícharo de tallo largo y una raza pura de planta de chícharo de tallo corto. Luego decidió cruzarlas y observó que después de ciertas generaciones y de manera insistente, tres cuartas partes de las plantas descendientes mostraban carácter de tallo largo y un cuarto de la descendencia mostraba el carácter de tallo corto. De esta importante observación dedujo, con acierto, que los elementos hereditarios (posteriormente conocidos como genes) se agrupan en pares de dos tipos (o alelos): AA , Aa , aA , y aa ; donde A significa carácter dominante y a significa carácter recesivo. De ahí que la combinación AA resultara tallo largo, al igual que las combinaciones híbridas Aa y aA , y, que la combinación aa resultara en tallo corto. Lo anterior explicaba por qué al cruzar AA con aa daba como resultado una relación de 3:1 en la descendencia a favor del tallo largo, o sea, el dominante (figura 1–13).

Mendel murió sin tener la más remota idea de la trascendencia de sus trabajos, pues su obra fue pionera en un campo totalmente nuevo en lo correspondiente a las ciencias biológicas: el campo de la herencia y de la genética.

A Mendel le siguieron dos científicos que utilizaron sus conclusiones para apoyar la idea que cada uno de ellos tenía respecto a la evolución. Walter Weldon, biólogo matemático, fue uno de ellos, e insistía incansablemente en la aplicación de las ciencias exactas y, por ende, en el análisis estadístico en la investigación de las ciencias naturales. Realizó estudios evolucionistas en miles de cangrejos y apoyaba la idea de que la evolución de las especies se llevaba a cabo de manera gradual, que las especies cambiaban poco a poco, lentamente, para dar origen a una nueva. El otro, de nombre William Bateson, era más bien naturalista y muy apático para las matemáticas. Decía que los análisis estadísticos no eran necesarios para el estudio de una ciencia inexacta como lo era la biología. Bateson expe-

	AA	aa
AA	AA	Aa
aa	aA	aa

Figura 1–13. Al cruzar a las plantas de tallo largo (AA) con las de tallo corto (aa) la descendencia mostraba una relación de 3:1 a favor del tallo largo, por lo que Mendel llegó a la conclusión de que para entonces los desconocidos genes se agrupaban en pares (alelos) donde uno era el dominante (A) y el otro era el recesivo (a).

rimentó con moluscos y estaba seguro de que las especies no evolucionaban de manera gradual sino dando “saltos” de manera brusca. Apoyaba la idea de que las especies aparecían de manera súbita. A esta corriente de pensamiento evolutivo se le denominó “saltacionista” (contrario al gradualismo); lo interesante del caso es que tanto Weldon como Bateson interpretaban los trabajos de Mendel a su conveniencia, lo cual propició que se librara una batalla campal entre ambos durante toda su vida. Nunca llegaron a un acuerdo. Weldon murió en 1906 y para 1921 William Bateson al fin aceptó que las matemáticas eran útiles para el análisis de las investigaciones científicas en el campo de la biología; pero el debate entre gradualistas y saltacionistas continuó durante muchos años más. La solución para ambos fue evitar hablar mucho del tema.

El gran perdedor de esa contienda fue el concepto de selección natural propuesto por Charles Darwin. Su idea innovadora y esencial para explicar la evolución cayó en el olvido durante algunos años. Más que a la selección natural, se le prestó atención a los mecanismos mediante los cuales trabajaba la herencia. Sin embargo, como veremos más adelante, no se perdió mucho de lo ganado con anterioridad.

Con William Bateson, promoviendo enérgicamente el modelo de la herencia de Mendel, la genética empezó a despegar.

Hugo de Vries (1848–1935) fue un botánico holandés que nació en Haarlem y murió en Lunteren. Además de ser profesor de botánica en Amsterdam dedicó gran parte de su tiempo al estudio de la fisiología de las plantas. Cultivó 50 000 plantas de onagra (*Oenothera biennis*), de donde se extrae el aceite de onagra para fines medicinales, a la cual también se le llama primula o hierba del asno. El caso es que con ese cultivo produjo 800 plantas con características tan novedosas, que concluyó que se trataba de especies diferentes. Las consideró mutantes y escribió *The mutation theory* (*La teoría de la mutación*), donde introdujo el término *mutación*, que impulsaría de manera muy importante el desarrollo de la genética. Dicho sea de paso, una mutación es un cambio heredable en el material genético de una célula, un cambio en la secuencia de las bases nitrogenadas que componen el DNA de un organismo. Entonces, bajo la influencia de Bateson y de Hugo de Vries, la balanza se inclinó a la corriente del pensamiento saltacionista que indica que las nuevas especies aparecen de manera súbita y no gradual. Rápidamente se aceptó que el mecanismo de la mutación era el responsable de que una especie diera origen a otra especie diferente.

Ahora es el turno del biólogo estadounidense Thomas Hunt Morgan, mejor conocido entre sus amigos como “el cazador de moscas” (por Hunt, del inglés *hunter*, *cazador*), que nació en Lexington, Kentucky, en 1866, y murió en 1945 (figura 1–14). En 1907, Morgan tuvo la oportunidad de visitar el jardín experimental de Vries, en Amsterdam, y resultó tan impresionado que, aunque había sido entrenado en biología del desarrollo, decidió cambiar de giro y dedicarse al estudio



Figura 1–14. Thomas Hunt Morgan (1866–1945), “el cazador de moscas”, descubrió que los elementos de la herencia (después denominados genes) eran transmisores de los caracteres hereditarios y que se disponían en forma lineal a lo largo de los cromosomas.

de la herencia. Morgan era un escéptico de la teoría mendeliana sobre la herencia, así que decidió experimentar y ver, con sus propios ojos, lo que Mendel había publicado en 1866, el año en el que él nació. Se le ocurrió la brillante idea de trabajar con la mosca de la fruta, cuyo nombre científico es *Drosophila melanogaster*, que quiere decir “amante del rocío con el abdomen negro”. En su famoso cuarto de las moscas en la Universidad de Columbia, que medía apenas 5 por 3 metros, vivían miles de moscas encerradas en botellas de leche, alimentadas con plátanos y con unas bombillas eléctricas, que funcionaban como incubadoras. Si usted desea conocer la historia de Thomas Hunt Morgan y su cuarto de las moscas, le recomiendo la lectura del libro: *Tiempo, amor, memoria. En busca de los orígenes del comportamiento*, escrito por Jonathan Weiner.

Las moscas resultaron ser perfectas para los estudios e investigaciones de Morgan. Nacen, crecen y se reproducen en un lapso corto; en aproximadamente diez días cumplen con su ciclo de vida, además sólo tienen cuatro cromosomas.

Aun así, ansioso y frustrado, Morgan tuvo que esperar dos años para que apareciera, estudiara y observara a la primera mosca mutante que perteneció al sexo masculino; una mosca con ojos blancos obtenida gracias a los intensos trabajos de su asistente. La siguiente mosca mutante también fue macho, pero ésta tenía las alas muy cortas. En total, Morgan obtuvo 26 mutaciones y todas aparecieron en moscas del sexo masculino, entonces las identificó como mutaciones ligadas al sexo.

Conforme Morgan iba coleccionando estas moscas mutantes y cruzándolas entre sí, empezó a darse cuenta de algunas cosas muy extrañas. Por ejemplo,

cuando cruzaba a las moscas mutantes entonces reaparecían las mismas mutaciones en las moscas descendientes, pero no siempre. Morgan tenía conocimiento de algunos estudios de biología celular que afirmaban la existencia de un proceso que se llevaba a cabo en la división celular y que se conoce como meiosis. La meiosis consiste en que los cromosomas llevan a cabo una serie de acciones previas a la división celular. Esto es, antes de que una célula se divida, los cromosomas se unen en parejas, se enrollan o se tuercen uno con otro, se entrecruzan y luego se separan. Morgan sugirió, entonces, que dicho entrecruzamiento cromosómico era el responsable y explicaba el hecho de que las hijas o descendientes de algunas moscas mutantes no lo fueran. Y así, la característica cromosómica que se manifestaba en una mosca progenitora, como los ojos blancos o las alas cortas, podía desaparecer al azar en las moscas hijas durante la meiosis. Insistió además, y con mucha razón, en que las mutaciones se encontraban en los cromosomas y que durante el entrecruzamiento cromosómico podían separarse y, por ello, no expresarse en las células hijas. Morgan continuó experimentando y finalmente concluyó, en contra de su escepticismo, que los cromosomas se comportaban de manera similar a como Mendel creía que se segregaban y apareaban de manera aleatoria los genes o “elementos”. Los trabajos de Morgan fueron más refinados, pero esto no le restó ningún crédito a Mendel ni a su teoría mendeliana. Morgan siguió con el estudio de los cromosomas de las moscas y descubrió también que los “elementos de la herencia”, que después se denominaron genes, eran en definitiva los transmisores de una gran variedad de caracteres hereditarios y que se disponían en forma lineal en cada uno de los cromosomas. Incluso Morgan y sus colaboradores crearon mapas cromosómicos lineales en los que a cada gen se le asignaba una posición específica. Este trabajo originó la obra *El mecanismo de la herencia mendeliana*, publicada en 1915, un libro muy influyente que representó un importante paso en el desarrollo de la genética moderna. Thomas Hunt Morgan, “el cazador de moscas”, recibió el premio Nobel en fisiología y medicina en 1933.

Regresemos a Gran Bretaña, donde Bateson estaba realmente impresionado por el trabajo de Morgan y, enterado de todos esos descubrimientos, sugirió que si ya se tenía conocimiento de una entidad física, unidad responsable de la herencia, entonces había que darle un nombre. Propuso el término “gen”, haciendo alusión a las gémulas de Darwin, y a la nueva ciencia encargada del estudio de los genes la denominó *genética*.

Un gen es una secuencia lineal de partículas químicas (conocidas como nucleótidos o bases nitrogenadas) dispuestas ordenadamente a lo largo de un cromosoma, que es esencial para llevar a cabo una función específica y que puede contribuir al desarrollo de un organismo o para el mantenimiento de la fisiología celular. Además, en su libro *Mendel's principles of heredity*, Bateson especuló que algunas enfermedades de los seres humanos podían tener bases hereditarias. Mencionó en particular la alcaptonuria, enfermedad caracterizada por una orina

que se vuelve oscura con la exposición al aire y el desarrollo de artritis en la edad adulta; supuso que estaba ocasionada o que tenía su origen en la genética mediante una desfavorable combinación de genes recesivos. Dicho libro fue leído por el médico Archibald E. Garrod, que estaba evaluando a una pareja de primos con dicho padecimiento y concluyó que la especulación de Bateson era cierta y que estaba en lo correcto. El médico Garrod postuló la hipótesis de que la alcaptonuria estaba causada por un defecto en una enzima específica. Hay que mencionar que las enzimas son proteínas que tienen la capacidad de catalizar (acelerar) reacciones químicas en todos los seres vivos y muchas veces son producidas por algún gen en particular. Garrod acuñó también una frase que actualmente se usa para referirse a un grupo de enfermedades representadas por un defecto genético simple que afecta la formación de ciertas proteínas: “errores congénitos del metabolismo”.

Como vemos, en sólo 50 años la ciencia cambió de lo que parecían milagros a la bioquímica. Este cambio tuvo una repercusión muy profunda; los seres humanos dependían de los mismos materiales y mecanismos biológicos que todas las plantas y animales del planeta. Afortunadamente, el hecho de que estos descubrimientos trajeran consigo algo prometedor para el bienestar de la humanidad suavizó un poco dicho impacto.

La genética se puso de moda. Se convirtió en un campo científico de gran interés. Se publicó un gran número de estudios que daban solución a muchos de los problemas citados por Bateson. Los genetistas se manifestaban confiados de tener, si no todas, la mayoría de las respuestas. Para ellos, las ideas de Darwin sobre la selección natural y el gradualismo eran tan obsoletas como el creacionismo. Los genetistas habían logrado observar y contemplar con sus propios ojos lo que las mutaciones en los genes eran capaces de hacer. Se pensaba entonces que la mutación era la única fuerza creativa de la evolución.

Era tiempo de una urgente reconciliación con la selección natural. El primer voluntario para lograrlo fue llamado Ronald A. Fisher (1890–1962), un biólogo, matemático y estadista de la Universidad de Cambridge, que decidió aplicar el modelo estadístico a la evolución porque tenía la intuición de que la herencia mendeliana podía ser consistente con la selección natural de Darwin. Decidió construir un modelo que demostrara que la mutación no era la única fuerza creativa de la evolución. Después de trasladar sus investigaciones estadísticas al campo de la genética encontró que, efectivamente, las poblaciones retenían la variación genética necesaria para poder evolucionar. La famosa variación tan requerida por la teoría de Darwin se empezaba a satisfacer. A este modelo biológico matemático o biométrico se le adjuntó otro desarrollado por Sewall Wright (1889–1988), en Estados Unidos, quien logró demostrar que el medio ambiente (geografía, clima, etc.) era un factor importante que influía en el cambio observado en las especies con el transcurso del tiempo. Ambos modelos reestablecían la función de la

selección natural en la evolución. Un tercer estudioso, J. B. S. Haldane (1892–1964), utilizó sus modelos matemáticos para demostrar que la evolución se podía presentar a partir de las variaciones, de antemano presentes, en las poblaciones. La mutación desempeñaba, entonces, una función importante pero no determinante, contrario a lo que proponían los genetistas.

Finalmente, como era de esperarse, la polémica entre variación, selección natural y mutación se resolvió en las décadas de 1920 y 1930, cuando se demostró que los caracteres hereditarios cualitativos dependen de la herencia mendeliana y que un carácter hereditario viene dado por el efecto de varios genes. Se demostró matemáticamente (cómo le hubiera gustado a Charles Darwin saber esto) que la selección natural, actuando de forma acumulativa sobre pequeñas variaciones, puede producir cambios importantes. Los trabajos de Ronald A. Fisher, Sewall Wright y J. B. S. Haldane contribuyeron al rechazo del mutacionismo (tendencia a pensar que la principal fuerza de la evolución es la mutación genética) y brindaron una estructura teórica para la integración de la genética con la teoría de Darwin acerca de la selección natural.

Mientras todas las investigaciones y debates científicos mencionados se llevaban a cabo, el ejemplo clásico de selección natural se daba lugar frente a las narices de los científicos de la Gran Bretaña. Lo más sorprendente con respecto al melanismo industrial, que así es como se le llamó a este hecho, no es que se llevó a cabo en el transcurso de cincuenta años, sino que tomó el mismo tiempo para comprobarse.

En 1848, una década antes de que Darwin publicara *El origen de las especies*, un recolector y coleccionista del mundo natural encontró la primera y nunca antes vista ni registrada polilla de abedul (*Biston betularia*), de color negro o melánica, cerca de Manchester, Inglaterra. Para entonces, Manchester se había convertido en una ciudad altamente industrializada; el aire, los edificios y los árboles se habían ennegrecido por el hollín de las fábricas que quemaban carbón. En sólo 40 años, casi todas las polillas de abedul de Manchester y zonas industrializadas eran negras o melánicas. O sea que habían incrementado su población de manera exponencial.

Lo mismo sucedió con 80 especies de mariposas y otras especies de polillas. Todas adoptaron una coloración oscura al vivir en zonas contaminadas. Las polillas y las mariposas de las zonas rurales mantenían sus colores claros.

Después de muchas hipótesis y suposiciones, hasta 1955 el biólogo H. B. D. Kettlewell desarrolló, con el hecho de la polilla mencionado con anterioridad, la primera prueba de selección natural ocurrida en la naturaleza. Él capturó, marcó y recapturó polillas para poder monitorear de cerca sus índices de supervivencia. Luego observó a las aves de manera sistemática y estuvo midiendo, o mejor dicho contando, el número relativo de polillas negras y claras que las aves comían, y comparó los índices de depredación entre las regiones rurales y las industrializadas. Encontró que las aves preferían comer dos a tres veces más polillas claras

en las zonas industrializadas, en las que los árboles habían ennegrecido y, por otro lado, dos a tres veces más polillas negras en las áreas rurales. La explicación era sencilla: en un principio las polillas oscuras eran escasas porque en un ambiente rural y libre de contaminación eran vistas fácilmente por las aves depredadoras; pero después, cuando los árboles y las paredes de las edificaciones se ennegrecieron con el hollín, entonces las polillas claras que se posaban sobre estas superficies eran más fácilmente identificadas que las oscuras, que quedaban camufladas por el fondo negro. El resultado fue que las polillas oscuras incrementaron en gran medida su población. Esta observación apoyó la idea de la selección natural propuesta por Charles Darwin.

Es difícil decir con exactitud cuándo fue el momento en el que resurgió el concepto de la selección natural como una fuerza importante para el desarrollo de nuevas especies, pero a esta nueva o renovada corriente de pensamiento se le llamó “la síntesis moderna” o “la teoría sintética de la evolución”.

Así pues, la teoría sintética de la evolución se apoya en la teoría darwiniana de la selección natural, en los conocimientos de la genética y en el tratamiento matemático de la dinámica de poblaciones.

La selección natural regresó a ocupar un lugar importante gracias a los persistentes argumentos de personas como Haldane y Ernst Mayr, y la reconciliación con la genética se logró por los trabajos del nieto de T. H. Huxley, Julian Huxley.

Los trabajos clave para la teoría sintética de la evolución son: *Evolution: the modern synthesis*, de Julian Huxley, y *Genetics and the origin of species*, de Theodosius Dobzhansky.

En 1937 apareció la obra de Theodosius Dobzhansky. Desde *El origen de las especies*, de Charles Darwin, no había existido una publicación que impulsara de tal modo los estudios sobre la evolución. Dobzhansky logró comprender y sintetizar todo el material acumulado en las distintas disciplinas biológicas dedicadas al estudio de la evolución. No más debates. No tenía por qué inclinarse la balanza necesariamente a la genética o al medio ambiente. Los dos eran importantes, y reunió las orientaciones del darwinismo clásico y de la genética experimental.

El término de *síntesis evolutiva* designa a todo un consenso erigido sobre la conclusión de que la evolución de las especies se puede explicar mediante la aparición de pequeños cambios aleatorios (mutaciones) genéticos y su ulterior criba por la selección natural.

Ahora sólo faltaba un componente para que la síntesis quedara completa, la falta de continuidad en los registros fósiles que siempre había preocupado a Darwin. Esta falta de continuidad en los fósiles se refiere a la ausencia de “eslabones perdidos” entre la evolución de una a otra especie; no se contaba con la pruebas fósiles de un proceso gradual evolutivo, carencia que seguían utilizando los detractores de Darwin para desacreditar su teoría. Los fósiles rara vez mostraban formas de transición (el *Archaeopteryx* era una excepción) y todo parecía indicar que los

organismos persistían por largos periodos de tiempo sin cambiar. La balanza se inclinaba al pensamiento saltacionista y no al gradualismo como Darwin lo había predicho. En su libro *El origen de las especies* Darwin trató de encontrar alguna explicación a la falta de estos registros fósiles y argumentó que el registro estaba incompleto, que las formas de transición entre una y otra especie no se habían descubierto o que no estaban clasificadas adecuadamente. También hizo saber que los fósiles se forman bajo condiciones inusuales y muy especiales, de ahí la carencia de muchos de ellos. Hasta en esto tuvo razón. Ahora se cuenta con una gran variedad de formas de transición porque se descubrieron y clasificaron correctamente. Además, fue acertado en su hipótesis de que las condiciones ambientales que tienen que presentarse para que un cadáver se fosilice son poco frecuentes, más bien raras. Así que, volviendo a la síntesis y a la falta de pruebas fósiles que le dieran soporte a la teoría de Darwin, podemos decir que mientras los estudios en genética contribuían a solidificar que la idea de la evolución fuera aceptada (por aquello de las mutaciones), la carencia de fósiles en la paleontología se veía en la imposibilidad de aceptar la idea de que los cambios se dieran de manera gradual.

Fue entonces cuando el científico estadounidense George Gaylord Simpson se preocupó para que la paleontología se uniera a la síntesis y, utilizando los modelos de Fisher, Wright y Haldane, demostró que efectivamente el registro fósil era consistente con el nuevo modelo del darwinismo. La teoría de Darwin sobre la selección natural empezaba a tomar un nuevo auge, pero, aun así, la creencia de que a la evolución la caracterizaba una naturaleza gradual continuaba enfrentando retos. La especiación o la formación de nuevas especies a partir de otras preexistentes era difícil de entender para la mayoría como un fenómeno gradual.

Fue unos años después cuando H. Harris, en Inglaterra, y Richard Lewontin, en Estados Unidos, utilizaron una tecnología conocida como electroforesis de proteínas para demostrar que en miembros de una misma especie se podía apreciar una variabilidad genética.

Estos resultados forzaron a los genetistas a pensar de una manera totalmente diferente. Así, en lugar de creer que los genes eran un factor determinante e inmodificable para la apariencia externa o fenotipo de los organismos, más bien tendrían que pensar que los genes interactuaban entre ellos y conformaban así a un organismo. En pocas palabras, se logró probar que en miembros de una misma especie existe la variabilidad o la variación genética necesaria sobre la cual puede actuar la selección natural.

Se consolidaba así la reconciliación con la idea de Darwin. Después de un siglo se pudo hacer evidente, de manera irrefutable, que efectivamente la especiación era un fenómeno secundario a la herencia, a la descendencia con modificación, a la variabilidad, a la selección natural y al hecho de que la vida de la Tierra era lo suficientemente larga como para que se diera el fenómeno evolutivo, tal y como lo había imaginado.

SECUELAS

Existe una frase que ha acompañado a la teoría de la evolución a lo largo de su historia: “supervivencia del más apto”. Curiosamente, no es una frase pronunciada por Charles Darwin (por lo menos en la primera edición de su libro), sino por Herbert Spencer (1820–1903), un defensor y popularista de la teoría de la evolución de Darwin. Spencer fue el primero en aplicar las teorías de Darwin en el campo de la sociología. De hecho, fue biólogo y sociólogo. Desde entonces, la frase “supervivencia del más apto” ha impulsado la interpretación más oscura y no deseada de la idea de Darwin: el darwinismo social. Herbert Spencer había publicado su propia teoría de la evolución, pero fue rechazada por la mayoría de los científicos de la época, ya que se parecía mucho a las ideas de Lamarck y utilizaba un modelo lineal, no ramificado, para explicar la evolución de las especies, cuando la mayoría ya había adoptado el modelo de árbol genealógico propuesto por Darwin. A pesar de esto, Spencer seguía siendo un escritor y filósofo respetado. Desde el punto de vista de Spencer, si la teoría de la evolución se aplicaba en la naturaleza, entonces también debía aplicarse en la humanidad; decía que el hombre y la sociedad podían ser mejores si se les permitía luchar entre sí por sobrevivir, en la misma forma en la que los organismos lo hacen de manera natural. Esta lucha tendría como resultado una mejora en los supervivientes, pero no en el resto, que serían removidos. Decía también Spencer que los programas de beneficencia social resultaban contraproducentes porque estaban dirigidos a promover la supervivencia del más pobre, del retrasado mental y de muchas otras personas imperfectas. Él escribió: “si son lo suficientemente completos para vivir, vivirán, y está bien que deban vivir. De lo contrario, si no están lo suficientemente completos para vivir, entonces morirán, y es mejor que deban morir”. Esta grave falta sociológica fue aceptada y utilizada para justificar una gran cantidad de injusticias sociales. Ayudó a justificar el colonialismo británico en todo el mundo y contribuyó a desequilibrar la distribución del bienestar social.

El darwinismo social se define, pues, como el concepto de que la sociedad humana se rige por las mismas leyes de competencia agresiva que rigen la naturaleza.

A pesar de que la balanza se inclinaba al pensamiento evolucionista de Charles Darwin, Spencer seguía convencido de que Lamarck tenía razón, y de que las mejoras adquiridas podían ser heredadas; tan convencido estaba que aseguraba: “la gente pobre, que trabaja duro y se supera, tendrá hijos mejorados gracias a la herencia”. Para entonces estaba por finalizar el siglo XIX, y gracias a los trabajos del citólogo Weismann, el que trabajó cortándoles la cola a las ratas, las prescripciones o consejos sociales de Spencer empezaron a desvanecerse. De cualquier modo, la influencia del darwinismo social ya se había divulgado. El resultado fue la *eugenesia*, término acuñado por el primo hermano de Darwin, Francis Galton, que significa *bien nacido* (o nacido bien); debido a que Galton tenía una fuerte

inclinación por la biométrica se interesó en la medición de la inteligencia y del talento. Se le considera el padre de las pruebas para medir el coeficiente intelectual (IQ). Galton se percató de que en su misma familia corría una tendencia al genio biológico (refiriéndose específicamente a Erasmus y a Charles Darwin), así como el genio musical y el genio legal se manifestaban en otras. Concluyó entonces que debería existir una base hereditaria para estas y muchas otras aptitudes y vocaciones. Trató, sin resultados favorables, de calcular fórmulas que pudieran predecir la transmisión de dichas características, pues, para él, el factor más importante de la inteligencia era el genético, mucho más que el ambiental.

La eugenesia empezó a despertar el interés de muchos científicos en varios países. Ernst Heinrich Haeckel (1834–1919), en Alemania, fue uno de los científicos que le dieron mayor soporte a la teoría de Darwin; de hecho, a través de sus conferencias y escritos se encargó de popularizar la obra de Charles Darwin en el mundo de habla germana. Sin embargo, llegó por su propia cuenta a conclusiones muy peligrosas que analizaremos más tarde, pero vale la pena recordarlo porque fue un biólogo talentoso dedicado en gran medida al estudio de la embriología. Inventó la palabra ecología para referirse al equilibrio de la naturaleza; aunque también, como dijimos antes, llegó a conclusiones disparatadas. A Haeckel se le recuerda en el ámbito de la biología por su famosa frase: “la ontogenia recapitula a la filogenia”, donde ontogenia es el estudio del desarrollo del individuo (de cualquier especie), refiriéndose especialmente al periodo embrionario; y filogenia es la parte de la biología que se ocupa de las relaciones de parentesco entre los distintos grupos de seres vivos y, desde el punto de vista de la biología, se encarga de estudiar el origen y el desarrollo evolutivo de las especies. Lo que quiso decir con esa frase es que mientras el embrión se desarrolla pasa a través de diferentes momentos, mismos que representan a organismos inferiores. Así, tanto las aves como los mamíferos desarrollan agallas (hendiduras branquiales), al igual que los peces en algún momento mientras son embriones, aunque en un futuro de la vida embrionaria se degeneran y desaparecen (figura 1–15). En otras palabras, argumentó que las etapas embrionarias de un animal recapitulan la historia de su evolución, y que, por lo tanto, la ontogenia reproduciría a la filogenia. De nuevo, la ontogenia se refiere a los procesos que se llevan a cabo en un ser vivo, desde el huevo fecundado o cigoto hasta el organismo adulto, aunque en el pensamiento de Haeckel se limitaba al embrión maduro; y, filogenia se refiere a la transformación histórica evolutiva de las especies. A partir de esta filosofía Haeckel desarrolló lo que llamó la “ley biogenética”, con la cual daba a conocer que todo, en biología, seguía un patrón de desarrollo lineal y progresivo hasta llegar al organismo perfecto que era el hombre (al mejor estilo aristotélico), no a la mujer, quien ocupaba un lugar atrás del hombre, junto a los niños de tez blanca. Luego seguían hacia atrás los de raza negra y después los de apariencia simiesca. Dicha escala lineal con sentido retrógrado la aplicaba también a las culturas y a

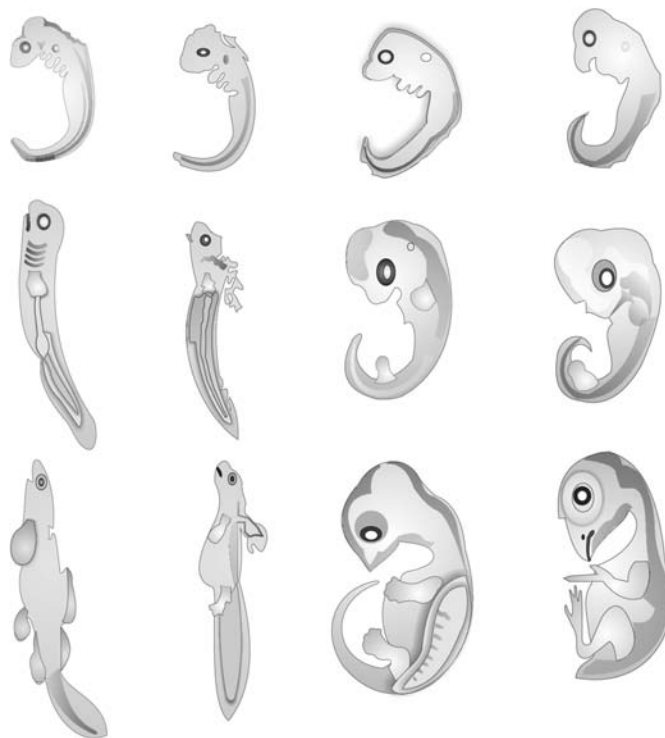


Figura 1–15. Según Haeckel, la ontogenia recapitula a la filogenia. En estos dibujos quiso representar que todos los organismos pasamos en un momento dado del desarrollo embrionario por una fase en la cual somos muy parecidos.

las especies, colocando a la raza blanca del norte de Europa (con todo y su cultura) en la cima de las adquisiciones evolutivas. Ni siquiera la religión escapaba a su ley biogenética y clasificaba al judaísmo en un paso o estado embriológico previo al cristianismo. Incluso mencionaba que otras razas y culturas habían quedado paralizadas en un estado muy prematuro del desarrollo embrionario.

La ley biogenética de Haeckel nunca fue aprobada y nunca fue aceptada por el mundo científico, ni siquiera antes de que fuese escrita.

Karl Ernst von Baer (1792–1876), naturalista y embriólogo estonio, ya les había comunicado a los científicos que los embriones de especies diferentes comparten ciertas características y similitudes en algún momento del desarrollo y que ninguno de esos momentos representaba un estado maduro. En efecto, en su desarrollo, los embriones pasan por momentos en los que sus formas son muy similares a los de otras especies, por ejemplo las branquias y la cola, pero no había una progresión o continuidad en dicha observación, sino sólo estadios comunes y

parecidos; por el contrario, todos los embriones de todas las especies se van especializando conforme alcanzan su madurez. Veamos, hay un momento en el desarrollo de un embrión humano en el que se pueden observar unas estructuras en el cuello que son muy parecidas a las branquias de los peces y que se denominan hendiduras y arcos branquiales. Sin embargo, lo anterior no quiere decir, de ninguna manera, que si se interrumpe el desarrollo embrionario del humano en esta fase o etapa del desarrollo del embrión entonces se origine un pez. No, sino que normalmente algunas de estas hendiduras continúan su desarrollo y algunas de ellas llegan a formar estructuras anatómicas, como el conducto auditivo externo, mientras que otras simplemente desaparecen conforme el embrión alcanza la madurez. Su persistencia da origen a malformaciones anatómicas congénitas que después del nacimiento deben ser corregidas. Una de ellas se conoce como “quistes branquial” y se manifiesta como una bola o tumor en el cuello que se infecta durante la vida temprana (infancia y adolescencia principalmente) de manera recurrente.

A pesar de que Haeckel estaba en un error, sus ideas fueron aceptadas y se hicieron muy populares, especialmente entre los hombres europeos. Haeckel devolvió la vida de las “razas inferiores”, incluida la religión judía; abogaba porque Jesús no era judío, ya que su pensamiento era “muy avanzado”; según Haeckel, él mismo tenía que haber sido descendiente de un soldado romano (claro, de ascendencia alemana y no menos). Con estos antecedentes, no debe sorprendernos que Hitler adoptara las recomendaciones biológicas de Haeckel parafraseándolo en las discusiones racistas de su libro *Mi lucha*.

Alemania no fue la única nación que se enfrascó en esta nueva “ciencia” utilizándola con fines políticos y religiosos. Estados Unidos seleccionaba a sus inmigrantes basándose exclusivamente en lo que se lograba percibir de su potencial genético. Incluso practicaban la esterilización selectiva, al igual que en Suiza y Dinamarca. En Estados Unidos esterilizaban a ciudadanos pobres, criminales y borrachos. Los inmigrantes del sur de Europa, de África y de Asia tenían que vencer una serie de dificultades impuestas por las autoridades migratorias. Pero, desde luego, la extensión más horripilante de la eugenesia fue el holocausto. Hitler inició con la purificación genética, no sólo mediante la esterilización sino con algo mucho peor: la eutanasia en las personas con retraso mental. En muy poco tiempo amplió su clasificación de indeseables y degenerados incluyendo a todo aquel que no perteneciera a la raza aria, esto es, judíos, gitanos y todos los que llevarán una vida “inconveniente”, según su juicio, como los homosexuales.

Actualmente, y gracias a un mejor entendimiento de los mecanismos de la herencia, para nosotros es muy fácil clasificar estos hechos no sólo como crueles sino como ridículos. Pero para entonces la genética era una ciencia novedosa, inexacta; y con esto no tratamos de justificar algún hecho histórico, sino de entender la situación que entonces se vivía. Hay que comprender, por ejemplo, que se

tenían algunas deficiencias básicas en el entendimiento de los genes, como el hecho de que los científicos siguieran creyendo que los organismos éramos en exclusiva producto de los genes.

Lamentablemente, el darwinismo social cumplió su cometido y la ciencia de la evolución adquirió un lado oscuro que sigue conmocionándonos hasta la fecha, a pesar de algunos esfuerzos frustrados, como el del eugenésico Müller, asistente de Morgan (el cazador de moscas), que intentó enfocar la eugenesia al bienestar y la salud con la intención de reconciliarla con la ciencia; pero desafortunadamente la eugenesia se enfocó al racismo y adquirió un tono malévolo.

Después de todo, y de cualquier manera, la teoría de la evolución hizo lo que tenía que hacer: energizó la investigación y le dio trabajo a una gran cantidad de científicos en muchas y muy diversas direcciones, además de entusiasmarlos para llevar a cabo un sinnúmero de aventuras.

UNA NUEVA GRAN SÍNTESIS

Algunos científicos se tornaron naturalistas y se dedicaron a estudiar organismos en su hábitat natural, en sus poblaciones y sus comunidades. Otros se volvieron reduccionistas y se dedicaron a disecar la biología a su mínima expresión: la de las moléculas orgánicas. Se crearon nuevos campos de estudio, como la genética y la biología molecular, disciplinas que han propiciado éxitos en la biología y en la medicina, así como grandes avances en el estudio de las ciencias básicas.

Uno de los científicos impulsados por la corriente filosófica de la nueva biología, o biología moderna, fue Francis Harry Compton Crick (1916–2004), biofísico británico, que tuvo la inquietud de tratar de demostrar con los principios de la física y de la química algunos de los fenómenos considerados “misteriosos”. En uno de los formatos que tuvo que llenar como parte de los requisitos para ingresar como investigador en Cambridge escribió: “un campo en particular excita mi interés. Se trata de la línea que divide a la vida de lo carente de ella, de la materia inerte, por decir algo: el estudio de las proteínas, los virus, las bacterias y la estructura de los cromosomas”.

Al entrar en Cambridge se enfocó en el estudio del DNA que, para entonces se sabía que era la molécula responsable de la herencia y que conformaba los cromosomas. Allí conoció al genetista James Dewey Watson y a Rosalind Franklin y Maurice Wilkins, una pareja de científicos dedicados a trabajar en cristalografía con rayos X, y todos formaban parte de un mismo equipo dedicado a la investigación del DNA (figura 1–16). Para entonces se enfrentaba una competencia formidable para ver quién era el primero en describir la conformación atómica tridimensional de la molécula de DNA. Linus Pauling, bioquímico del Instituto

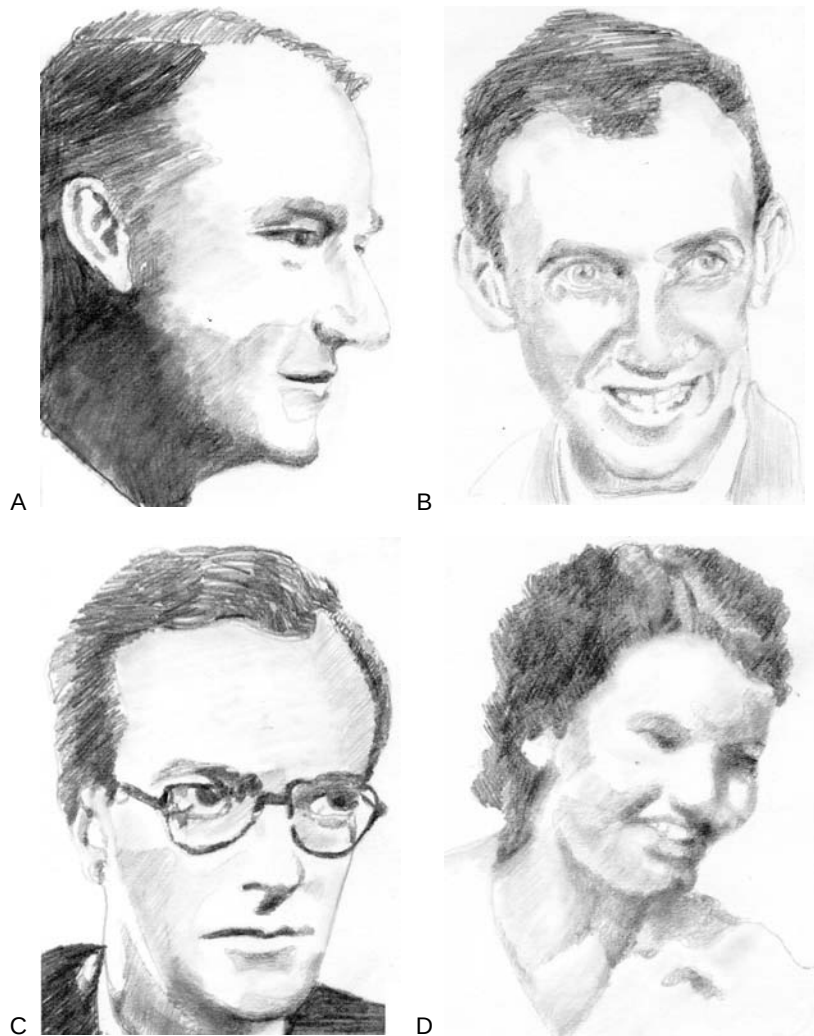


Figura 1-16. **A.** Francis Crick (1916–2004). **B.** James Watson (1928–). **C.** Maurice Wilkins (1916–2004). **D.** Rosalind Franklin (1920–1958).

Tecnológico de California, representaba a uno de los equipos más fuertes a vencer: ya había ganado un premio Nobel por sus trabajos sobre la respiración celular, contaba con muy buena reputación y se sabía que estaba trabajando en ese tema. Pauling contaba con un modelo de triple hélice para describir el DNA, pero ese mismo modelo ya lo habían trabajado Watson y Crick, y lo habían descartado. Watson y Crick obtuvieron un gran beneficio de los trabajos de Rosalind Fran-

klin, quien era muy brillante y meticulosa (sus trabajos eran impecables), pero carecía de la audacia que caracterizaba a Watson y a Crick, quienes a su vez extrapolaban los hallazgos a un modelo tras otro, mientras que ella prefería esperar a que se juntara una fuerte e irrefutable evidencia.

La estrategia de Watson y Crick funcionó. Los resultados que obtuvieron describiendo la molécula de DNA, conformada por una doble hélice, salieron publicados en noviembre de 1952 en la revista *Nature*. Además de tratarse de una molécula elegante, cumplía con todos los requisitos fisiológicos para explicar cómo se replica, se guarda y se expresa la información genética. Inmediatamente se convirtió en una molécula de gran interés biológico.

Watson, Crick y Wilkins recibieron el premio Nobel en fisiología y medicina en 1962. Rosalind Franklin murió de leucemia (quizá precipitada por sus trabajos con rayos X) en abril de 1958.

A la fecha, el estudio de la molécula de DNA se ha detallado de manera increíble; ahora se sabe cómo funciona, cómo guarda y expresa la información, y cómo interactúa con otras proteínas y agentes bioquímicos (hormonas o medicinas); incluso se ha descifrado el código genético de algunos virus, bacterias y organismos más complejos, como el del chimpancé e incluso el del ser humano. En la segunda mitad del siglo XX los avances en la biología molecular fueron estrepitosos y espectaculares. Nos aclararon, pues, no sólo la forma y la función del código genético, sino que también se disecaron una gran cantidad de moléculas como las hormonas, los neurotransmisores, los mediadores celulares y los anticuerpos, entre muchas otras, todas unidades químicas que orquestan la maquinaria de la vida. Para sorpresa de muchos, resultó ser que la mayoría de ellas guardan una similitud asombrosa, ya no digamos entre los diferentes tipos del reino animal, sino incluso entre seres del reino vegetal, el reino de los hongos, el de los protistas e incluso el reino de las bacterias.

Lo anterior vino a reacomodar las ideas que se tenían sobre el origen de los organismos y todo empezó a apuntar a que cada uno de los seres vivos que habitamos este planeta compartimos un ancestro común.

Mientras todas estas investigaciones se llevaban a cabo, el pensamiento sobre la teoría de la evolución continuó desarrollándose. Con base en los estudios de genética, en 1980 fueron secuenciados dos genes de la hemoglobina, proteína encargada del transporte de oxígeno en los glóbulos rojos, lo cual representó una gran sorpresa, pues los dos genes secuenciados diferían entre sí y, sin embargo codificaban para un mismo producto: la hemoglobina. Aunque la diferencia era pequeña, existía. Lo asombroso fue que los dos genes, sensiblemente diferentes, contaban con la información necesaria para sintetizar un mismo producto, una misma proteína. A este hecho se le denominó polimorfismo simple de nucleótidos, o PSN, y es que dicha variación esta conformada por el cambio de un nucleótido por otro en un mismo gen. Los nucleótidos son las moléculas que componen

a los genes. En otras palabras, el PSN consiste en algo similar a poder escribir *México*, *Méjico* o *Méx.*, en donde todas se escriben diferente pero tienen un mismo significado.

El hallazgo del PSN fue muy importante para la teoría de la evolución, ya que confirmaba nuevamente que existe variabilidad en la genética, tal como Darwin lo había imaginado. La gran variación revelada por estos estudios constituyó uno de los fundamentos de la teoría neutralista, cuyo principal expositor es Motoo Kimura, quien opina que la mayoría de las mutaciones son neutrales, es decir, que no tienen más ni menos ventaja; y entonces expone que la mayoría de los cambios evolutivos se deben simplemente a una cuestión de azar, a lo que denominó “derivación genética”. De cualquier manera, los que apoyan la teoría neutralista no niegan a la selección natural, dado que una mutación neutral permanece como tal siempre y cuando el medio ambiente no cambie; de lo contrario, una mutación neutral puede convertirse en algo benéfico o perjudicial para una especie.

Por otro lado, en las últimas décadas, Niles Eldredge y Stephen Jay Gould se han esforzado por convencer a la comunidad científica de que la teoría moderna de la evolución no tiene necesidad del gradualismo. En este caso, sus argumentos se refieren a las variaciones morfológicas y no a las moleculares. Ellos dicen que el ritmo de la evolución morfológica es menos regular. Como saltacionistas sostienen que las apariciones súbitas de nuevas especies fósiles reflejan que sus formaciones siguen a explosiones evolutivas, después de las cuales las especies sufrirán pocos cambios durante millones de años, y dicen también que el registro fósil es bastante incompleto.

Así pues, podemos darnos cuenta de que el debate entre gradualistas y saltacionistas no ha cedido y que en realidad el cambio evolutivo sigue estos dos patrones, y muchos otros.

Eldredge y Gould llamaron a su modelo “equilibrios puntuados” y concluyeron que las estirpes cambian poco durante la mayor parte de su historia, pero que, en ocasiones, la tranquilidad se ve puntuada o interrumpida por rápidos procesos de especiación. Tal caso se puede observar en el periodo cámbrico, en el cambio del pérmico al triásico y en el cambio del cretácico al terciario.

Finalmente, otro de los grandes pensadores sobre la evolución lo representa en la actualidad Richard Dawkins, quien en 1989 publicó un libro llamado *El gen egoísta*; este libro fue en realidad una segunda edición en donde hace pequeñas correcciones y se defiende de los ataques sufridos cuando publicó la primera edición en 1976. El propósito de Dawkins es el de examinar la biología del egoísmo. Trata de demostrar que el factor importante de la evolución no es el bien de la especie, como tradicionalmente se entiende, sino el bien del propio gen. Para él, los individuos no son más que máquinas creadas por los genes para lograr sobrevivir. Interesante pero desalentador. Lo anterior quiere decir que los seres vivos son vehículos acarreadores de genes y la manera y la forma como ellos sobrevi-

ven y pasan de generación en generación. Venimos de los genes y lo único que dejamos en nuestra descendencia son genes. Butler, un biólogo estadounidense, define lo anterior de esta manera: “la gallina no es más que un invento del huevo para poder producir más huevos”.

Según Dawkins, los genes han construido una gran variedad de “máquinas vivientes” (que son los organismos) para prosperar “explotándolas”, de modo que un gen puede considerarse una unidad química que sobrevive a través de un gran número de cuerpos sucesivos e individuales. Así pues, *gen* se puede definir como una diminuta porción de material cromosómico con el potencial de permanecer durante suficientes generaciones para servir como una unidad de selección natural, ya que, según Dawkins, los individuos son demasiado grandes como para considerarlos unidades de selección. Al final, se considera que un gen es exitoso si permanece por muchas generaciones, si vela por sí mismo, si es egoísta.

Hasta aquí hemos visto un recuento sobre algunos de los pensadores más destacados en el tema de la teoría de la evolución. Existen muchos otros teóricos evolutivos, pero la idea de este capítulo ha sido la de nombrar los que, a nuestro parecer, han aportado más a la teoría de la evolución.

Si hacemos una recapitulación sobre la historia de la teoría de la evolución diremos que todo empezó cuando el hombre satisfizo sus necesidades básicas de alimentación y supervivencia y empezó a tener tiempo para pensar y para preguntarse sobre sí mismo y sobre su entorno. Aristóteles pensó que la naturaleza de los seres vivos residía en ellos mismos y que un pato no podría venir de otro lado si no era a partir de otro pato, que en esencia un pato era un pato y que tenía la información necesaria para dar lugar a otro pato. Después vino un momento histórico en el cual se reconoció, gracias a los viajes de los exploradores y los naturalistas, que en el mundo habitaba una gran cantidad de especies muy diversas; y que además habían existido otras (fósiles) ahora extintas; este conocimiento fue aceptado pero no bien entendido. Además, no hay que olvidar el Nuevo Mundo, el mundo microscópico de Antonio van Leeuwenhoek. Después del oscurantismo, Buffon supuso que las especies tenían que surgir de otras especies, pero dada la presión que recibió de la Sorbona de París se retractó. Posteriormente, Lamarck, protegido de Buffon, concluyó que si la superficie de la Tierra cambiaba con el tiempo, entonces también debían cambiar las especies que en ella habitaban. Pero su gran aportación fue lograr la aceptación del hecho de que las especies cambiaban en el transcurso del tiempo. Su desacierto fue asegurar que las características adquiridas durante la vida podían heredarse a la descendencia. Luego llegaron Darwin y Wallace, con sus renovadas y revolucionarias ideas de que en las especies pueden observarse herencia y variabilidad, sobre las cuales ejerce su acción la selección natural y que, a lo largo de mucho tiempo, una especie puede dar origen a otra gracias a este mecanismo. Los trabajos de Lyell de geología inspiraron a Darwin para que le diera importancia a los efectos que ejerce el medio

ambiente sobre la naturaleza viva. La idea de Darwin era acertada, pero le faltaban pruebas para hacerla contundente. Darwin no pudo más que argumentar. Thomas Huxley fue su gran defensor, como también lo fue Francis Galton, quien además inició la filosofía de la eugenesia. Casi al mismo tiempo, un monje austriaco describía las leyes de la herencia mendeliana, lo cual a Darwin le hubiera gustado conocer. Gregor Mendel aseguró que la herencia era un hecho. Para entonces, Walther Fleming describió el material cromosómico del núcleo celular y Leopold Weismann, además de echar abajo a la teoría lamarckiana, especificó que las células son inmortales desde el punto de vista que tienen la capacidad de heredar cromosomas a las células hijas de manera indefinida. Surgieron Weldon y Bateson, el primero biométrico gradualista y el segundo biólogo, naturalista y saltacionista. Ambos libraron una batalla intelectual hasta los últimos días de su vida y estudiaron las leyes de la herencia mendeliana hasta el cansancio, y hasta olvidarse de la selección natural. La genética apenas se vislumbraba en el horizonte. A Bateson se le unió Hugo de Vries con su teoría de la mutación. Según de Vries, cultivó plantas con características tan novedosas que las consideró como especies nuevas o mutantes. William Bateson y Hugo de Vries fueron los principales responsables para que la balanza se inclinara aún más a la corriente del pensamiento saltacionista, ya que aseguraban que las mutaciones eran las únicas responsables de que aparecieran características diferentes en los organismos, tan diferentes como para considerar el surgimiento de una nueva especie. El encargado de reforzar este pensamiento fue Thomas Hunt Morgan con sus experimentos sobre la mosca de la fruta. A su vez, Bateson, inspirado en los trabajos de Morgan, sugirió el término *gen* para referirse a las partículas de la herencia y *genética*, para indicar el estudio de éstos (figura 1-17); también especuló, con razón, que algunas enfermedades humanas tenían sus bases en la herencia. La genética se puso de moda, pero no por mucho tiempo, ya que los trabajos de Fisher, Wright y Haldane se encargaron de reconciliar y retomar la selección natural. Sus estudios poblacionales demostraron variabilidad en la herencia y restablecieron la función de la selección natural en la evolución; dijeron que la selección natural actuaba de forma acumulativa sobre pequeñas variaciones y esto podría dar lugar a cambios importantes en una especie. Las contribuciones de este triunvirato rechazaban al mutacionismo como único factor motor de la evolución. La selección natural regresaba a ocupar un lugar importante. A seguir, Dobzhansky tuvo la capacidad mental para lograr sintetizar todo el material biológico acumulado y aseverar que ambos, el darwinismo clásico y la genética experimental, eran igual de importantes para comprender el fenómeno evolutivo. Lo único que faltaba era la unificación con la paleontología, y George G. Simpson se encargó de demostrar que el registro fósil era consistente con el nuevo modelo del darwinismo. Charles Darwin tenía razón. Por desgracia, Herbert Spencer y su idea de la supervivencia del más apto, junto con Ernst Haeckel y su ley biogenética, se encargaron de



Figura 1–17. William Bateson (1861–1926), sugirió por primera vez el término “genética” para la ciencia de la herencia y de la variación.

divulgar el darwinismo social (al que nunca hizo referencia Darwin en persona), con funestas consecuencias. Luego llegó la era moderna. Watson y Crick descubrieron la forma y función de la molécula de la herencia, la base de la genética: el DNA. Su análisis cuidadoso demostró que todos los reinos de los seres vivos compartimos los mismos mecanismos de la herencia, que todos guardamos la información genética en dicha molécula y que la variabilidad y la semejanza genética existen, tanto en individuos de una misma especie como en individuos de especies diferentes. Este último punto lo adoptó Kimura para su teoría sobre las mutaciones neutrales. Eldredge y Gould reconciliaron a los gradualistas con los saltacionistas mencionando que las especies cambian poco durante la mayor parte del tiempo y que ocasionalmente dicha tranquilidad se interrumpe por rápidos y súbitos procesos de especiación. Recientemente, Dawkins postuló su teoría del gen egoísta y nos colocó a todos los organismos en la posición de vehículos transportadores de genes, diciendo que la selección natural no actúa sobre los organismos sino sobre los genes egoístas. Aquí termina este breve repaso sobre la teoría de la evolución.

Actualmente se ha establecido una nueva gran síntesis, en la que para explicar el fenómeno evolutivo se deben considerar los resultados obtenidos en trabajos de investigación de genes, mutaciones, biología del desarrollo, embriología, teoría de los cromosomas, herencia mendeliana, selección natural, ecología y evolución molecular, entre otras. Todos son importantes y ninguno es el factor esencial para determinar la evolución de las especies.

De la esencia de la evolución

Nada en la vida tiene sentido si no es bajo la luz de la evolución.
Theodosius Dobzhansky

LAS BASES

El cuerpo humano está conformado por diversos órganos como la piel, el hígado, el cerebro y los riñones, y con tejidos como el muscular o el conectivo. Incluso la sangre es un tejido. Los órganos y los tejidos están formados, a su vez, por células especializadas para las funciones que desempeñan (figura 2-1). Las células miden, en promedio, menos de una décima de milímetro de diámetro. Cuentan con una membrana celular formada de fosfolípidos, compuestos bioquímicos grasos que permiten aislarse del medio ambiente. Dicho sea de paso, entre los fosfolípidos se acomodan ciertas proteínas (proteínas de membrana celular) que le confieren a las células diversas características, tales como las de recibir mensajes de otras células y reconocer sustancias extrañas, o también para expresar mensajes que las células quieren transmitir; dicha membrana delimita al citoplasma celular, lugar donde se lleva a cabo la mayoría de las funciones metabólicas de una célula. Ahí, en el citoplasma celular, se encuentran los organelos u orgánulos, que son de diferentes tipos y están destinados a cumplir o llevar a cabo diferentes tareas y servicios, como la captura y digestión de nutrientes (fagosomas), y la función de llevar a cabo la respiración celular (mitocondrias); también existen los orgánulos encargados de fabricar o sintetizar proteínas (ribosomas), cuyas fun-

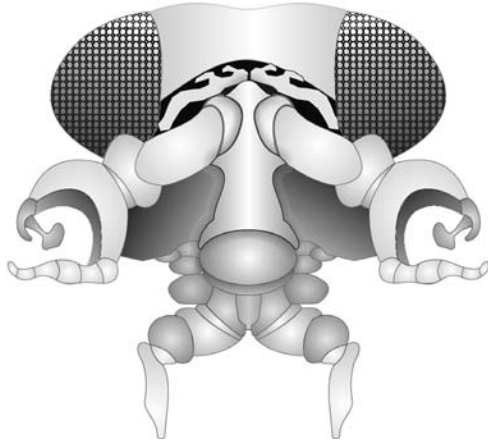


Figura 2-1. Mosca de la fruta mutante. Se trata de una variante homeótica donde se aprecia que en lugar de antenas se han desarrollado apéndices articulados (patas); a esta malformación se le conoce como “mosca antennapedia”.

ciones son extraordinariamente versátiles. También en el citoplasma se encuentra una especie de burbuja llamada núcleo, que contiene un material ácido limitado por otra membrana, la membrana nuclear, tal como lo describió Walther Fleming (figura 2-2). El núcleo de cada célula contiene, ordenadamente en los cromoso-

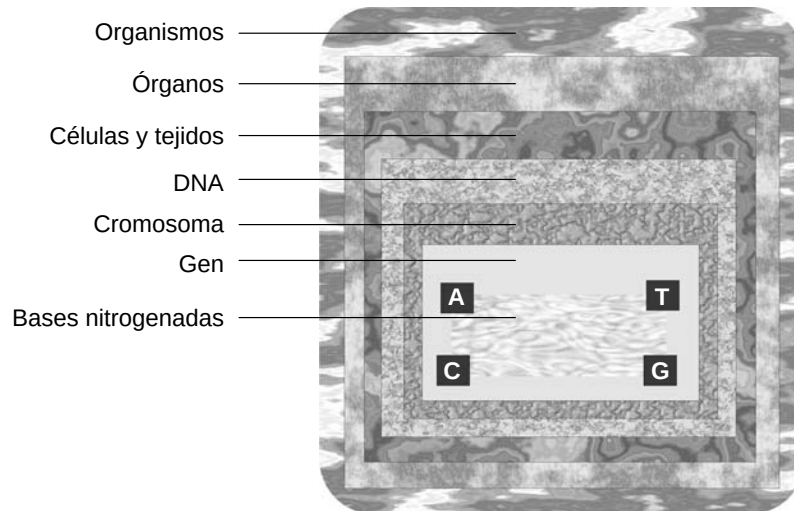


Figura 2-2. Estructura básica de un organismo.

mas, dos series completas del genoma humano. Lo anterior puede observarse en todas y cada una de las células de nuestro cuerpo, excepto en los glóbulos rojos de la sangre porque no tiene núcleo celular, y en los gametos (óvulos y espermatozoides), que cuentan con una sola serie del genoma humano cada uno. El genoma contiene los genes. Los seres humanos heredamos un genoma por parte de la madre (óvulos) y un genoma por parte del padre (espermatozoides); después de que un óvulo es fecundado por un espermatozoide, se conforman los 46 cromosomas humanos, los cuales contienen casi 3 000 millones de pares de bases nitrogenadas, compuestos bioquímicos que son los componentes básicos y fundamentales del ácido desoxirribonucleico o DNA. El DNA de los humanos contiene cerca de 22 500 genes que codifican la formación de alguna proteína, seis veces más de los genes que tiene una bacteria, el organismo más simple que se conoce. Dicho sea de paso, el número de genes es mucho menor del que los científicos habían pronosticado, debido a que resultó ser el doble del número de genes que tiene la mosca de la fruta (14 000); el promedio de genes de una bacteria es de 4 000; el virus de la gripe (influenza) tiene ocho genes y el virus del SIDA, uno de los más nocivos para el ser humano, cuenta con siete genes. Al conjunto o parte de la constitución genética de un individuo se le conoce como genotipo.

La palabra información proviene del latín *informare*, que quiere decir “formar”, “dar forma” u “organizar”; es una medida de orden aplicable a cualquier estructura o sistema y cuantifica las instrucciones requeridas para producir cierta organización. Imaginemos ahora que el ser humano se forma gracias a la información contenida en una enciclopedia de 46 tomos, 23 tomos por parte de la madre y 23 tomos por parte del padre. Cada tomo es un cromosoma, así que nuestro genoma se encuentra conformado por 23 pares de cromosomas. Cuando se concibe un ser humano gracias a la unión del óvulo con el espermatozoide, se toma cierta información de cada una de las enciclopedias de manera aleatoria (al azar) e irrepetible, por lo que cada uno de los hijos heredará algunas características de la madre y otras características del padre. Por eso siempre escuchamos comentarios como: “la hija de aquella pareja sacó los ojos y la tez de su madre, pero la cara del padre”. En cada uno de los 23 tomos de la enciclopedia encontramos una gran cantidad de información escrita que podemos consultar. Cada uno de los temas que podemos analizar equivaldría a un gen. El conjunto de muchos temas son los genes. Cada tema, o sea cada gen, está escrito en varios párrafos, y a cada párrafo se le llama *exón*. Cada párrafo, ya sea corto o largo, está escrito con palabras y cada palabra en genética se llama *codón*. Cada codón (palabra) está escrito en letras. Nuestro alfabeto consta de 27 letras. El alfabeto genético está constituido sólo por cuatro letras. A ellas se les conoce como bases nitrogenadas, y son: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). Las letras de este libro están escritas sobre papel. Las del genoma humano están escritas sobre una cadena de moléculas de azúcar, que se encuentran unidas entre sí mediante fosfatos.

Las bases nitrogenadas (letras), que están escritas sobre las líneas de azúcar y fosfato forman una molécula enorme conocida como DNA. Esta molécula tiene la información suficiente para formar, desarrollar y mantener en buenas condiciones a un ser vivo durante toda su existencia. La información contenida en esta molécula equivale a la cantidad de información escrita en 800 libros de la Biblia.

Ya quedamos en que los genes tienen la información almacenada en secuencias de letras conocidas como bases nitrogenadas, escrita más o menos de la siguiente manera: GTATTTGCGATT, donde cada letra corresponde a una base nitrogenada. Cuando se requiere cierta información (por ejemplo, la información necesaria para sintetizar una hormona o un anticuerpo), la enciclopedia DNA se abre en la página específica que queremos consultar y se recaba la información necesaria. El dato expuesto por el DNA es leído y copiado por otra molécula muy parecida que se llama ácido ribonucleico (RNA); este ácido copia la información utilizando el mismo alfabeto, sólo que reemplaza la T (timina) por la U, de uracilo. Así, en la secuencia de letras anotadas previamente, el RNA copiará de la siguiente manera: CAUAAACGCUAA, debido a que siempre la G será copiada como C, la C como G, la A como U y la T como A. Una vez que el RNA copia la información del DNA, la transporta a un sitio fuera del núcleo celular, madura el mensaje y lo protege del efecto de algunas enzimas. Sigue con su trayecto y llega entonces a un orgánulo en el citoplasma conocido como ribosoma, en donde se le da significado al mensaje para poder construir una proteína. Para que el RNA pueda fabricar determinada proteína, debe dividir la copia en segmentos o secuencias de tres letras y formar varias palabras, cada una con tres letras, de manera que nuestra traducción quedaría así: CAU AAA CGC UAA. Finalmente, cada secuencia de tres letras, que es un codón, determina cuál es el aminoácido que se necesita para integrarse (a manera de eslabón en una cadena) y formar parte de la proteína. Hay que recordar que los principales componentes de las proteínas son los aminoácidos (importante clase de compuestos orgánicos que contienen un grupo amino y un grupo carboxilo y que provienen principalmente de la dieta). Volviendo a nuestra lectura de codones, es la siguiente: CAU = histidina; AAA = lisina; CGC = arginina y finalmente UAA = alto, o sea una señal de término. La histidina, la lisina y la arginina forman parte de 20 aminoácidos, que constituyen las proteínas (figura 2–3). Dependiendo del número y secuencia de aminoácidos, las proteínas construidas con ellos tendrán una función y una misión específicas en nuestro cuerpo. Puede ser que las proteínas funcionen como enzimas o como promotores para la diferenciación celular, esto es, el DNA que se obtiene de la unión del óvulo fecundado por el espermatozoide tiene la capacidad de formar todas y cada una de las células que integran un organismo completo. A partir de esta información se constituyen la piel, los huesos, el cabello, los ojos, los oídos, las vísceras, los músculos y toda la red de comunicación para que los órganos funcionen en una sola unidad, en nuestro caso, el cuerpo humano, único e irrepe-

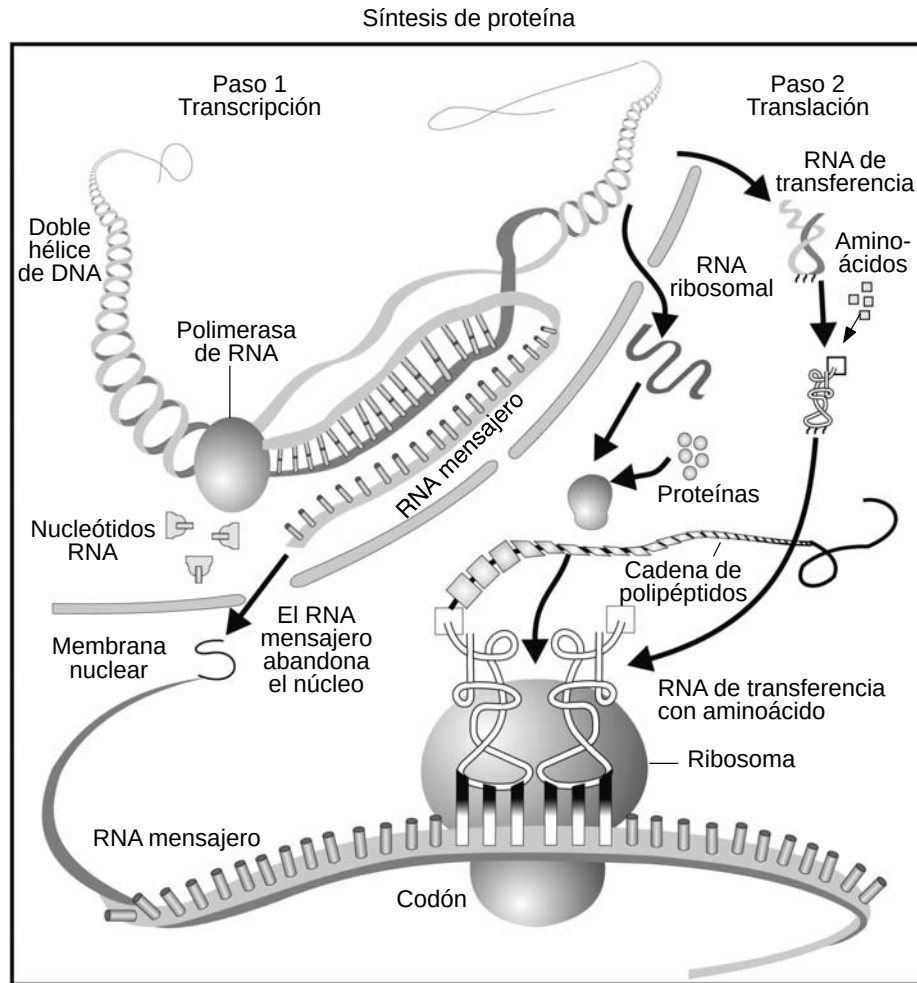


Figura 2-3. Síntesis de proteínas. El DNA (genotipo) determina la forma y la función de las células (fenotipo) mediante la síntesis de proteínas.

tible, manifestación del genotipo a la cual se le denomina “fenotipo”. La proteína sintetizada también puede funcionar como una hormona (por ejemplo la adrenalina o la cortisona), como un anticuerpo o como un neurotransmisor encargado de llevar información de una a otra neurona (por ejemplo, la dopamina); en este último ejemplo, los neurotransmisores son sustancias químicas proteicas sobre las cuales se basa el funcionamiento cerebral, desde los mecanismos inconscientes, como la regulación de la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal, hasta los mecanismos conscientes, como la conducta, y asimismo como nuestra acti-

tud, percepción y reacción a los estímulos del medio ambiente están regulados por nuestra química cerebral.

WEISMANN TUVO RAZÓN

Charles Darwin argumentó en su obra los siguientes puntos: selección natural, herencia, descendencia con modificación y generación de variabilidad en los organismos. Podemos decir con términos modernos que los organismos de una misma población varían desde el punto de vista genético y que, por consiguiente, varían en ciertas características y habilidades que, en un momento dado, afectan o repercuten en sus capacidades de contribuir a las siguientes generaciones. También podemos decir que en competencia con otros individuos de esa población, y enfrentando otras presiones del medio ambiente, florecen los organismos más aptos, mientras que los menos aptos fracasan en contribuir con su descendencia a la siguiente generación. Con el paso del tiempo, millones de años, este proceso, que se repite una y otra vez, va seleccionando un grupo poblacional cada vez mejor adaptado a su entorno, el cual lleva consigo un determinado grupo de genes (genotipo) que a su vez manifiestan un determinado grupo de propiedades. Se dice entonces que la población ha evolucionado mediante selección natural, haciendo uso de su variación genética. Hay que aclarar que, aunque la selección natural es importante para que se dé la evolución, lamentablemente no cuenta con la capacidad de crear ni de generar variabilidad ni en el genotipo ni en el fenotipo; sólo puede preservar o rechazar algunas variantes manifestadas por los organismos. Así, la selección natural funciona como una especie de filtro.

La variación genética surge gracias a los fenómenos de la mutación (un cambio en la secuencia de las bases nitrogenadas que componen al código genético), de la recombinación (el intercambio de segmentos cromosómicos a partir de diferentes cromosomas para dar lugar a cromosomas híbridos) y al arreglo o configuración de los cromosomas durante la formación de los óvulos y los espermatozoides (meiosis); todos estos factores, en conjunto y por separado, producen cambios en la secuencia del DNA en la descendencia porque dichos cambios son heredables.

En cuanto a la evolución, generalmente se acepta que la selección natural actúa siempre sobre la variación del fenotipo, el cual se refiere a todos aquellos hallazgos observables y características funcionales de los organismos, es decir, a cómo los vemos y cómo funcionan. Los biólogos evolucionistas con frecuencia se refieren a la “variación fenotípica” o al “cambio en el fenotipo”. Se acepta también que la selección natural no actúa directamente en la secuencia del DNA, sino que actúa sobre el genotipo, pero de manera indirecta, es decir, a través del fenotipo.

La mayoría de los detalles del fenotipo dependen del genotipo. Por ejemplo, el tamaño de un organismo, la velocidad que llega a desarrollar, su agudeza visual, su resistencia o vulnerabilidad para enfermar y sus respuestas conductuales, entre muchas otras, todas son parte del fenotipo. Debido a que el fenotipo es el que se enfrenta al medio ambiente y a la selección natural, y el genotipo es el que se hereda para dar forma y función al fenotipo, es crucial entender los procesos que conectan a ambos.

Recordemos que para 1940 era bastante claro que la variación genética se daba de manera aleatoria o azarosa y que no estaba ligada a las condiciones del medio ambiente (corriente de pensamiento del mutacionismo). Luego, los biólogos evolucionistas formularon una teoría basada en la variación genética puramente aleatoria y la reconciliaron con la selección natural, lo que se denominó como la síntesis moderna. Pero hay que recordar que este modelo fue sugerido antes de que se desarrollaran la biología molecular moderna, la biología celular y la biología del desarrollo. Esta última se refiere al término utilizado para denominar lo que anteriormente se conocía como embriología, e incluye al estudio de todas las etapas por las que pasa un organismo mientras se forma, desde el momento de la concepción (unión del óvulo con el espermatozoide) hasta el momento del parto o nacimiento; no se limita nada más a la fase embrionaria, que es el momento en el que se diferencian o se forman los tejidos, órganos y sistemas de un ser vivo. La fase embrionaria durante la gestación de un humano se lleva a cabo durante las primeras diez semanas del embarazo. La síntesis moderna es, pues, un modelo valioso y útil, pero incompleto. Carece del tercer pilar tan requerido para explicar y entender la teoría general de la evolución.

Ese tercer pilar consiste en la teoría del uso de la información genética para dar lugar a la génesis o generación de variabilidad hereditaria que se observa en el fenotipo. Es la teoría del cómo; el material genético hereditario construye un organismo único en cada generación, desde el huevo fecundado o cigoto hasta la edad adulta, y a partir de ahí a la siguiente generación. Todo lo que podemos observar en un organismo, como su anatomía, fisiología y conducta, está sólo remotamente conectado a su secuencia de DNA a través, o mediante todos los complejos procesos de crecimiento, desarrollo y metabolismo (entre otros) de los cuales depende. Así pues, un cambio en la secuencia del DNA se correlaciona sólo de manera indirecta con los cambios observables en la anatomía, fisiología y conducta de un organismo. Pero no es suficiente con saber que los cambios en el DNA pueden, de alguna manera, causar un cambio en el fenotipo, sino que necesitamos saber cómo es que los fenotipos cambian a consecuencia de las mutaciones que se presentan en el DNA. Es este tercer pilar mediante el cual entendemos cómo es que los organismos responden a los cambios genéticos, y es tal vez la respuesta que en un momento dado puede despejar el dilema que atormentó a Charles Darwin.

Antes de considerar la manera como los organismos responden a los cambios de sus genéticas debemos entender la relación que existe entre el medio ambiente y el DNA. Desde que Lamarck expuso su teoría de la evolución, que trataba de la posibilidad de que las características adquiridas durante la vida pudieran ser heredadas a la descendencia, numerosos estudios experimentales fueron llevados a cabo y todos fracasaron en sus intentos por darle soporte y veracidad. No hubo manera de comprobar una herencia directa de las adaptaciones fisiológicas de un organismo al medio ambiente.

Debemos recordar que en el organismo existen, en términos muy generales, dos tipos de células: las somáticas y las germinales. Las células somáticas (del griego *soma*, que quiere decir “cuerpo”) experimentan y responden al estrés del medio ambiente, y a este tipo pertenecen prácticamente todas las células del cuerpo (piel, sistema nervioso, aparato gastrointestinal, etc.); las células somáticas no hacen ninguna contribución ni ejercen influencia genética sobre el otro tipo de células, las germinales. Contrarias a las somáticas, las células germinales son las únicas que con su información contribuyen a la siguiente generación o descendencia. Las células germinales son ajenas a influencias del medio ambiente. Las personas estamos expuestas a diferentes estímulos ambientales que poco a poco hacen que vayamos adquiriendo habilidades y destrezas (experiencias) que nos ayudan a sobrevivir, pero, aunque dichas habilidades y conocimientos adquiridos los repetimos de manera cotidiana, no pueden ser heredados a nuestros hijos. Aun si manejamos todos los días de nuestra vida, nuestros hijos no nacen sabiendo conducir un automóvil.

Tenemos que aclarar que existen algunos fenómenos ambientales que afectan directamente al DNA de las células somáticas; por ejemplo, los rayos ultravioleta del sol rompen las cadenas de DNA de las células de la piel y las pueden transformar en células malignas, o sea en cáncer de piel. Pero esto no quiere decir que el cáncer de piel se herede, ya que dicha información no se transmite a las células germinales ni tampoco a la descendencia.

Existe otra posibilidad excepcional: los efectos que pueden tener ciertos factores ambientales sobre las células germinales, que se califican como factores teratogénicos (generadores de malformaciones en el embrión o feto), por ejemplo, los rayos X y algunos agentes químicos que, de exponernos a ellos, pueden causar anomalías en el DNA de las células germinales. También producen alteraciones en la descendencia que por lo general son incompatibles con la vida, y si acaso esas alteraciones proceden y son compatibles con la vida, no podrán, a su vez, ser heredadas a una tercera generación. Entonces, la idea y los trabajos de Weismann (recordemos que fue quien debatió y arremetió contra Lamarck cortándole la cola a los ratones) han superado la prueba del tiempo. Estableció una clara distinción entre las células somáticas y las células germinales. Dijo que ninguna influencia del medio ambiente externo que afecte a las células somáticas puede modificar

el material hereditario de la siguiente generación, material genético informativo que compete de manera exclusiva a las células de la línea germinal.

Las células germinales, por su parte, no llevan a cabo una función ni tarea fisiológica en el organismo y, por lo tanto, no pueden ser seleccionadas por algún factor del medio ambiente externo; nada del medio ambiente puede influirlas a transmitir, de manera preferente, alguna habilidad o característica adquirida a la siguiente generación. Las células germinales son sólo unos pasajeros inertes que viajan en un vehículo (organismo) construido con células somáticas. La única selección a la cual están sujetas las células germinales depende del éxito en la supervivencia y en la reproducción del individuo. De esta manera, la principal ventaja biológica de que las células germinales se encuentren separadas de las somáticas puede ser la de asegurarse de representar fielmente el éxito de todo el individuo. Weismann sumó a la evolución darwiniana el concepto y la evidencia biológica celular que nulificaba la idea de que las características adquiridas se pueden heredar.

En conclusión, para la década de 1950, con el advenimiento y el avance de la biología molecular, no se logró probar que un organismo pudiera responder de manera específica a un estrés del medio ambiente mutando a un gen en particular para lograr una mejor adaptación en la descendencia. En la actualidad, después de 50 años, no se ha encontrado un mecanismo mediante el cual, como una respuesta fisiológica del padre o de la madre a un estrés del medio ambiente, se pueda modificar la información genética contenida en el óvulo o en el espermatozoide con fines de adaptación. Con la palabra “estrés” me refiero a cualquier tipo de estímulo ambiental que pueda inducir una respuesta, ya sea del tipo físico o psicológico de un individuo.

Aunque sabemos que varios tipos de virus pueden acarrear información genética al interior de las células, y que dicha información puede incorporarse al DNA de las células (de hecho, la prevalencia de secuencias virales en los genomas sugiere que en algunas ocasiones los virus han penetrado hasta las células germinales), no existe prueba alguna de que los genes acarreados por esos virus sean el reflejo o estén de alguna manera relacionados con la respuesta al estrés puramente fisiológica por parte del hospedero u organismo que le da cabida.

La biología molecular moderna y los análisis genéticos actuales han revelado que no existe la manera para que se dé un cambio en la genética de las células germinales como respuesta a una necesidad fisiológica o experiencia vivida. No existe un mecanismo que dirija el estrés del medio ambiente de manera directa hacia alguna alteración en algún gen específico o grupo de genes como forma o manera de aminorar el efecto de dicho estrés en las generaciones subsecuentes. Por tanto, podemos decir que no hay pruebas que sustenten la idea de que exista un “cambio facilitado para el genotipo”. Entonces, la variación y la selección natural se encuentran completamente desacopladas (figura 2–4).

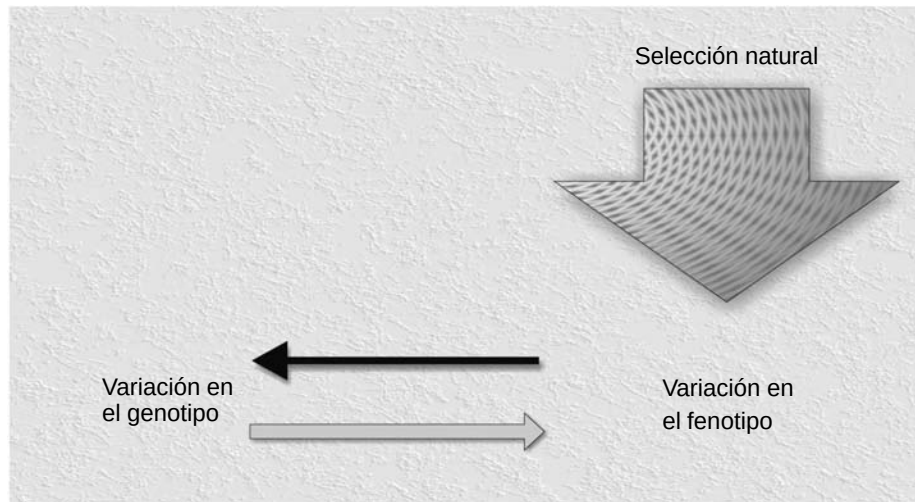


Figura 2-4. La variación genética y la selección natural se encuentran desacopladas. La única manera mediante la cual pueden interactuar es una a través del fenotipo (organismo).

Después de hacer la importantísima diferencia de que sólo es posible heredar el genotipo y de que sólo el fenotipo es sometido a selección natural (desde el punto de vista macroscópico), la teoría de la síntesis moderna se encargó de resumir la evolución en tres pasos básicos. El primero consiste en la variación aleatoria en las secuencias del DNA. El segundo se refiere a que un cambio en el genotipo lleva consigo a un cambio en el fenotipo (no hace referencia ni especifica la manera en cómo es que esto se puede llegar a lograr). El tercero tiene que ver con que las variaciones en el fenotipo son las que en un momento dado se seleccionan de manera natural, con todo y su genotipo correspondiente, con base en la adaptabilidad reproductiva individual, o sea, en su habilidad para contribuir a la prole de las generaciones futuras.

En lo que respecta a la pregunta: ¿cómo es que las alteraciones en el genotipo pueden ocasionar los cambios en el fenotipo?, la síntesis moderna del siglo XX permaneció en silencio, sin respuesta. Sin embargo, la clave de la síntesis moderna fue lograr la independencia de la variación hereditaria de las condiciones selectivas del medio ambiente. En definitiva, la experiencia, las conductas aprendidas y las adaptaciones fisiológicas que un organismo adquiriría durante su vida, en relación con el medio ambiente, no podían ser heredadas utilizando el material genético para tal fin.

Después de esto, algunos biólogos empezaron a reflexionar en la posibilidad de que los organismos tuvieran la capacidad de incidir en la variabilidad, pero

sólo de manera limitada. Probablemente (pensaban), sólo algunos componentes de los organismos eran más difíciles de modificar que otros y, por lo tanto, se mantendrían sin cambios. Por ejemplo, trataban de explicarse cómo era posible que los moluscos y los equinodermos (como las estrellas de mar) tuvieran menos posibilidades para desarrollar alas que los vertebrados. ¿Cuán importante sería saber y entender cómo era que las variaciones genéticas conllevasen a las variaciones en el fenotipo y, en particular, qué tan fácil o difícil era adquirir un fenotipo en particular? Bien, pues quizá podríamos decir que finalmente hemos logrado entender cómo es que se llevan a cabo los cambios evolutivos basándonos en la capacidad que tenemos los organismos para generar novedades.

Para entender por completo la manera en que los cambios en el genotipo generan cambios en el fenotipo, necesitamos entender primero la manera mediante la cual el genotipo genera al fenotipo.

Antes, hay que saber que la variación genética no está dirigida hacia alguna condición de adaptación selectiva; tal como lo dijo Charles Darwin, la variación no tiene un fin último o una meta precisa, sino que simplemente se da. Para entender también la manera en la que los organismos generan novedades hay que hacer referencia a tres consideraciones que comúnmente no son tomadas en cuenta. Primera, la variación genética es necesaria para lograr un cambio evolutivo. La variación genética se da inicialmente a través de las mutaciones, y muchos de los cambios genéticos que son importantes para la evolución provienen del reordenamiento que se da, mediante la reproducción sexual, de mutaciones presentes en generaciones previas. Segunda, todos los organismos que observamos en la actualidad se derivan o son descendientes de organismos que vivieron previamente y que pueden retener o mantener remanentes de ciertas propiedades de sus ancestros, incluidas, por supuesto, ciertas propiedades que a ellos (a sus ancestros) les permitieron cambiar en el pasado. Una gran sorpresa de la biología moderna fue el descubrimiento de la conservación, en muchos organismos, aun en los más remotamente relacionados, del uso de procesos bioquímicos muy similares en relación con las funciones celulares del desarrollo y también del metabolismo, entre muchas otras. También hay que reconocer que cada uno de esos procesos compromete el uso de una gran cantidad de proteínas (o componentes proteicos) que, trabajando en conjunto, contribuyen al desarrollo y culminación del fenotipo. Cuando uno de esos procesos se conserva a lo largo de varias generaciones, resulta obvio que la gran mayoría de sus componentes proteicos también se conservaron. Muchos detalles del metabolismo son iguales en las bacterias y en los seres humanos (pasando a través de toda la ramificación evolutiva); por ejemplo, las estrategias del desarrollo embrionario de las moscas de la fruta son sorprendentemente similares a las de los humanos. Así que la conservación de ciertos procesos clave en diversos organismos del presente implica que podemos deducir los procesos básicos de la fisiología y del desarrollo en los organismos del pasado.

Tercera, todos los organismos somos el resultado de una mezcla de procesos que se han conservado y también de los que se han perdido, en otras palabras, procesos biológicos que han cambiado y de otros que no han cambiado (en una especie de mosaico), y no el resultado de un conjunto o colección de procesos que cambian uniformemente a lo largo de la evolución.

En este momento es muy importante reconocer que las novedades anatómicas, fisiológicas y conductuales de los organismos, nacen, en su mayoría, mediante el uso de los procesos que se han venido conservando pero que se empiezan a utilizar en nuevas combinaciones, en diferentes momentos, lugares y cantidades, durante el desarrollo, en lugar de inventar nuevos procesos para cada organismo por separado.

LOS PROCESOS FUNDAMENTALES

Aunque hasta hora no hemos descrito dichos procesos biológicos (lo haremos posteriormente), hay que saber de antemano que pueden ser utilizados de diferentes maneras, en diversos contextos y en grados variables. Esta versatilidad tan impresionante forma parte de la sobresaliente adaptabilidad de los procesos a las condiciones del medio ambiente, y es clave, por su función protagónica tan especial, para que se dé el fenómeno evolutivo. El sorprendentemente reducido número de genes con el que contamos los seres humanos y con los que cuentan otras formas animales complejas no refleja otra cosa, sino que dicha complejidad anatómica y fisiológica puede lograrse gracias al uso, una y otra vez, en diferentes formas, de los productos generados por los mismos genes. Existen procesos biológicos (genéticos) que se han conservado a lo largo de millones de años y que son fundamentales en los procesos celulares, pues operan en muchos niveles para el desarrollo y la fisiología, y se les conoce como “los procesos fundamentales” de los organismos. Los procesos fundamentales, muchos de los cuales se han conservado a lo largo de cientos de millones o incluso miles de millones de años, cuentan con características muy especiales que facilitan el cambio evolutivo. Estos procesos se han conservado porque repetitivamente han facilitado los cambios de cierto tipo en su entorno. La mayoría de los procesos que se han conservado cuentan con la capacidad de relacionarse y ligarse fácilmente entre ellos, en nuevas combinaciones. Una nueva liga o unión entre dos o más procesos fundamentales puede ocurrir con un mínimo de requerimientos en cuanto a cambios genéticos se refiere y sucederse fácilmente; luego se mantiene o incluso se refuerza mediante la adición de nuevas uniones que, poco a poco, van extendiendo la complejidad en la organización biológica.

Para que surjan todas estas uniones entre procesos fundamentales existen los componentes reguladores, que son los principales responsables y destinos (blan-

cos o dianas) de los cambios heredables. Consisten en pequeñas proteínas o secuencias de DNA que determinan el tiempo, las circunstancias y el grado de actividad de los diferentes procesos. A menudo están involucrados en el control de las uniones y actividades de los mismos y, aunque a simple vista puede parecer que el fenotipo es el principal responsable de los cambios evolutivos, con todo lo anterior podemos anticipar que no es así, sino que el sitio clave para que se den los cambios evolutivos se encuentra en el cambio que se da a nivel de los procesos celulares que al final determinan la generación de la anatomía y fisiología de los organismos.

Uno de esos procesos fundamentales es el que podemos observar en la hemoglobina. A mediados del siglo XX era difícil demostrar la existencia de dichos procesos fundamentales y pruebas de que los procesos fundamentales que subyacen en la adaptación de los organismos que observamos en la actualidad fueran los mismos que sirven como base para que se den los cambios evolutivos. A finales del siglo pasado, y gracias a los avances en la bioquímica y en la biología molecular, se logró demostrar la presencia de un proceso fundamental que resalta, por su elegancia y simplicidad, al mismo tiempo que ofrece una visión clara y detallada de la adaptación de los organismos a su medio ambiente y a su evolución: el transporte del oxígeno mediante la hemoglobina.

En 1628, Sir William Harvey logró demostrar que la función del corazón consistía en bombear la sangre a través de un sistema circulatorio cerrado. Muchos años después, Antoine Lavoiseur (1743–1794) demostró el consumo del oxígeno en el fenómeno de la combustión y en el fenómeno de la respiración. Se reconoció entonces que los organismos vivos consumen oxígeno y excretan bióxido de carbono. Luego, los científicos y los médicos se dieron cuenta de que la sangre contenía más oxígeno por unidad de volumen del que podría encontrarse, en un momento dado, disuelto en el agua; además, se percataron de que la sangre arterial contenía más oxígeno que la sangre venosa.

Todas estas observaciones llevaron al descubrimiento de que la sangre tenía la capacidad de fijar oxígeno y, con ello, al descubrimiento de la hemoglobina, proteína contenida en los glóbulos rojos de la sangre, que tiene la capacidad de fijar oxígeno sobre un pigmento que contiene hierro, conocido como grupo heme, el cual es responsable del color rojo de la sangre y se encuentra unido a la proteína globina.

La hemoglobina es una molécula ancestral que se puede encontrar en todas y cada una de las formas vivientes de la actualidad, desde las bacterias hasta las plantas y los animales. En los animales vertebrados (todos sin excepción), la hemoglobina consiste en un agregado de cuatro moléculas proteicas: a dos se les denomina alfa globina y a las otras dos se les llama beta globina. A cada una de las cuatro globinas se les une un grupo heme, el cual contiene un átomo de hierro. Cada molécula de oxígeno se une a cada uno de los átomos de hierro. Se dice que

la molécula de la hemoglobina (el agregado de las cuatro partes) está saturada cuando cada uno de los cuatro hierros está ocupado por oxígeno.

La función principal de la hemoglobina es la de cargar oxígeno en los pulmones y luego transportarlo hacia los tejidos del organismo para entonces descargarlo; de manera recíproca, carga el bióxido de carbono de los tejidos y lo transporta a los pulmones, en donde lo descarga para volver a cargar oxígeno. Aunque este proceso parece sencillo, dado que en los pulmones hay mucho oxígeno y en los tejidos mucho bióxido de carbono, la eficiencia es muy importante. Cualquier proteína capaz de fijar oxígeno, sin las características especiales que tiene la hemoglobina, no cuenta con la facilidad de descargar más de la mitad del oxígeno que transporta mientras circula por el circuito del pulmón al tejido, y de vuelta al pulmón. La otra mitad del oxígeno regresaría todo el tiempo, no se utilizaría y se la pasaría circulando una y otra vez. De hecho, esto es lo que normalmente sucede en el cuerpo humano en reposo; pero, ¿qué pasa cuando hacemos ejercicio y la demanda de oxígeno por parte de los músculos se incrementa de manera importante? Un medio de transporte de oxígeno óptimo, como lo es la hemoglobina, sí puede descargar casi todo su oxígeno bajo dichas circunstancias extremas. Esta característica que tiene la hemoglobina tiene una gran importancia durante el ejercicio ya que, de no tenerla, y para poder satisfacer las necesidades y requerimientos de oxígeno por parte de los músculos, se tendría entonces que duplicar el tamaño del corazón y también el de los vasos sanguíneos.

La hemoglobina es el mejor ejemplo conocido de una proteína que puede existir en dos conformaciones, y éste es, precisamente, uno de los procesos biológicos fundamentales. La hemoglobina puede manifestarse de dos formas opuestas. Las cuatro unidades de globina se acoplan de diferente manera en las dos conformaciones. Una conformación de la hemoglobina le confiere la característica de que el oxígeno se le une con alta afinidad; a esto se le llama forma activa o estado cargado de oxígeno. A la otra conformación la caracteriza una afinidad mucho menor por el oxígeno y se le denomina forma inactiva o estado descargado de oxígeno. En otras palabras, la forma activa carga oxígeno y la inactiva descarga oxígeno. La transición entre las dos conformaciones o estados sigue la ley del todo o nada, o sea que las cuatro unidades de la molécula de la hemoglobina cambian en conjunto, al mismo tiempo, del estado activo al inactivo y viceversa, y así cambia toda la molécula rápidamente, de una conformación a la otra.

Dicha conducta molecular le confiere a la hemoglobina su alta eficiencia en el transporte y entrega de oxígeno; tanto la forma activa como la inactiva pueden manifestarse, todo depende de las condiciones. Esto es, cuando los niveles de oxígeno son altos, como en los vasos sanguíneos capilares del pulmón, la hemoglobina se presenta en su forma activa, así presenta una alta afinidad por el oxígeno y se carga de él. En niveles bajos de oxígeno, como cuando sucede en los músculos mientras se hace ejercicio, donde el oxígeno se consume rápidamente y de

manera irreversible en la producción de energía, la hemoglobina se presenta en su forma inactiva con poca afinidad por el oxígeno y lo descarga en su totalidad. En condiciones normales de actividad leve, o a nivel del mar, se alcanza un estado de estabilidad relativa entre las dos formas, de manera que la hemoglobina carga la mayoría del oxígeno de los pulmones y descarga cerca de la mitad en los tejidos.

Podemos imaginar ahora la gran variedad de condiciones que pueden perturbar ese equilibrio y, por lo tanto, afectar la conducta activa o inactiva de la hemoglobina. Por ejemplo, cuando hacemos ejercicio cambian las condiciones en los músculos: se requiere de una demanda excesiva de oxígeno, la temperatura y la acidez se modifican, incrementa la temperatura y se crea un potencial hidrógeno (pH) ácido. Ambos factores favorecen la conformación inactiva de la hemoglobina y, en respuesta a estas condiciones, la hemoglobina descarga 80 a 90% del oxígeno acarreado.

En condiciones fisiológicas inusuales, como la hipoxia que podemos experimentar cuando subimos a una gran altura (como en el montañismo), el equilibrio completo entre las dos conformaciones de la hemoglobina debe de ser recalibrado. El principal efecto que se tiene con la exposición a grandes alturas, generalmente mayores a los 3 685 metros, donde se cuenta con sólo dos terceras partes del oxígeno que se encuentra a nivel del mar, consiste en un incremento de la frecuencia respiratoria, misma que se mantiene aun después de la aclimatación y permite una mejor oxigenación por parte de los pulmones. Pero, aunque lo anterior mejora la recarga de oxígeno, no mejora su descarga a los tejidos que lo necesitan y todo el proceso se vuelve ineficiente, a pesar de haber incrementado la frecuencia respiratoria.

Para recalibrar el sistema y permitir una descarga de oxígeno más eficaz a los tejidos, y bajo las mencionadas condiciones de acidez y temperatura tisular, los glóbulos rojos, bajo presión también de la hipoxia, empiezan a producir una molécula derivada de su metabolismo conocida como 2,3 difosfoglicerato. Esta molécula se une al estado inactivo de la hemoglobina e inclina la balanza hacia la conformación inactiva de la hemoglobina, para permitir una entrega adecuada de oxígeno a los tejidos.

Aunque todos los mamíferos utilizamos la molécula del difosfoglicerato, otros animales se valen de diferentes “trucos” metabólicos; por ejemplo, las aves utilizan el inositol pentafofato, el cual, al igual que el difosfoglicerato, se une a la conformación inactiva de la hemoglobina haciendo que libere oxígeno en el tejido que se requiere. Como podemos darnos cuenta, los procesos fundamentales se mantienen y varían poco entre las especies.

La hemoglobina es, sin lugar a dudas, el ejemplo más completo de cómo la estructura (conformación tridimensional de la molécula) afecta en la fisiología y de cómo la estructura y la fisiología han sido modificadas en el transcurso de la evolución.

A continuación analizaremos las modificaciones evolutivas que han surgido en el equilibrio entre las formas activa e inactiva de la hemoglobina. En el transcurso de la evolución, la hemoglobina ha estado sujeta a varias modificaciones que han permitido que los animales se adapten a nuevas condiciones fisiológicas. En el caso especial de los mamíferos se han dado soluciones a los problemas generados por el desarrollo placentario con los cuales el feto, localizado lejos de los pulmones de su progenitora, compite contra los tejidos maternos por una cantidad adecuada de oxígeno. Por lo general, los glóbulos rojos fetales de los mamíferos producen menos difosfoglicerato que los glóbulos rojos maternos. Por lo tanto, la hemoglobina de los glóbulos rojos fetales tiende a conformarse al estado activo permitiéndoles cargarse de oxígeno a expensas de los tejidos maternos circundantes.

Los primates evolucionaron una segunda hemoglobina, una variante genética de la primera para poderla usar en la fase fetal del desarrollo. Las principales cadenas de la hemoglobina, alfa y beta, se originaron hace cerca de 450 millones de años en los peces, cuando el gen ancestral de la globina se duplicó y presentó una divergencia en su secuencia de nucleótidos. Luego el gen de la cadena beta se duplicó nuevamente y presentó otra divergencia hace 150 millones de años, durante el Jurásico, lo cual dio lugar a la variante fetal en la línea de los mamíferos más antiguos, a partir de los cuales, varios millones de años después, se originaron los primates. La hemoglobina fetal de los seres humanos presenta la misma afinidad por el oxígeno que la hemoglobina de los adultos, pero, debido a los sutiles cambios en la secuencia de aminoácidos, la hemoglobina fetal se une pobremente al difosfoglicerato y por esto tiende a permanecer en su estado activo. Dado que el difosfoglicerato en la circulación materna inclina la balanza de la hemoglobina materna hacia el lado de la hemoglobina inactiva, la hemoglobina fetal humana puede “robar” el oxígeno de la circulación materna, debido a su insensibilidad al difosfoglicerato.

Las vacas y las ovejas presentan algo similar desde hace 50 millones de años: la hemoglobina no se ve afectada por el difosfoglicerato sino por fosfatos en los glóbulos rojos. Ahora, no debe sorprendernos que existan muchas maneras de alterar el equilibrio de las conformaciones de la hemoglobina, todas con el mismo resultado y basándose en el principio o proceso fundamental que tiene la hemoglobina de manifestarse en dos formas diferentes, dependiendo de las necesidades de los sistemas orgánicos; se trata de un proceso evolutivo fundamental.

Una de las adaptaciones hereditarias más impresionantes de la hemoglobina es la que tiene un tipo de ganso (el ánsar calvo o *Anser indicus*), que vuela sobre la cordillera del Himalaya a una altitud de 9 200 metros sobre el nivel del mar (es la altura a la que vuelan los *jets* comerciales); a esa altitud se cuenta con sólo 29% del oxígeno del que se cuenta a nivel del mar. Un solo cambio en la secuencia de aminoácidos de la hemoglobina de este ganso le confiere la característica de man-

tener la conformación de la misma en su estado activo en ausencia de oxígeno y así su hemoglobina carga mejor el oxígeno aun a bajas presiones del mismo. Si esta mutación se presentara en la hemoglobina de los seres humanos, sucedería exactamente lo mismo: cambiarla en su mayoría al estado activo. Es conveniente recordar en este momento que los cambios en la secuencia de aminoácidos obedecen invariablemente a variaciones en la genética.

A partir de los ejemplos anteriores, es obvio concluir que los animales pueden utilizar dos estrategias diferentes, una basada en la genética y otra basada en la fisiología, cuya finalidad es la de modificar la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno en respuesta a la hipoxia, incluyendo la forma de hipoxia que se observa normalmente en el feto. Ambos mecanismos tienen su fundamento en el intercambio preexistente de dos formas de hemoglobina (conformaciones), que pueden intercambiarse del estado activo al inactivo y viceversa, cargando y descargando oxígeno. Si pensamos ahora en uno de los grandes inventos de la evolución, nos percataremos de que este proceso fundamental es muy antiguo y se ha conservado desde entonces, y además se modifica sin perder la esencia de su existencia. Éstas son las dos caras del genoma.

Un ejemplo más es la llama adulta de la cordillera de los Andes, capaz de vivir a grandes altitudes gracias a que su hemoglobina presenta una afinidad muy reducida a las moléculas que contienen fosfatos (como la hemoglobina fetal de los primates). Estas adaptaciones se dan gracias a pequeños cambios moleculares que traen consigo enormes beneficios para los organismos. Pequeños cambios genéticos (variaciones genéticas) pueden traer como consecuencia una gran cantidad de efectos sobre la variación fenotípica, y todas las novedades fenotípicas son reorganizaciones de fenotipos preexistentes que, a su vez, han sido determinados por el genotipo. Es muy importante recordar que la evolución puede desarrollar nuevas formas de adaptación en los organismos gracias a que el conjunto de todos los sistemas vivientes ha sido construido con unas características espectaculares: sus capacidades para expresar variaciones.

Ahora analizaremos directamente algunos de los procesos fundamentales que se han conservado a lo largo de miles de millones de años, responsables de generar la mayoría de las características anatómicas, fisiológicas y conductuales de los organismos. Estos procesos bioquímicos fundamentales evolucionaron desde hace 3 000 millones de años y, a lo largo de la historia, han incluido el metabolismo, la expresión genética y las señales y mensajes entre las células. Dichos procesos presentan dos características importantes: son conservadores y económicos. Son conservadores porque prueban que los mecanismos genéticos que codifican para la formación de RNA y éste, a su vez, para la síntesis de proteínas, se conservan en todos los seres vivos y, a pesar de que han demostrado ser responsables de innovaciones importantes, su estructura funcional se ha mantenido prácticamente sin cambios; son económicos porque unos pocos genes son capaces de for-

mar organismos simples y complejos; recordemos que los seres humanos tienen 22 500 genes: casi una vez más que la mosca de la fruta.

Estas dos características sugieren que la complejidad debe surgir a través del uso múltiple de relativamente pocos elementos que se han conservado desde hace miles de millones de años.

LA RESPUESTA DEVELADA POR MONOD

La clave para el entendimiento de uno de esos procesos fundamentales surgió a partir de los estudios experimentales que Jacques Monod y François Jacob realizaron en los decenios de 1960 y 1970 sobre el funcionamiento de los genes de las bacterias. Así es, los resultados obtenidos por Jacob y Monod sobre biología molecular y con respecto al funcionamiento de los genes en las bacterias tuvieron una fuerte repercusión en el estudio de los fenómenos evolutivos. Las bacterias poseen circuitos metabólicos relativamente sencillos; por otro lado, las células de los eucariontes han evolucionado a una mayor complejidad y versatilidad en esos circuitos pero, en esencia, algunos de los principios bioquímicos establecidos en las bacterias se aplican también en los organismos más complejos. El estudio acerca del metabolismo de las bacterias representa cuán compleja puede llegar a ser la biología en lo que concierne a la adaptación y a la aparición de ciertas características fenotípicas controladas por pequeñas moléculas. Gracias al estudio del metabolismo bacteriano se ha descubierto también cómo es que se llevan a cabo los procesos de regulación en los genes.

Para lograr entender cómo es que se dan los cambios y las novedades fenotípicas en los animales (evolución) es indispensable entender su desarrollo embrionario. El trabajo de investigación realizado en las bacterias reveló de una manera sorprendente que, como en el metabolismo bacteriano, muchos de los complicados procesos que se observan en el desarrollo embrionario dependen de señales relativamente simples mediadas por moléculas muy pequeñas. En las bacterias, que son organismos constituidos por una célula, muchas de las señales que reciben provienen de los ingredientes del medio ambiente. Pero en los organismos multicelulares, muchas de las señales que reciben consisten en pequeñas moléculas que se sintetizan en otras células del mismo organismo y, aunque simples en su composición, dichas señales son capaces de regular los circuitos más complejos del desarrollo, tales como los que se llevan a cabo para darle forma y función al tremendamente elaborado sistema nervioso central.

Son muy poderosas las implicaciones que tiene todo lo anterior en la evolución, ya que si esas señales tan simples son de vital importancia para que se lleve a cabo el desarrollo tan complejo de un animal, entonces quiere decir que los cam-

bios observables en ese desarrollo complejo pudieran deberse a sutiles cambios, tanto en la cantidad como en la localización, de tales señales sencillas y no a grandes cambios en los procesos complejos y altamente integrados.

Veamos en qué consistió el descubrimiento del biólogo molecular francés Jacques Monod (1910–1976), que después de terminar la Segunda Guerra Mundial, y trabajando en el Instituto Pasteur, se dedicó al estudio del metabolismo. Cultivó la bacteria *Escherichia coli* (que normalmente se halla en el interior de los intestinos) con diferentes azúcares y se enfrentó con una afortunada paradoja: el índice de crecimiento de la *Escherichia coli* en una mezcla de dos azúcares no era igual al índice de crecimiento que se daba cuando crecía por separado en cada uno de los diferentes azúcares. Es decir, que la bacteria no utilizaba de manera indistinta cualquiera de los dos azúcares para alimentarse, sino que cuando se encontraba en el cultivo con los dos azúcares primero se alimentaba de un azúcar hasta agotarla, luego hacía una pausa, para posteriormente iniciar el consumo del otro azúcar y continuar así con su desarrollo (figura 2–5). Para poder crecer en los azúcares, la bacteria necesita tener enzimas para degradarlos, o digerirlos. Monod encontró que al principio la bacteria no contaba con dichas enzimas, sino que primero sintetizaba un tipo de enzima para degradar específicamente uno de los dos

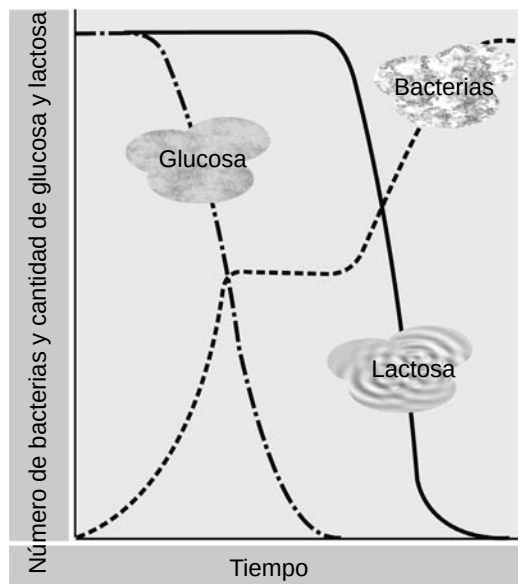


Figura 2–5. El experimento de Monod. Las bacterias se reproducen nutriéndose con glucosa. Cuando la glucosa se acaba entonces hacen una pausa y luego reinician su crecimiento, pero a base de consumir lactosa.

azúcares y, posteriormente, producía el otro tipo de enzima para degradar el otro azúcar. Monod necesitaba explicar por qué razón la bacteria consumía los dos diferentes azúcares de manera secuencial, en lugar de consumirlos de manera simultánea. Es como si a una persona le sirven un plato de carne y arroz, y en lugar de comer la carne y el arroz de manera simultánea primero come el arroz, hace una pausa y luego come la carne.

La respuesta fue la siguiente: uno de los azúcares estimula, de manera preferente, a la bacteria para que produzca la enzima necesaria para su degradación y al mismo tiempo inhibe a la bacteria para producir la otra enzima encargada de degradar el otro azúcar. Resultó en la revelación de una de las formas más exquisitas de adaptación fisiológica que los organismos tienen la capacidad de cambiar las proteínas que producen (parte del fenotipo) como respuesta a cambios en las condiciones ambientales en las que se encuentran. Jacques Monod escogió el azúcar de la leche, la lactosa y la enzima que la degrada, la lactasa, también conocida como beta galactosidasa. Las personas intolerantes a la lactosa (intolerancia a la leche) lo son porque no la pueden digerir, dado que no producen la enzima lactasa que se encarga de su procesamiento. Así, continuando con sus estudios, Monod se encontró con que la beta galactosidasa no se almacenaba en forma inactiva para luego activarla cuando se requiriera de ella, sino que cada vez que se necesitaba era sintetizada de nuevo a partir de los aminoácidos disponibles. Concluyó entonces que la adaptación (producción de enzimas en caso necesario) para digerir los azúcares no consistía en un proceso de *activación* de una enzima preexistente sino de un proceso de *síntesis* de la enzima requerida. A fin de cuentas, la regulación en la producción de la enzima radicaba en la síntesis de RNA a partir de la transcripción basada en la información contenida en el DNA. La bacteria se adaptaba de acuerdo con el momento produciendo más o menos cantidad de determinada enzima. A este fenómeno se le denominó inducción enzimática.

Lo extraordinario de este descubrimiento fue que, a pesar de ser otro ejemplo de adaptación fisiológica, la inducción enzimática involucraba a la síntesis de una proteína que estaba conectada con los genes que, de manera directa, la codificaban. Para ese entonces no se sabía cómo un organismo podía sintetizar de manera tan selectiva una sola proteína de entre todas las que podía sintetizar mediante la información contenida en todo su DNA. Una posibilidad era que cada proteína tuviera su propio mecanismo de inducción, pero era más creíble que la mayoría de las proteínas fueran sintetizadas constantemente. Las proteínas que podían ser sintetizadas constantemente, como la beta galactosidasa, tal vez dejaban de serlo en momentos específicos.

Monod pensó que cada una de las proteínas que se sintetizaban podía ser inhibida (en su síntesis) por proteínas inhibitoras específicas, proteínas *represoras*, mismas que la célula sintetizaba de manera constante. Así, en presencia de lactosa, ésta se uniría a la proteína represora y la desprendería de la cadena de DNA,

liberando la inhibición y permitiendo que se sintetizara beta galactosidasa. En otras palabras, la lactosa sería la responsable de inducir la producción de su propia enzima degradadora mediante la liberación del mecanismo represor de la beta galactosidasa. Desde este punto de vista, no existen inductores como tales, sino únicamente represores. La activación de un gen se lleva a cabo mediante el antagonismo del represor. El colega de Monod, François Jacob, especuló, correctamente, que también deberían existir activadores verdaderos con la capacidad de unirse al DNA y que deberían activar genes específicos que logran producir el correspondiente RNA, para luego sintetizar a una proteína.

Los detalles de todos estos procesos fundamentales se aclararon muy pronto: la proteína represora para la síntesis de beta galactosidasa se unía a una secuencia corta y muy específica sobre la cadena de DNA, localizada muy cerca de donde inicia la secuencia de DNA responsable de la síntesis para la beta galactosidasa. Con la unión de la proteína represora a dicha secuencia no es posible que se lleve a cabo la transcripción del RNA para poder producir la enzima, ya que el mismo represor bloquea el sitio donde actúa la polimerasa (enzima catalizadora) de RNA para que, al activarse, inicie la transcripción. Cuando hay lactosa en el medio ambiente, se une a la proteína represora que se encuentra sobre la cadena de DNA, lo cual ocasiona que cambie su conformación tridimensional y la desprendida de la cadena, dejando libre una secuencia adyacente donde pueda actuar (ahora sí) la polimerasa de RNA para inducir la expresión del gen encargado de producir beta galactosidasa (transcripción); se sintetiza entonces el RNAt y luego el RNAm, y en los ribosomas se produce la enzima que degradará a la lactosa. De esta forma, muchas moléculas, como la lactosa, regulan su propio metabolismo; ninguna se une directamente al DNA, sino que todas actúan de manera indirecta a través de las proteínas represoras (figura 2-6).

La regulación en la actividad genética y los mecanismos mediante los cuales se activan o se desactivan los genes (se prende o se apaga su expresión) se dan principalmente mediante genes reguladores que, a su vez, se encuentran reprimidos. El problema en la regulación de la expresión genética es particularmente complejo en los organismos multicelulares; por ejemplo, los seres humanos adultos cuentan con por lo menos 300 tipos de células diferentes y un total aproximado de 100 trillones de células, conectadas todas de una u otra manera. Lo sorprendente es que, mediante la expresión de tan sólo un grupo de genes, cada tipo de célula produce un perfil limitado de proteínas responsables de la actividad que a su vez le proporciona su identidad. Recordemos que cada célula de nuestro organismo contiene toda la información genética derivada de la unión de un óvulo con un espermatozoide, y cuenta entonces con la capacidad de diferenciarse en cualquier tipo de tejido. Gracias al mecanismo de regulación de la expresión genética, las células tienen la capacidad de expresar sólo los genes necesarios para caracterizar una identidad particular, dependiendo del tejido donde se encuentren

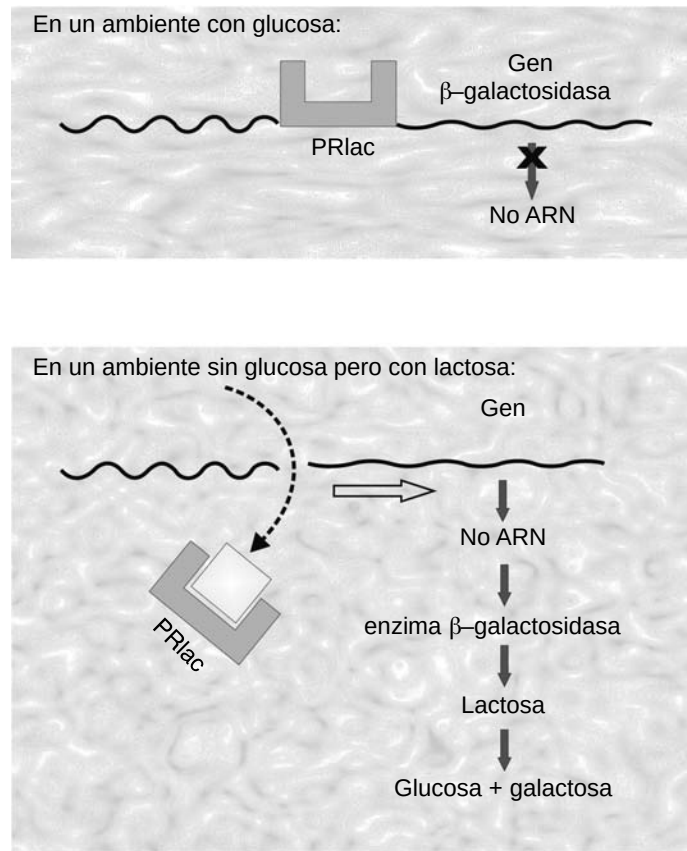


Figura 2-6. Explicación a los hallazgos encontrados por Monod. En un ambiente con glucosa, la proteína represora de lactosa (PRLac) inhibe la expresión del gen β -galactosidasa; en un ambiente con lactosa (L) la PRLac se desprende de la cadena de DNA y se libera la represión para que pueda expresarse el gen β -galactosidasa y se produzca la enzima que desdoblara a la lactosa en glucosa y galactosa.

(huesos, músculos, sistema nervioso, etc.); los demás genes permanecen reprimidos. Por ejemplo, existe un tumor llamado teratoma, en el cual los genes que deben estar reprimidos se expresan; el resultado es que, contenido en dicho tumor, pueden observarse varios tipos de tejidos diferentes como dientes, cabello, piel, hueso y otros. La regulación en la expresión genética de los eucariontes es quizá el proceso fundamental más poderosamente conservado y responsable de la mayoría de la variación fenotípica sobre la cual actúa la selección natural.

La regulación en la expresión genética es, pues, uno de los procesos fundamentales críticos para generar variación en el fenotipo, gracias a la facilidad

(como veremos más adelante) con la que se pueden modificar los factores que regulan a los genes que, a su vez, están directamente relacionados con la capacidad de generar nuevos patrones de expresión genética para que se dé la evolución. El proceso del desarrollo embrionario de los organismos multicelulares es un terreno fértil para que se presente la variación anatómica, ya que los patrones de regulación genética son los encargados y responsables de que se lleve a cabo dicho proceso, tanto de manera espacial como temporal. En la actualidad es posible establecer, de manera más directa, las relaciones en la expresión de diversos genes individuales con la finalidad de responder dos de las preguntas que constituyeron el principal dilema de Darwin: ¿cómo es que se genera la anatomía de un organismo multicelular durante el desarrollo embrionario? y ¿cómo surge un cambio en el desarrollo para dar origen al proceso evolutivo?

Jacob y Monod esperaban que la aparentemente simple explicación de la inducción enzimática observada en las bacterias pudiera servir como modelo para poder entender los complejos procesos de lectura o expresión genética tan selectiva que se llevan a cabo en el genoma durante el desarrollo embrionario. Ahí, en el embrión, los inductores no serían los azúcares del medio ambiente, como en el descubrimiento de la *Escherichia coli*, sino señales químicas proteicas generadas por otras células dentro del mismo embrión. Los dos científicos demostraron, al menos de manera teórica, que los complejos circuitos que rigen el desarrollo del embrión podrían estar o ser contruados a partir de varios interruptores simples, interconectados e interrelacionados de diversas maneras. Así que, aunque la genética y la embriología habían seguido caminos muy diferentes durante la primera mitad del siglo XX, se volvían a encontrar en un solo camino concerniente a resolver dos preguntas de la expresión genética: ¿cómo es posible que las células de un tipo de tejido expresen un solo grupo de proteínas que corresponden a la función específica que desempeñan? y ¿cómo es posible que los patrones de expresión genética puedan cambiar en el transcurso de la evolución?

Prematuramente, para el año de 1934, el cazador de moscas T. H. Morgan estableció una respuesta parcial con base en sus estudios sobre la *Drosophila melanogaster*; dijo: “las diferencias que se pueden observar inicialmente durante el desarrollo del embrión, en cuanto a las regiones del protoplasma, podrían afectar la actividad de los genes correspondientes. A su vez, los genes pueden afectar, de una u otra manera, a las diversas regiones del protoplasma, lo cual inicia una serie de reacciones recíprocas, de manera que así se puede continuar con la elaboración y diferenciación gradual de varias de las regiones anatómicas del embrión”.

El modelo teórico de Morgan sonaba muy parecido al de la inducción enzimática secuencial, en la cual los inductores podían ser los materiales contenidos o producidos por las células y las enzimas inducidas (las producidas o productos de dicha inducción) serían todas aquellas proteínas específicas del estado adulto o diferenciado de la célula. ¿Sería el simple modelo de inducción enzimática des-

cubierto en las bacterias la respuesta a la grandísima pregunta sobre cómo es que se desarrolla un animal a partir de un huevo fecundado o cigoto? Si es que era así, entonces sería un modelo íntimamente relacionado con la variación en el fenotipo, ya que es el fenotipo el que se construye durante el desarrollo del embrión.

Una de las principales repercusiones del modelo de Jacob y Monod fue la de explicar cómo una respuesta compleja podía ser el resultado de una simple y permisible señal. La lactosa es una señal muy simple que trae como resultado una respuesta muy compleja: la producción de una enzima, la beta galactosidasa, constituida por más de 4 000 aminoácidos ensamblados con una secuencia muy específica. La pregunta era: ¿la lactosa informa a la célula cómo debe hacer o sintetizar a la enzima? No, el sistema de síntesis de la célula, partiendo de la información contenida en ella, era capaz de lograrlo. La señal inducida por la lactosa simplemente liberaba el bloqueo impuesto por el represor, mismo que de por sí cuenta con una estructura proteica compleja. Una vez que el represor era removido de la cadena del DNA, se echaba a andar toda la maquinaria de transcripción y se empezaba a construir la proteína (enzima) de acuerdo con el diseño guardado en la secuencia de nucleótidos del DNA. Así, la inducción para la producción de beta galactosidasa por parte del azúcar lactosa consistía en una interacción de tipo más bien permisivo.

Aunque esta señalización permisiva trabajaba muy bien para la regulación en la producción de beta galactosidasa, no era, para la mayoría de los biólogos, lo suficientemente convincente para explicar que el desarrollo embrionario siguiera este mismo patrón de inducción, activado de manera permisiva. Se pensaba entonces que el desarrollo del embrión era algo mucho más complejo, cuya finalidad era la creación de todo un ser organizado, con cientos de tipos de células y una gran variedad de órganos, todos en su sitio adecuado y funcionando de manera orquestada, casi a la perfección. Al final, y para sorpresa de todos, la inducción embrionaria se daba lugar mediante el mismo proceso permisivo que el observado en las bacterias. La compleja organización de un ser provenía de señales muy simples.

¿Qué es entonces un inductor embrionario? Es sencillamente una colección de proteínas secretadas que, de manera muy localizada, se unen y funcionan antagónicamente a la señal del represor. En la vecindad o en las células adyacentes a donde se encuentran, los antagonistas se liberan entonces de la represión y desarrollan el tejido y los órganos que tienen que desarrollar, dependiendo de los sitios embrionarios donde se localicen.

Nos preguntaremos ahora cómo es posible que las proteínas logren realizar tales funciones. Bueno, resulta que ellas tienen una propiedad conocida como alosterismo, que en bioquímica quiere decir que cuentan con dos sitios para interactuar con otros químicos: uno es el lugar de acción de tal proteína y el otro es el lugar donde se regula la función que desempeña. Por lo tanto, poseen partes fun-

cionales y partes reguladoras que, al entrar en relación con otras proteínas se logran llevar a cabo muy diversas vías de funciones que van desde la proliferación celular hasta la síntesis de las mismas proteínas, desde el metabolismo hasta la regulación de la frecuencia cardíaca y desde la inflamación hasta la regulación de la muerte celular programada, conocida como apoptosis, entre muchas otras. Con el poder de las proteínas se integra entonces una red impresionante de información y funciones celulares e intercelulares en todos los organismos; recientemente se ha designado a todo este conjunto de proteínas y sus funciones “proteoma”, una analogía a lo que los genes son para el genoma.

La explicación anterior acerca del alosterismo de las proteínas viene al caso porque las proteínas represoras son proteínas alostéricas, como la que se une por un sitio al DNA y por el otro sitio a la lactosa. Así, cuando la lactosa se une al represor (proteína represora), éste cambia de forma y disminuye su poder de unión con la cadena de DNA, se separa de él por el mismo motivo, desaparece la represión y entonces el gen se activa o “se prende” y empieza a darse el fenómeno de la transducción para que se sintetice la enzima beta galactosidasa. A la capacidad que tienen las proteínas para cambiar de forma o estructura tridimensional, ejerciendo así funciones diferentes, se le conoce como “conformaciones alternativas”. Recordemos el caso de la hemoglobina.

El concepto de alosterismo, o el uso de sitios alternos por parte de las proteínas para unión y regulación, le han brindado a la evolución una versatilidad insospechada porque facilitan las posibilidades de inducir variabilidad mediante la activación e inhibición de los genes. Estas funciones, así como la transcripción del DNA en RNA y la propagación de todas las señales mediante el uso de las proteínas, son procesos fundamentales que se han conservado celosamente a lo largo de toda la historia viva de nuestro planeta, y sus conexiones reguladoras son de las que más se han diversificado en biología, puesto que cada gen, o más bien dicho cada nuevo gen que se presenta en la evolución, forzosamente debe estar ligado a un programa de regulación de la transcripción y, más aún, los genes ancestrales pueden seguir siendo afectados por cambios en esa regulación. Cada vez que se da una novedad evolutiva estos procesos invariablemente deben cambiar. Esto es, el momento o el tiempo y lugar donde se expresan los genes involucrados en el desarrollo del embrión a menudo son los mismos en especies diferentes, pero la secuencia de DNA en las regiones reguladoras de estos genes ha cambiado de manera importante.

En otras palabras, las funciones del desarrollo se mantienen pero las secuencias reguladoras pueden cambiar, así que, si las condiciones de selección natural cambian, entonces un cambio rápido en las secuencias reguladoras quizá pueda generar un cambio en el momento y en el lugar de la expresión de un gen, y con esto un nuevo fenotipo. Jacob y Monod recibieron el premio Nobel de fisiología y medicina en 1965.

LA MODULARIDAD

Cuando observamos a los animales apreciamos en sus formas ciertos aspectos modulares y repetitivos, que reflejan un orden en su apariencia. Los anatomistas siempre han mencionado que no importa cuán diversas sean las apariencias externas de los diferentes animales, sino que internamente los cuerpos y sus partes se configuran con base en ciertas zonas bien definidas, tales como cabeza, cuerpo, extremidades, cola, hígado, estómago, corazón, pulmones, etc., y debido a esta apreciación se empezó a incubar la idea de que la evolución se daba entonces sobre variaciones en algunas zonas básicas.

William Bateson, quien recordemos que fue un gran anatomista comparativo, se percató de que los animales estaban constituidos por partes hasta cierto punto repetitivas, y también se dio cuenta de que muchas de esas partes repetitivas estaban constituidas por unidades que a su vez se repetían. Por ejemplo, en los vertebrados, la columna vertebral es un módulo que se repite en todos ellos, y que a su vez está constituido por ciertas unidades repetitivas que son las vértebras, las cuales pueden variar en número (12 en las ranas, 33 en los seres humanos o algunos centenares en las serpientes), en forma (cervicales, torácicas, lumbares, sacras y caudales), en tamaño y en estructuras relacionadas (costillas), entre otras cosas. Bateson advirtió también que cuando se comparan las partes corporales entre diferentes especies es muy importante reconocer que en ese momento se están comparando partes correspondientes. Así pues, los miembros superiores o torácicos de una salamandra, un ratón o un ser humano corresponden a partes “homólogas”; cuando se habla de los miembros superiores en relación con los miembros inferiores, entonces se trata de partes “homólogas seriales”. Decidimos mencionar lo anterior en este momento porque los cambios observables en el número y en el tipo de las partes homólogas y homólogas seriales son tema principal en términos de la evolución animal, el cual se trata con mayor detalle a continuación.

Además de la repetición de las partes modulares, los cuerpos de los animales muestran otras dos características importantes: la simetría (que puede ser bilateral, como en la mayoría de los animales, o radial, como en los equinodermos) y la polaridad, también conocida como sentido de orientación para las células, órganos y tejidos, es decir, mediante el cual se tiene definido lo que es anterior o posterior, arriba o abajo, adelante o atrás, derecho o izquierdo, y proximal o distal. Entonces podemos decir que la repetición de las partes modulares (modularidad), la simetría y la polaridad son características casi universales en el diseño de los animales.

William Bateson fue un gran coleccionista de especímenes y contaba con un gran número de piezas con malformaciones, seres monstruosos que estudió profundamente para luego clasificar sus anormalidades en dos tipos básicos: los especímenes en los que el número de las partes repetitivas o modulares estaba alte-

rado, por ejemplo si tenía más patas de lo normal, y aquellos en los que una parte del cuerpo estaba transformada en otra que semejaba una diferente pero bien formada, de manera que se podía distinguir claramente cómo una antena estaba transformada en una pata bien formada. Bateson denominó a este tipo de transformaciones o malformaciones “variantes homeóticas”. La palabra *homeo* proviene del latín y significa “igual o similar”. La malformación del ejemplo de la mosca con una pata bien formada en lugar de una antena en la cabeza se denomina entonces “variante homeótica”.

Con los experimentos de Morgan en la *Drosophila melanogaster* se logró inducir mutantes espectaculares, variantes homeóticas como la de que una mosca desarrollara patas en lugar de antenas; esta malformación se conoce como *mosca antennapedia*. Los biólogos comenzaron a darse cuenta de que las variantes homeóticas podían transformar por completo toda una estructura en otra, es decir, que en el caso de la mutación *antennapedia* el destino de toda una estructura se altera, no es que la antena, en su malformación se viera diferente o “como si la antena pareciera una pata”, sino que, en realidad, en lugar de una antena se formaba una pata perfecta; la pata se posicionaba en un lugar equivocado. Después se descubrió que cada transformación era consecuencia de una mutación genética. Así, en la *Drosophila melanogaster*, un pequeño número de genes daban lugar a las variantes homeóticas cuando mutaban. Esta observación indicaba que un número reducido de genes “maestros” eran los responsables de la diferenciación de las partes corporales homólogas seriales en la mosca de la fruta. El descubrimiento fue sorprendente, las variantes homeóticas, esas extrañas transformaciones de los seres monstruosos, debían dicha malformación a mutaciones genéticas que tenían la capacidad de transformar una parte corporal en otra.

Los enigmas que surgieron por resolver fueron: ¿cómo era posible que el cambio en un gen pudiera alterar de manera tan dramática toda una parte del cuerpo? y ¿cuál es el trabajo o función “normal” de estos fascinantes genes? Los genes responsables de las variantes homeóticas se localizaron en el cromosoma número tres (de cuatro con los que cuenta la mosca de la fruta); tres genes, conocidos como “complejo bitórax”, se encargan de regular el desarrollo de la mitad posterior de la mosca, mientras que cinco genes, conocidos como “complejo antennapedia”, regulan el desarrollo de la mitad anterior. Cada uno de los complejos corresponde a un racimo de genes agrupados en cierta región del DNA. Ahora, cada uno de los ocho genes homeóticos mencionados está conformado, a su vez, por más o menos 1 000 bases nitrogenadas que codifican sus correspondientes y diferentes proteínas homeóticas. Además, los ocho genes homeóticos cuentan con un pequeño segmento de 180 pares de bases nitrogenadas en cuya secuencia son muy similares entre sí. Esta secuencia genética compartida por los ocho genes homeóticos codifica entonces para una región similar en cada una de las ocho proteínas; la región o dominio corresponde a una secuencia de 60 aminoácidos

que es igual en las ocho proteínas. Se sugiere entonces que cada gen homeótico, con su correspondiente proteína homeótica, comparte cierta propiedad funcional a pesar de que cada uno de ellos, por separado, ejerce un efecto diferente y muy específico en el desarrollo de alguna parte o región corporal en particular. Debido a que la secuencia compartida de las 180 bases nitrogenadas dispuestas a lo largo de una pequeña sección en cada uno de los genes homeóticos conforma lo que puede parecer una pequeña “caja”, similar en los ocho genes, en contraste con las otras secuencias largas y muy diferentes de DNA, se decidió nombrarlos “homeocaja” (del inglés *homeobox*), y a la proteína correspondiente, a la que codifica, se le denominó “homeodominio” (del inglés *homeodomain*); posteriormente, y para simplificar la nomenclatura, a los genes homeobox se les llamó genes Hox.

Continuaron las investigaciones y posteriormente se descubrió que el homeodominio (proteína producida por los genes Hox) tenía un parecido sorprendente con la proteína represora para la síntesis de beta galactosidasa de la bacteria *E. coli*; por lo tanto, las proteínas homeóticas (homeodominios) podrían ejercer su acción sobre las secuencias de DNA que, a su vez, se encargan de regular la expresión de los genes contiguos. A los genes reguladores sobre los cuales actúan las proteínas homeóticas, para que activen o desactiven la expresión de los genes adyacentes, se les conoce también como interruptores. La actuación de las proteínas homeóticas sobre los interruptores genéticos de activación y desactivación durante el proceso del desarrollo embrionario en los animales podría ser la manera como éstos (los interruptores) afectan o regulan la formación y dan identidad a todas las partes corporales.

Vale la pena aclarar que los genes Hox han sido encontrados en todos los animales, incluidos los seres humanos. Incluso al examinarlos detalladamente se logró demostrar que las proteínas Hox del ratón y de la rana eran idénticos a los de la mosca de la fruta en cuanto a la secuencia de sus aminoácidos, lo cual llevó a concluir que los genes Hox son tan importantes que sus secuencias (en las bases nitrogenadas) se han preservado desde la explosión del Cámbrico (hace aproximadamente 550 millones de años) hasta nuestros días, a pesar de haber seguido líneas evolutivas tan diferentes. Con esto también podemos ver que la profunda similitud entre los diferentes animales no sólo se extiende a la secuencia de sus genes, sino también a la manera como son utilizados durante la etapa embrionaria del desarrollo. Los racimos de los genes Hox, que moldean el desarrollo de los animales por diferentes que sean (mosca, ratón o rana), se encuentran en todos los animales, incluidos los humanos.

Se sabe entonces que estas proteínas Hox (homeodominios) se encargan de regular, mediante su acción en diferentes interruptores para la expresión de genes (activación y desactivación), el desarrollo embrionario de los diferentes órganos. Sin ellas se colapsa por completo el proceso del desarrollo de los diferentes órganos y tejidos (figura 2–7).

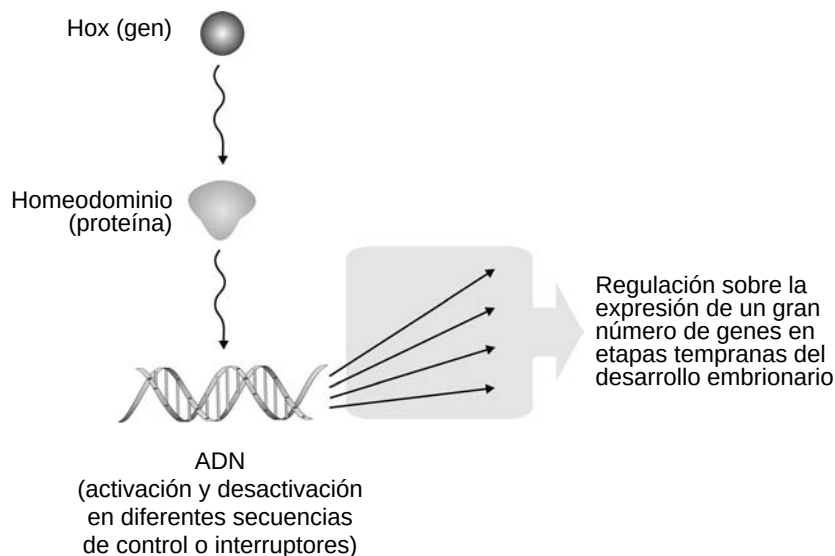


Figura 2-7. Los genes Hox, a través de sus productos (homeodominios) regulan la expresión (activación y desactivación) de una gran cantidad de genes mediante su acción sobre los interruptores de los mismos. Este mecanismo se lleva a cabo en las etapas tempranas del desarrollo embrionario.

Finalmente, los genes Hox resultaron ser genes que regulan a muchos otros genes, que finalmente cumplen con la tarea específica para la cual están programados. En los insectos, los vertebrados y muchos otros animales, el mismo grupo de genes controla la formación y el patrón de diferentes regiones y partes corporales con funciones similares, pero con diseños terminados muy diferentes. Lo anterior ha forzado a los científicos a replantear nuevamente la historia natural de los animales, el origen de las estructuras y la naturaleza de la diversidad. Por ejemplo, existe un gen llamado *Hox Pax-6*, el cual se encarga de desarrollar el ojo de la mosca. Si el gen *Hox Pax-6* se trasplanta a un ala de la mosca entonces se desarrolla y hace crecer un ojo de mosca en el ala. Si este gen muta o cambia, el resultado no es un ojo deforme, sino que simplemente el ojo no se desarrolla. Ahora, existe un gen en el ratón denominado “*small eye*”, cuya función es la de desarrollar el ojo del ratón; si el gen *small eye* del ratón se trasplanta a una mosca, sucederá algo increíble: el gen del ratón induce, en la mosca, la formación de un ojo de mosca, no un ojo de ratón, como pudiéramos haber imaginado.

Entonces, nuevamente se corrobora que los genes Hox (los mismos en especies diferentes) se encargan de regular la función de muchos otros genes, los cuales realizarán funciones particulares. Los biólogos se dieron cuenta de que, utilizando los mismos genes, los organismos pueden desarrollar anatomías muy

diferentes. ¿Cómo esos genes tan asombrosos pueden transformar un simple huevo fecundado en un animal tan complejo? Surgieron muchas preguntas más, sobre todo al observar detenidamente el desarrollo de un embrión. ¿Cómo sabe el embrión qué parte va a formar la cabeza y qué región formará la cola? ¿Cuál será la parte superior y cuál será la parte inferior? ¿Cómo decide en dónde se van a colocar los ojos, las piernas o las alas? Si pensamos un poco más sobre el futuro potencial del huevo fecundado, mismo que formará músculos, nervios, sangre, huesos, piel, hígado, corazón, oídos, etc., todos en su lugar y funcionando adecuadamente, debemos preguntarnos también: ¿en qué momento del desarrollo embrionario se define el destino de las células? Se ha llegado a desarrollar una gran variedad de técnicas en los laboratorios de investigación sobre la biología del desarrollo, y una de las que mayor información han proporcionado consiste en marcar células individuales con determinados colorantes (que no dañan a las células) y luego de un tiempo predeterminado observar en qué parte del embrión se posiciona tal o cual célula, al igual que sus células hijas. Esta metodología les ha permitido a los embriólogos construir mapas de destino celular en los embriones durante las etapas tempranas del desarrollo, ya que revelan la posición relativa de las células que en un futuro darán lugar a ciertas estructuras en particular. Luego, de manera análoga a las longitudes y latitudes de un globo terráqueo, se identifican diferentes coordenadas en los embriones, cuya finalidad es la de definir la posición futura de los tejidos, órganos y apéndices.

En algún momento del desarrollo embrionario las células “saben” en cuál región del embrión se encuentran localizadas y, por lo tanto, en cuál tejido o estructura se va a diferenciar o especializar. Recordemos que todas las células descenden de un huevo fertilizado o cigoto inicial. Obviamente, debe existir una gran cantidad de información que se genera y se difunde en el curso del desarrollo embrionario para lograr dirigir docenas de tipos celulares, tejidos y órganos en posiciones específicas.

La geometría de un embrión, con su sistema de coordenadas y mediante las intersecciones entre paralelos y meridianos, impone cierto orden espacial para que los genes, responsables de coordinar el desarrollo, se expresen adecuadamente. Ya sea para dar forma a una mosca de la fruta o a un gran mamífero como la ballena azul, la lógica general de los genes del desarrollo estriba en organizar, subdividir, especificar y esculpir las partes del embrión. Es un proceso complejo, que se da a partir de una gran variedad de operaciones simples e individuales. Al fin, la complejidad de un animal sobreviene a una gran cantidad de operaciones que se llevan a cabo al mismo tiempo y en sucesión durante el desarrollo embrionario. En efecto, aun cuando absolutamente todas las células del embrión en desarrollo contienen exactamente el mismo DNA, los genes encargados de coordinar el desarrollo (genes Hox) activan a otros genes sólo en ciertas partes del embrión y sólo en ciertos periodos del desarrollo. Con las técnicas mencionadas

con anterioridad (tinción) se han podido observar los patrones de activación y desactivación que enaltecen o hacen sobresaltar al RNA y sus productos proteicos que contienen los embriones en sus diferentes partes y etapas del desarrollo. Todo este patrón refleja un orden y una lógica en el proceso que se tiene que llevar a cabo para conformar a un animal.

A continuación analizaremos cómo se desarrolla un embrión para posteriormente entender cómo funciona la mecánica de la evolución. Todo empieza cuando un óvulo es fecundado por un espermatozoide, lo cual da como resultado un huevo fecundado o cigoto, una célula que contiene el material cromosómico de ambos gametos en su núcleo celular (una mitad proviene del padre y la otra de la madre); el resto de la célula, es decir sus organelos, citoplasma y membrana celular, proviene sólo de la madre. Esto de los organelos es muy importante, dado que las mitocondrias (organelos encargados de la respiración celular) contienen su propio DNA, el cual se hereda 100% de la madre y pasa, sin recombinarse, de generación en generación. Sabiendo esto, podemos decir, con seguridad, que siempre contaremos con un mayor aporte de material celular materno que paterno, seremos (por lo menos en esa etapa del desarrollo) más madre que padre. El citoplasma del huevo fecundado o cigoto contiene toda la cantidad de sustancia alimenticia que el óvulo logra aportar, pues el espermatozoide sólo aporta el material genético.

El inicio del desarrollo muestra aspectos semejantes en todas las clases animales. Después de la fecundación, el cigoto se divide en numerosas ocasiones (segmentación): primero se divide en dos células hijas o blastómeros, luego, cada uno de éstos se segmenta según un plano perpendicular al primer plano de división, quedando un total de cuatro blastómeros. Continúa el proceso de división celular y así, cuando llega a un determinado número de blastómeros, que es diferente para cada especie y por lo general no es mayor de 128, se forma una estructura semejante a una mora, llamada por ello mórula, sin que se haya incrementado sensiblemente su tamaño. En este momento, la mórula se ve, en un corte, como una serie de blastómeros, de igual tamaño, que confluyen en la parte central, con un polo externo en contacto con el medio ambiente y otro interno, en contacto con las otras células. Una vez que se ha formado la mórula se produce un ligero aumento de tamaño con forma de pelota. Los blastómeros emigran hacia la periferia y queda una especie de hueco en el centro o blastocele, lleno de líquido blastocélico, el cual produce los blastómeros a través de la entrada del líquido externo. El blastocele o cavidad primaria nunca está en contacto con el exterior. A esta fase del desarrollo se le llama blástula. Hasta ahora, la descripción ha sido detallada de acuerdo con lo que sucede. A continuación se verá una descripción más abstracta para entender la lógica del desarrollo embrionario. La finalidad de abordarlo de la siguiente manera tiene que ver con una mejor comprensión de los mecanismos de acción de los genes Hox, para luego facilitar el entendimiento de las

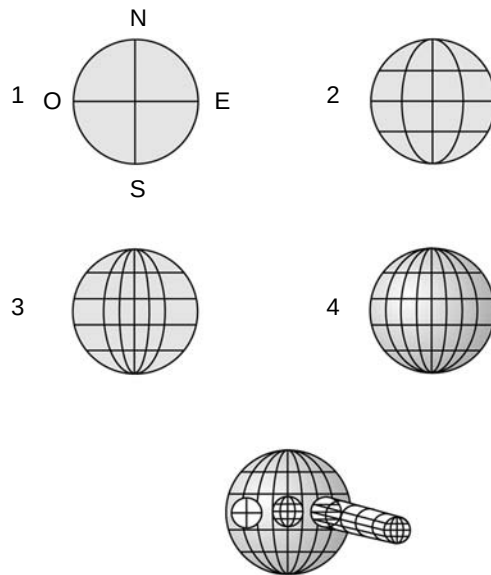


Figura 2–8. Descripción abstracta para entender la lógica del desarrollo embrionario. Los genes Hox se encargan de desarrollar la modularidad del embrión para después organizar la diferenciación celular de cada módulo por separado.

novedades evolutivas. La descripción comprende cinco puntos importantes (figura 2–8):

1. En primer lugar se definen los polos del cigoto que ha madurado hasta la formación de la mórula. Se define lo que será arriba (norte), abajo (sur), cefálico (oeste) y podálico (este), determinándose así los principales ejes de orientación embrionaria. Lo anterior se logra gracias a que las células son sensibles y obedecen a gradientes de concentración química preexistentes.
2. Luego se presenta una subdivisión de los principales ejes en compartimientos más delgados, como los gajos de una mandarina.
3. Posteriormente se refinan los intervalos en una serie de módulos más pequeños, finos o delgados. En muchos embriones, las líneas particulares de longitud oeste–este definen módulos anatómicos que se convertirán en las principales unidades de construcción para un determinado diseño animal. Los módulos se desarrollan gracias a la información contenida en los genes Hox.
4. Se define la identidad de cada uno de los diferentes módulos. Los módulos, que en un inicio fueron similares, ahora se distinguen y adquieren una personalidad propia y diferente a lo largo del eje oeste–este.

5. Finalmente, en coordenadas específicas de latitud y longitud, se desarrollan algo así como “nuevos y pequeños mundos” dentro del mundo principal. Al principio, un reducido número de células en coordenadas muy específicas son reclutadas para diferenciarse, especializarse y dar lugar a la formación de estructuras corporales específicas. Muchas veces estos grupos celulares deben multiplicarse de manera dramática antes de que el órgano o el apéndice (extremidad o cola) alcancen su tamaño normal. Con frecuencia, todas estas estructuras también son modulares, de manera que, para que se puedan esculpir, se repiten los pasos del uno al cuatro en cada una de ellas.

Ahora aplicaremos la lógica abstracta del desarrollo del embrión antes descrita para emplearla en el desarrollo de un vertebrado. Todos los embriones vertebrados pasan a través de un momento, durante el desarrollo, en el cual todos son muy similares. (Recordemos que esta idea confundió a Ernst Haeckel.) Lo anterior sucede cuando el eje principal oeste–este, que es el mismo eje cabeza–cola, se ha formado y definido, y también cuando se han diferenciado las diferentes capas de tejido en el sentido norte–sur, que es el mismo que el posterior–anterior, cuando en la región posterior (norte) son evidentes el tubo neural y el notocordio. También se hacen evidentes unos pares de pequeños abultamientos (concentrados celulares en un pequeño espacio) llamados somitas o somites, que forman un patrón de módulos repetitivos a lo largo de la mayoría del animal. Hasta este momento todos los embriones de los vertebrados son extraordinariamente parecidos. Continuemos ahora con la secuencia descrita antes sobre la lógica que sigue el embrión durante su desarrollo:

1. **Formación de los principales ejes oeste–este y norte–sur.** El eje oeste–este es el eje cefalocaudal (cabeza–cola) y el eje norte–sur es el eje dorsal–ventral (o lo que es lo mismo: posterior–anterior); los ejes y las diferentes capas de células en los embriones de los vertebrados se van organizando gracias a una cadena de eventos inductivos, en donde la producción de una molécula induce la producción de otra y así sucesivamente. Por ejemplo, a la formación del eje cefalocaudal le sigue la diferenciación del eje dorsal–ventral. Una de las proteínas encargadas de organizar el eje cefalocaudal es la conocida con las letras *Frzb* que se expresa exclusivamente en las células localizadas en lo que será la cabeza del embrión. Otra proteína, la *cordina*, se produce solamente en las células en torno al labio dorsal (atrás) del blastofofo.
2. **Subdivisiones.** El tubo neural es una de las primeras regiones en formarse; dará origen al cerebro y a la médula espinal. Posteriormente, el cerebro se subdivide en tres regiones principales: el cerebro anterior, el cerebro medio y el cerebro posterior. Después, cada una de estas regiones se subdivide en partes que se especializarán en funciones diferentes, desde el olfato y la visión, hasta el control involuntario de ciertas actividades como la respiración

y el ritmo cardíaco. Antes de que estas subdivisiones sean evidentes, y mucho antes de que sus funciones queden establecidas de manera integral, se expresan diferentes grupos de genes que marcan y delimitan las regiones del tubo neural destinadas a formar diferentes partes del cerebro. Por ejemplo, la expresión de un gen marca el cerebro anterior y el cerebro medio, mientras que un segundo gen marca el cerebro posterior y la frontera o el límite entre el cerebro medio y el posterior.

3. Segmentación. Las somitas dan origen a las partes modulares de la columna vertebral, las costillas asociadas y los grupos musculares. Los somitas aparecen en los embriones como abultamientos segmentados en parejas a lo largo del eje principal del cuerpo para diferenciarse posteriormente, uno a la vez, desde la cabeza hasta la cola en todas las especies de vertebrados. Los seres humanos forman 42 somitas, los ratones forman 65 y las serpientes varios cientos. La precisión con la que se forman las somitas progresivamente, una tras otra, en sentido cefalocaudal, sigue a la expresión de varios genes también de manera ordenada en sentido cefalocaudal. Al inicio, las somitas son idénticas en apariencia, pero después dan origen a diferentes tipos de vértebras, costillas y músculos, y todo depende de la posición que ocupan a lo largo del eje cefalocaudal. Las distintas identidades y destinos de las somitas se moldean y se definen gracias a los diferentes patrones de expresión de los genes Hox, a lo largo de una secuencia ordenada en sentido cefalocaudal.

4. Extremidades (apéndices articulares) y órganos. Una vez que se define el plano corporal básico, y que el patrón repetitivo de las somitas se encuentra muy avanzado en su desarrollo, empiezan a notarse en ciertas posiciones del embrión los lugares a partir de los cuales se desarrollarán los diferentes órganos y apéndices articulados. Se activan los genes del desarrollo para construir las estructuras tridimensionales. Por ejemplo, los miembros superiores se originan en un número de somita específico y diferente para cada especie, pero invariablemente se encuentra siempre en la frontera o límite del cuello con el tórax (frontera cervicotorácica), y puede expresarse de manera temprana y crecer un cuello relativamente corto, como el de los seres humanos, o expresarse de manera tardía y dar como resultado un cuello largo como el de la jirafa.

Otros genes del desarrollo se seguirán activando y desactivando para moldear la forma de cada extremidad: huesos largos, cortos, delgados o anchos; músculos, articulaciones, tendones, dedos, etc., todo lo que conformará la extremidad madura. Vale la pena mencionar que el desarrollo de estos elementos apendiculares procede en estricto orden de proximal (la región apegada al tronco) a distal (la región más alejada del tronco), siempre en una secuencia específica.

La belleza que confiere a cualquier extremidad o apéndice es que también es esculpida por la muerte celular. Veamos cómo es esto. Tomemos en cuenta una mano: durante el desarrollo se puede observar un momento en el cual los dígitos no se encuentran separados sino unidos por una membrana interdigital, dando la apariencia de una membrana con las de las patas de los patos. Cuando se activan los genes del desarrollo, cuya función es darle forma definitiva a una mano, producen una proteína que instruye a las células que conforman las membranas interdigitales para que realicen apoptosis (proceso mediante el cual la célula padece por una muerte programada); es un suicidio celular cuyo fin último es lograr la separación interdigital que permita el movimiento de cada uno de los dedos por separado. Este proceso disminuye la capacidad de los humanos para nadar, pero incrementa la habilidad para realizar trabajos finos con las manos y los dedos.

Así pues, el tamaño, forma y número de los elementos anatómicos de una extremidad se ve influido por un subgrupo de genes Hox que se expresan en tiempos y lugares diferentes. En la mayoría de las especies, los miembros superiores son diferentes de los miembros inferiores, como en el caso del canguro y del *T. rex*.

Ya los detalles más finos en la configuración anatómica de los órganos y tejidos (como por ejemplo la manera como se disponen las plumas o el cabello) generalmente se llevan a cabo a nivel celular, en donde una célula crea, mediante la síntesis de algunas proteínas, una zona de inhibición en la diferenciación celular alrededor de ella, dando como resultado cierto patrón o acomodo anatómico que no está especificado, dictado o coordinado por los genes Hox de las coordenadas globales de posicionamiento pertenecientes a la lógica básica que sigue un embrión en desarrollo.

Ya vimos que los genes Hox son de los principales en dirigir y coordinar la secuencia de eventos bioquímicos que traen como resultado la forma de un animal. Pero, si los genes Hox son muy similares en especies tan diferentes, ¿por qué existe tanta diversidad en los animales?, ¿en qué lugar se encuentran las instrucciones operativas de los genes Hox? Lo que sigue contiene la información más reveladora y conceptualmente más importante de todo este capítulo.

EL SECRETO SE ENCUENTRA EN LOS INTERRUPTORES

Los astrónomos han podido observar en el Universo una gran cantidad de estrellas que brillan en un espectáculo digno de admiración. Pero también han descubierto la materia oscura, esa misteriosa porción del Universo conformada al parecer por neutrinos, y que al principio se dedujo que no era más que el vacío. Ahora se sabe que la materia oscura contribuye de manera importante a la expansión del Universo. Análogamente, el genoma también cuenta con “estrellas”, los genes

que han sido bien identificados, puesto que se sabe que contienen la información necesaria para que se sintetice una proteína y, según los biólogos, que esos genes “estrellas”, al igual que las estrellas en el Universo, ocupan tan sólo una pequeña fracción de todo el DNA. La gran mayoría del DNA consiste en secuencias de bases nitrogenadas que no forman parte de un código simple para poder ser identificado como un gen en particular. Ésta es la “materia oscura” del genoma; no brilla como las estrellas del Universo, sino que es secuencia de nucleótidos que no codifican para una proteína en particular. Sin embargo, así como la materia y la energía oscura del universo gobiernan (en conjunto con la gravitación) la conducta de los cuerpos celestes, la materia oscura de nuestro DNA, esas secuencias que carecen de codificación para alguna proteína específica, controlan dónde y cuándo se activan o se desactivan los genes durante el desarrollo embrionario.

La materia oscura del DNA controla la manera como se utilizan los genes Hox. Contiene las instrucciones para conformar las diferentes partes de un organismo y lo hace a manera de los interruptores o reguladores de la expresión genética. Dichos interruptores son los “actores principales” tanto en el desarrollo de un embrión como en la evolución de las especies. Son estos interruptores genéticos los que codifican las instrucciones únicas que determinan el desarrollo de alguna especie. Cuentan con la asombrosa capacidad de dar forma y función a los diferentes tipos de animales bajo la influencia de los genes Hox, que son similares en diferentes tipos de organismos. Este punto es muy importante para poder entender el proceso evolutivo y, por esta razón, insistimos en que los genes Hox, los que inician la dirección y coordinan la diferenciación celular en los diferentes compartimientos del embrión, son casi los mismos para muchos tipos de animales; luego, estos genes Hox actúan y ejercen su acción gracias a que codifican las proteínas Hox y éstas, a su vez, se unen a los interruptores de la expresión genética, activando o desactivando la transcripción del DNA en RNA, y dependiendo de la conformación de los interruptores se producirán o no diferentes tipos de proteínas por parte de los genes que regulan. Estas proteínas caracterizan y contribuyen al desarrollo del embrión para dar origen a una especie en particular.

Ahora es momento de aclarar dos puntos muy importantes: primero, los interruptores o reguladores de la expresión genética no codifican para la síntesis de alguna proteína, sino que su función se limita a ser exclusivamente reguladora; segundo, un gen “estrella”, uno de los que codifican para la síntesis de alguna proteína específica, puede tener varios interruptores y no sólo uno, así puede ser regulado varias veces, en diferentes formas, lugares y momentos del desarrollo; los interruptores múltiples para un mismo gen pueden activarse entonces en diferentes partes del organismo en desarrollo. Un gen que cuente con tres interruptores estará conformado por cuatro partes o segmentos de DNA, una que codifica y expresa cierta proteína en particular y otras tres partes reguladoras. De esta manera, las mutaciones en los interruptores individuales sobre los cuales actúan las pro-

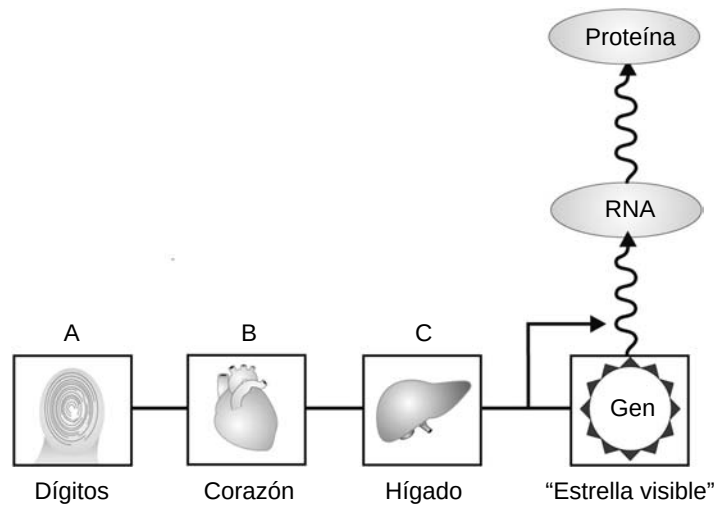


Figura 2-9. Tres interruptores pertenecientes a la “materia oscura del genoma”. Cuando se activa A entonces se expresa el gen para el momento de formar los dedos; cuando se activa B el mismo gen se expresa para formar el corazón; cuando se activa C el mismo gen se expresa para formar el hígado.

teínas Hox pueden causar efectos anatómicos espectaculares. En otras palabras, un mismo gen puede ser de utilidad para que se formen tres partes del cuerpo diferentes, pero depende de los interruptores, el lugar y el momento en el cual se activa o se desactiva (figura 2-9).

Ya vimos que los genes Hox se activan de acuerdo con las coordenadas tridimensionales del embrión. Pero, ¿cómo “saben” las células en qué parte del embrión se encuentran localizadas? Resulta que los interruptores genéticos también actúan como un sistema de posicionamiento global (“GPS”). Las células y sus genes pueden “conocer” su posición dentro de un embrión en desarrollo mediante la integración de diferentes señales bioquímicas que les llegan; los interruptores integran la información posicional de las células en el embrión con respecto a la longitud, latitud, altitud y profundidad (tal como lo hace un avión mientras vuela), y luego, de acuerdo con el resultado que se obtiene después de integrar dichas señales, entonces los mismos interruptores se encargan de activar o desactivar a los genes correspondientes. Así, la función general de un interruptor es la de transformar el patrón de actividad existente en un gen hacia un nuevo patrón de actividad o inactividad genética.

Recordemos que desde el inicio de la formación de un embrión el huevo fecundado recibe información que le permite orientarse espacialmente a partir de la distribución asimétrica de moléculas depositadas en el óvulo durante su origen

y formación en el ovario, gracias a lo cual inicia la formación y definición de los dos ejes principales en el embrión. También vale la pena recordar que el comportamiento de cada gen está determinado siempre por eventos que le preceden y que cada interruptor, activando o desactivando a su gen correspondiente a un nuevo patrón, determina a su vez los siguientes patrones de actividad genética en los eventos embriológicos que se desarrollarán posteriormente. De manera que la integridad física de los interruptores es de primordial importancia para un desarrollo embrionario normal. Si por alguna razón se presenta una mutación en alguno o algunos de los interruptores, entonces las secuencias de señales correctas que recibe no pueden integrarse ni dar pie a la continuidad normal, dando como resultado alteraciones anatómicas espectaculares y muy obvias, como las moscas con patas en la cabeza, en lugar de antenas, o como la polidactilia (mano con más de cinco dedos) en los seres humanos. En ambos casos, las alteraciones anatómicas son secundarias a rupturas en los interruptores que activan genes del desarrollo en posiciones anormales.

Cada interruptor del genoma es único y diferente; cada uno está constituido por una secuencia específica de nucleótidos a la cual se le une alguna de las proteínas de los genes Hox, así que sumar, restar o cambiar algunas bases nitrogenadas en la secuencia de los interruptores puede ser suficiente para cambiar el patrón de la información que se genera. Esto es muy importante, ya que nos ayuda a entender cómo es que se puede moldear la forma de los seres vivos en el proceso de la evolución: gracias a los cambios en las secuencias de nucleótidos contenidos en los interruptores, ya sea mediante la ganancia, pérdida o cambios en sus bases nitrogenadas.

También es muy importante mencionar que un gen puede no sólo contar con múltiples interruptores que den lugar a diferentes patrones de expresión en un momento dado, sino que con frecuencia tienen diferentes interruptores que controlan de manera completamente diferente los patrones de expresión genética, de acuerdo con los diferentes tejidos y con determinados momentos y estadios del desarrollo embrionario. Es decir, los genes Hox rara vez se dedican a una sola tarea mientras operan el desarrollo del embrión, o sea que estas herramientas se usan una y otra vez mientras el embrión se desarrolla. Los genes Hox son los mismos vez tras vez pero los resultados son muy diferentes; nuevamente son los interruptores los que permiten que los genes Hox se vuelvan tan versátiles. Veamos un ejemplo de cada situación:

Ejemplo 1

La activación y desactivación de los diferentes interruptores para un gen determinado dan lugar a diferentes patrones de expresión genética (figura 2–10).

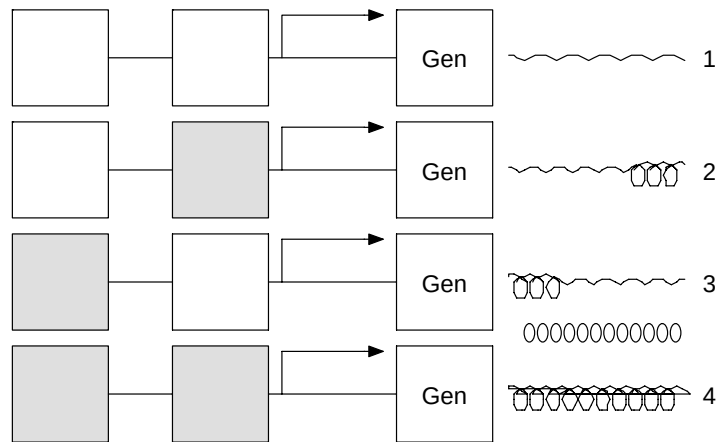


Figura 2–10. La activación y desactivación de diferentes interruptores que ejercen su efecto sobre un mismo gen dan lugar a diferentes patrones de la expresión genética.

Ejemplo 2

Las proteínas morfogénicas óseas (BMP, por sus siglas en inglés) pertenecen a una importante familia de proteínas del desarrollo embrionario que se utilizan para el desarrollo del esqueleto y cuentan con la propiedad de promover la formación de cartílago y hueso. La propiedad reguladora para el gen BMP5 ilustra claramente cómo es que partes anatómicas diferentes se forman a partir de un mismo gen que se activa por interruptores separados. En este caso, no es la variación en la expresión a partir del juego entre varios interruptores lo que origina diferentes patrones de expresión como en el ejemplo 1, sino que interruptores por separado activan exactamente el mismo gen (BMP5) y, a pesar de que se activa el mismo gen, el efecto es diferente, como resultado de haberse activado interruptores diferentes. Los interruptores individuales controlan la expresión del gen BMP5 en diferentes partes del embrión en desarrollo (figura 2–11).

Los interruptores se encuentran cerca del gen BMP5. Por separado, y de manera individual e independiente, cada uno de los interruptores regula la expresión del gen BMP5 para poder formar costillas, cartílago tiroides (la estructura anatómica, muy prominente en algunos hombres, que recibe el homónimo de “nuez de Adán”), pabellón auricular (oreja), miembros superiores e inferiores, dígitos, vértebras, senos paranasales, esternón y otros. Así, un grupo de interruptores con secuencias de nucleótidos muy específicas serán reconocidos por las proteínas Hox y controlarán la manera como se expresarán sus genes codificadores correspondientes, de acuerdo con los diferentes módulos.

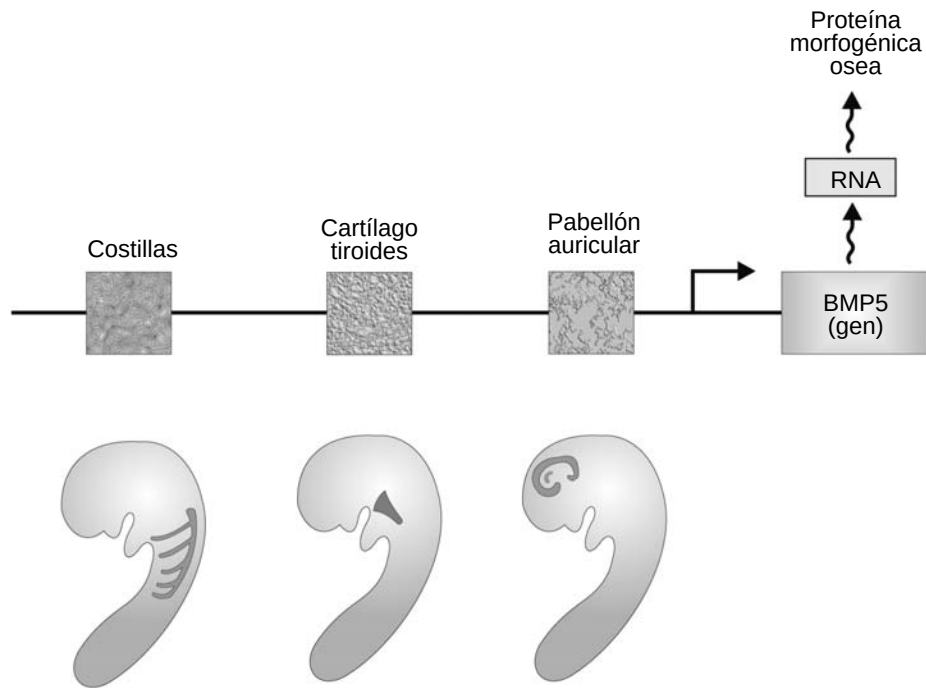


Figura 2–11. Diferentes partes anatómicas pueden formarse a partir del mismo gen que se activa por interruptores separados.

Antes se creía que las diferencias observables entre los animales se debían en gran medida a cambios en el número y la secuencia de los genes que codifican para ciertas proteínas en particular, pero ahora empezamos a entender que existe una gran cantidad de interruptores que norman la conducta de los genes codificadores. Con los resultados obtenidos recientemente sobre la secuencia de los genomas, se ha revelado que los seres humanos y los ratones contamos casi con el mismo número y tipo de genes, más o menos 20 000 o 25 000 genes, así que, si la secuencia en el código genético (en las bases nitrogenadas) es tan similar, entonces es tiempo de explorar los interruptores que regulan la expresión de los genes para poder entender la función que desempeñan en la evolución. La lógica operativa y el gran potencial (en términos de diversidad) de los interruptores genéticos nos deben preparar para empezar a pensar seriamente en sus contribuciones en la evolución de los animales.

Dado que los interruptores individuales son unidades procesadoras de información independientes, los cambios evolutivos que se lleguen a presentar en un interruptor de algún gen pueden traer como consecuencia la alteración en el desarrollo de una estructura sin alterar otras estructuras.

Ahora sabemos que muchos de los misterios de la evolución se han presentado como consecuencia de cambios evolutivos localizados en los interruptores genéticos.

Hasta ahora se han expuesto cuatro ideas críticas sobre el desarrollo de un animal:

1. La modularidad que existe en la arquitectura de los animales.
2. Los genes Hox (entre otras herramientas genéticas) que son utilizados para dirigir y coordinar el desarrollo embrionario y que son muy similares entre las diferentes especies.
3. La geografía del embrión.
4. Los interruptores genéticos que determinan el destino de las coordenadas del embrión.

LAS INNOVACIONES DEL CÁMBRICO

La idea central que se desarrollará a continuación tratará la evolución de las formas de los animales desde el punto de vista de sus partes corporales.

La Tierra cuenta con 4 500 millones de años desde que se formó, y la vida inició hace aproximadamente 3 500 millones de años. Durante los primeros 3 000 millones de años, los organismos fueron unicelulares, es decir, conformados por una sola célula. En el Precámbrico, hace 600 millones de años, el tamaño y la forma de los organismos se expandieron para llegar a medir varios centímetros, y además se desarrollaron formas múltiples, las cuales forman parte de la fauna ediacariana. Recientemente se ha nombrado parte de este periodo como “Ediacaran”. Para entonces vivieron especies parecidas a las actuales medusas. Tiempo después, en el Cámbrico, hace 540 millones de años aproximadamente, aparecieron en la naturaleza los principales planos corporales, tal y como los observamos en la actualidad. Para comprender cómo fue, hagamos antes algunas consideraciones técnicas basadas en la biología.

Los insectos y los vertebrados son excelentes representantes de las principales dos ramas en las que se divide el reino animal; se distinguen entre sí por una diferencia fundamental en sus embriones, todo depende del sitio o lugar en donde se forma la boca con respecto a una apertura inicial conocida como blastofores. Aquellos animales cuya boca se forma en un sitio por separado al blastofores se conocen como *deuterostomos*, e incluyen a los seres humanos y al resto de los vertebrados, a los cordados, a los hemicordados y a los equinodermos. A todos los animales cuya boca se desarrolla a partir del blastofores se les conoce como *protostomos*, e incluyen a los artrópodos (como las moscas), los anélidos, los mo-

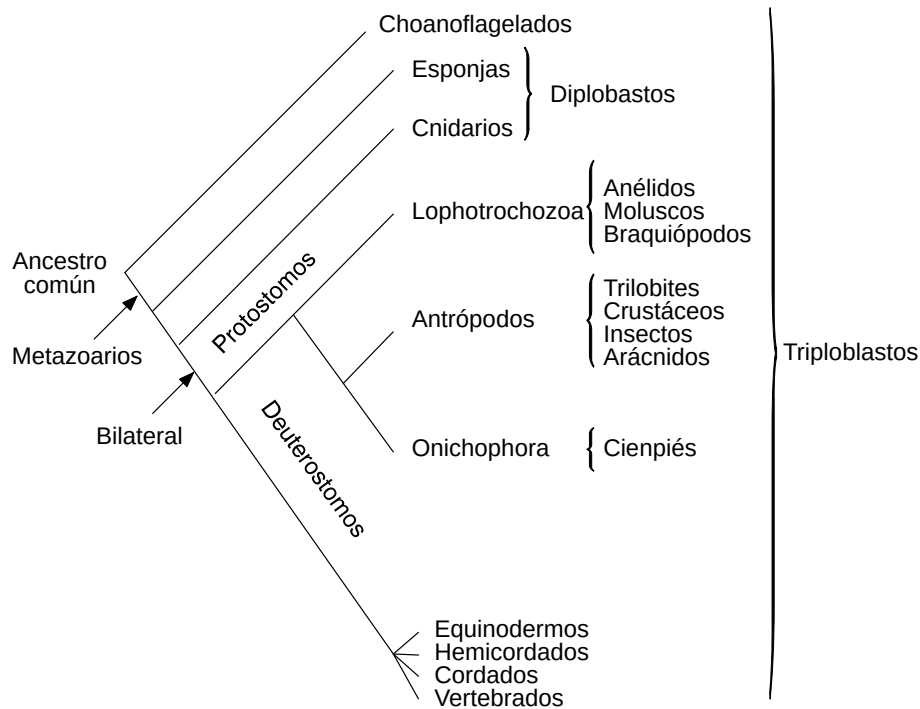


Figura 2–12. Las innovaciones que se dieron durante la explosión del Cámbrico.

luscus, etc. Las esponjas y los cnidarios no pertenecen a los deuterostomos ni a los protostomos, porque su línea evolutiva se separó previamente (figura 2–12).

La aparición claramente reconocible de los deuterostomos y de los protostomos se presentó en el Cámbrico y se piensa que ambos compartieron un ancestro común que dio origen a ambas líneas evolutivas. Es probable que hubiera sido un animal parecido a un gusano. Lo que efectivamente se puede considerar como un acierto es que el ancestro común de los deuterostomos y de los protostomos era un ser simétrico bilateralmente, ya que todos los miembros de ambos grupos tienen, por lo menos en algún momento de su vida, una organización simétrica. Los equinodermos, por ejemplo, mientras son larvas, presentan bilateralidad, aunque después toman formas radiadas y simétricas.

Dada esta bilateralidad, tanto a los protostomos como a los deuterostomos se les conoce como *bilaterios*. A su vez, los bilaterios compartieron un ancestro común denominado *urbilaterio*, que quiere decir “bilaterio primitivo”; lo más probable es que éste haya contado con unos órganos, como el resto de los animales, pero de forma y función muy primitivos (corazón, sistema circulatorio, sistema nervioso, aparato digestivo, etc.), además de algunos miembros articulados y ór-

ganos de los sentidos, pero de igual manera, muy primitivos. Pudieron haber contado también con algunos seis o siete genes Hox acompañados de otros pocos centenares de genes utilizados para la construcción de un organismo. Algo muy importante que nos ha aportado la ciencia de la evolución y del desarrollo es la racionalización sobre la posibilidad de que pudo haber existido un animal (desde aquel entonces) equipado con todos los genes necesarios para construir organismos complejos, pero con un bajo grado (primitivo) de complejidad anatómica.

El Cámbrico data de hace 543 millones de años y, para los 15 o 20 millones de años que le siguieron, el registro fósil ha demostrado que estuvo pleno de braquiópodos, artrópodos, equinodermos y cordados. Sin embargo, la fauna del Cámbrico estuvo dominada por los artrópodos. En ese entonces, una tercera parte o más de todas las especies eran artrópodos. En todos los artrópodos puede observarse una característica común: una apariencia similar caracterizada por muchos segmentos con apéndices asociados y no necesariamente articulados, sino simplemente salientes o procesos corporales; un ejemplo de ellos son los *lobopodos* (haciendo referencia a dichos apéndices lobulados que salen de sus cuerpos), que están conformados por una serie simple y repetitiva de estructuras corporales con estos miembros o apéndices en forma de tubo. Los lobopodos representan una forma primitiva y un precursor cuyo cuerpo cuenta con apéndices, un ser mucho más elaborado o complejo que siguió a los organismos característicos del Ediacaran; contaban con apéndices, no articulados, a manera de miembros que salían de su cuerpo (carencia de esqueleto y por ende de articulaciones) y son los parientes más cercanos de los artrópodos; se cree incluso que los artrópodos (patas articuladas) evolucionaron a partir de algunos ancestros lobopodos. En efecto, el estudio detallado de los fósiles sugiere que surgió una serie de innovaciones corporales en los lobopodos y que finalmente originaron a los artrópodos. Estas novedades consistieron en la segmentación de su cuerpo, el desarrollo de un exoesqueleto (duro) y la forma de tenedor de algunos de sus apéndices articulados. Dichas características las comparten en la actualidad todos los artrópodos.

Tenemos que ver el Cámbrico como un evento sustancial de la naturaleza, durante el cual evolucionaron los diseños corporales básicos en el transcurso de 10 a 15 millones de años, mismos que aparentemente son pocos, o es un corto periodo de tiempo si lo comparamos con la larga historia de la Tierra. Sin embargo, fue un tiempo lo suficientemente largo para que la evolución “inventara” nuevos apéndices, “cambiara” diseños corporales, etc.; basta comparar con el periodo en el que se originaron los mamíferos, dándose también en un tiempo comprendido entre 10 y 15 millones de años después de que se extinguieron los dinosaurios hace 65 millones de años. ¿Qué o quién dirige esta evolución? ¿Son nuevos genes para dar origen a nuevos animales? La invención de nuevos genes no es la explicación correcta para que se dé el origen y la diversificación de la mayoría de los grupos animales. El *Onychophorans*, que pertenece a los lobopodos y vive ac-

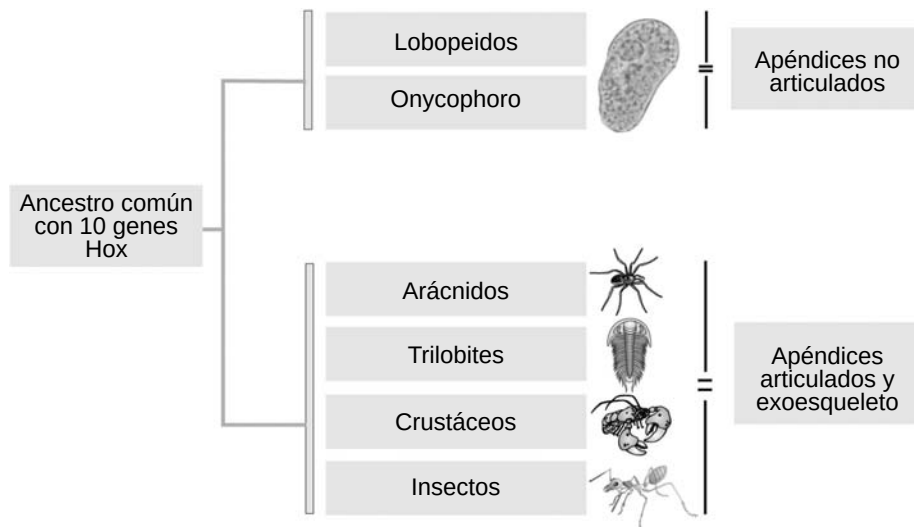


Figura 2–13. Los artrópodos cuentan con los mismos 10 genes Hox que los lobopodos, pero les dieron nuevas y diferentes aplicaciones.

tualmente, tiene los mismos diez genes Hox que la mosca de la fruta y los mismos diez genes Hox que el resto de los artrópodos vivos. Todo esto lleva a la conclusión de que esos diez genes Hox ya estaban ahí, en el ancestro común para el *Onychophorans* y para el resto de los artrópodos, lo cual indica, a su vez, que todos los lobopodos y artrópodos del Cámbrico (incluidos los trilobites) también contaban con los mismos diez genes Hox. Además, los artrópodos recientes (arañas, insectos y crustáceos) son moldeados por los mismos genes Hox (figura 2–13).

Utilizando los mismos genes Hox de los lobopodos, los artrópodos pudieron darles nuevas y diferentes aplicaciones, logrando desarrollar apéndices articulados y otras características anatómicas. Este fenómeno sobre los cambios o diferencias observables en la acción de los genes Hox no se presenta exclusivamente en los artrópodos, sino que es el común denominador de las diferencias anatómicas que caracterizan a todos los vertebrados.

Veamos: la *Lanceta* es el único cefalocordado que sobrevive en la actualidad; es el ancestro común de los vertebrados y cuenta con tan sólo un racimo de genes Hox. Recordemos que los vertebrados más modernos, como los ratones o los humanos, contamos con cuatro racimos de genes Hox, mismos que contienen un total de 39 genes. Analizando la *Lanceta*, se puede concluir que en algún momento de la historia animal ocurrió un incremento en el número de racimos Hox después de que se separaron las líneas evolutivas de los cefalocordados y de los vertebrados durante el Cámbrico.

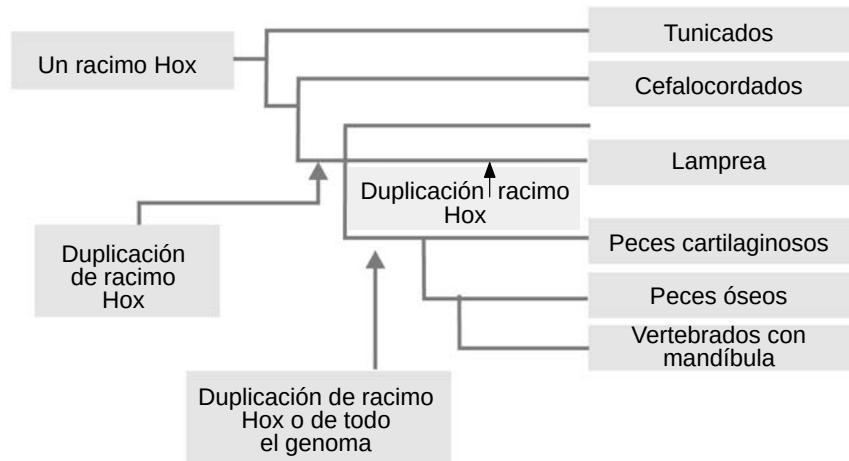


Figura 2–14. Debieron duplicarse los genes Hox para incrementar la complejidad de los planos corporales de los animales.

Nuestros cuatro racimos de genes Hox debieron duplicarse dos veces antes, a partir del racimo solitario de la *Lanceta*, para poder dar origen a los cuatro racimos en un momento temprano de la evolución de los vertebrados. Una duplicación después de la separación entre las líneas evolutivas de los cefalocordados y de la lamprea, otra vez en algún momento antes de que se separara de estos últimos la línea evolutiva de los peces con esqueletos óseos (figura 2–14). Entonces, en los vertebrados se expandió el número de genes Hox, aunque vale la pena hacer la reflexión de que muy probablemente no sólo los racimos de genes Hox fueron los que se duplicaron durante la evolución de los vertebrados, sino muchos otros genes, y lo anterior puede suceder si se duplica todo el genoma o secciones muy grandes del mismo.

De cualquier manera, el incremento de la cantidad de genes no es la causa principal que dio lugar a la evolución posterior de todos los vertebrados. Es un hecho crucial y muy importante recordar que la presencia de cuatro racimos Hox se ha mantenido estable en su número a través de la evolución de los anfibios, los reptiles, los mamíferos y las aves. Así pues, el número de genes Hox no nos dice, ni nos explica, cómo fue que evolucionaron todas las formas de animales. El origen en la diversidad animal respecto de sus ejes principales y sus partes corporales, tal como lo podemos ver en los artrópodos, se debe en gran medida a cambios en la geografía embrionaria que se da, de manera secundaria, en cambios en los interruptores donde actúan los genes Hox, más que a un cambio en el número de los mismos. Por ejemplo, en los vertebrados, la transición que ocurre de un tipo de vértebra a otro, de cervical a torácica, corresponde a zonas de transición en la

expresión de ciertos genes Hox en particular. También así, la frontera o límite anterior en la expresión de uno de estos genes, el gen Hox c6, determina la frontera o el límite cervicotorácico en el ratón, el pollo y el ganso, aunque cada uno de estos animales cuente con un número diferente de vértebras torácicas. Así, el número relativo de vértebras se correlaciona directamente con el cambio en la posición relativa de la expresión del Hox c6 de dichos animales. De nuevo, cambiando las zonas en las cuales se expresan los genes Hox se contribuye a dar forma a los diferentes vertebrados. Por ejemplo, la frontera entre el cuello y el tórax de los vertebrados está determinada por la expresión del gen Hox c6 en todos los casos, pero la posición (más adelante o más atrás) difiere entre un animal y otro, lo cual trae como resultado que unos tengan el cuello largo y otros el cuello corto; todo depende de en dónde se exprese dicho gen. Es importante saber también que los miembros superiores o torácicos se originan en esta frontera cervicotorácica en todos los vertebrados; en las serpientes, la frontera mencionada cambió y se posicionó demasiado adelante, tanto, que llegó a localizarse hasta la base del cráneo, de manera que, como carecen de cuello, no presentan unión o límite cervicotorácico y, por ende, no desarrollan miembros superiores.

Son los interruptores genéticos de los mismos genes Hox los que controlan las zonas de las coordenadas Hox de los embriones. Los cambios evolutivos de las zonas Hox se originan a partir de cambios en la secuencia de DNA en los genes de los interruptores que a su vez controlan los genes Hox. Así pues, los cambios en la secuencia de DNA en los genes correspondientes a los interruptores (genes reguladores) son los responsables de las diferencias en las posiciones relativas del lugar dónde se expresan los genes Hox en cada una de las diferentes especies. Es decir, los cambios en las secuencias genéticas de los interruptores de los genes Hox hacen que éstos se expresen en diferentes posiciones a lo largo del embrión, expresando siempre la misma proteína Hox, pero en diferente lugar. Lo anterior hace que la geografía y las coordenadas del embrión cambien, dando lugar, por ejemplo, a cuellos más largos o a cuellos más cortos.

Podemos darnos cuenta ahora de que la función que desempeñan los interruptores en el desarrollo de la evolución es muy relevante, ya que los cambios en la secuencia de los nucleótidos de los mismos traen como resultado importantes cambios en la geografía del embrión sin alterar la integridad funcional de las proteínas responsables de dirigir y coordinar el desarrollo.

A continuación plantearemos nuevamente lo que sucedió en tiempos del Cámbrico, cuando se establecieron la mayoría de los diseños corporales básicos que prevalecen hasta nuestros días. Se sospecha que existió entonces un ancestro común para las dos principales ramas en las que se divide el reino animal: protostomos y deuterostomos. Fue un ser de naturaleza bastante compleja, tanto desde el punto de vista genético como desde el punto de vista anatómico. Dicho ancestro común contaba con un “equipo” de genes bastante completo para dar lugar a la

construcción de todo un organismo, pero su potencial se mantuvo latente por un tiempo prolongado. De pronto, el potencial genético utilizado para el desarrollo del embrión se logró realizar de manera importante a través de la evolución de los interruptores y redes de información genética, también por el cambio en los genes Hox, durante y después del Cámbrico. Ahora, si la liberación del potencial genético no fue el detonador de la explosión cámbrica, entonces ¿qué pudo haber sido? Todo parece indicar que lo sucedido durante la explosión cámbrica se trató más bien de un “fenómeno ecológico”. La aparición y evolución de animales cada vez más complejos dio pie a la aparición de animales más grandes y a su vez con mayor complejidad, y así sucesivamente. Conforme se fue dando el fenómeno evolutivo, las presiones por las interacciones ecológicas y la competencia entre las diversas especies de animales dirigieron el curso de la evolución hacia el desarrollo de estructuras anatómicas y funcionales cada vez más complejas (ojos, apéndices articulados, tenazas, aletas, etc.), facilitando así movimientos complejos de ataque y defensa. Los genes del desarrollo son actores importantes en todo este escenario, pero por sí mismos representan sólo posibilidades, no un destino. Finalmente, el drama que se vivió durante la explosión cámbrica fue dirigido por la ecología en una escala global de acontecimientos. Muchos otros episodios de diversificación de las especies han ocurrido desde entonces, y a menudo se les atribuye a la exploración y explotación de nuevos nichos ecológicos, también con nuevas oportunidades ecológicas. En la mayoría de esas ocasiones, las invasiones a los nuevos nichos ecológicos se vieron facilitadas por cambios en la configuración anatómica de diferentes partes corporales que permitieron un nuevo modo de vida y que establecieron las plataformas para nuevos y diferentes desarrollos evolutivos.

Los cambios en la configuración anatómica o remodelación de los miembros corporales a nuevas formas y funciones es materia del cambio que puede presentarse durante el desarrollo embrionario contenido en los mismos miembros articulares. Por ejemplo, todos los tipos de apéndices articulares de los artrópodos han evolucionado a partir de los lobopodios. La naturaleza no inventa a menudo, sino que más bien remodela sobre estructuras existentes con la ayuda de los genes del desarrollo. La naturaleza puede desarrollar múltiples apéndices articulares, con una gran variedad de formas y funciones; así, los artrópodos acuáticos moldearon dichos apéndices para desarrollar estructuras especializadas para la alimentación, natación, respiración y locomoción, lo cual les permitió invadir un determinado ecosistema, como la tierra firme, completamente novedosa, y establecer así diseños corporales totalmente nuevos (figura 2–15).

Los genes Hox resultaron ser la clave para entender cómo se desarrollan y se diferencian las estructuras homólogas en los cuerpos de las diferentes especies: las diferencias entre dichas estructuras homólogas en los cuerpos de las diferentes especies se da gracias a la acción, en diferentes combinaciones, de los inte-

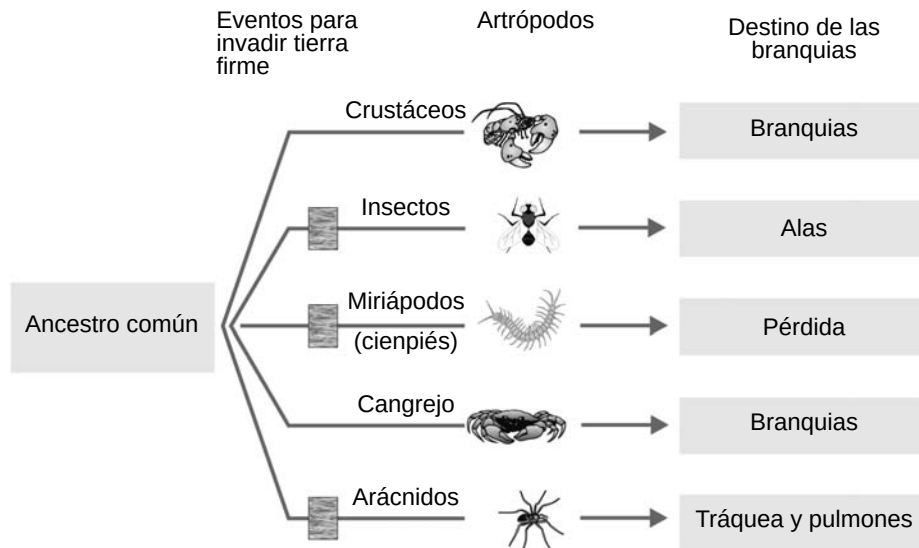


Figura 2–15. La naturaleza no inventa muy a menudo, sino que remodela estructuras existentes y por lo tanto se expresan y se hacen evidentes nuevas formas y funciones con la capacidad de explorar nuevos nichos ecológicos.

ruptores sobre los cuales ejercen su acción las proteínas Hox correspondientes para los diferentes apéndices articulares. Por ejemplo, existe una proteína Hox denominada ultrabithorax (Ubx), que ejerce su comando mediante su unión a diferentes combinaciones de interruptores. Es decir, la proteína Hox Ubx no cambia, es la misma, pero el apéndice articular que puede llegar a desarrollarse bajo sus efectos es diferente para cada especie; todo depende de las mutaciones y cambios evolutivos presentes en la secuencia de nucleótidos correspondiente a los interruptores que activan o desactivan la expresión de otros genes, de los encargados de darle forma y función a determinado apéndice articular. De manera similar, las formas de las alas evolucionan mediante cambios en los interruptores que son gobernados por la proteína Hox Ubx (figura 2–16).

Podemos observar otro ejemplo cuando comparamos el desarrollo de las aletas de los peces con las extremidades de los tetrápodos. Es de notar que las extremidades de los tetrápodos (como las nuestras) cuentan con tres elementos modulares, a saber: brazo, antebrazo y mano con dedos; mientras que en las aletas de los peces sólo desarrollan los primeros dos elementos modulares (proximales) y carecen del tercer elemento, o sea, el elemento distal o mano. El tercer módulo de los tetrápodos, el nuevo, el que no tienen los peces, evolucionó gracias a que con el tiempo adquirió un nuevo interruptor o grupo de interruptores que, bajo el efecto de los productos de los genes Hox (mismos para los peces y para los tetrápo-

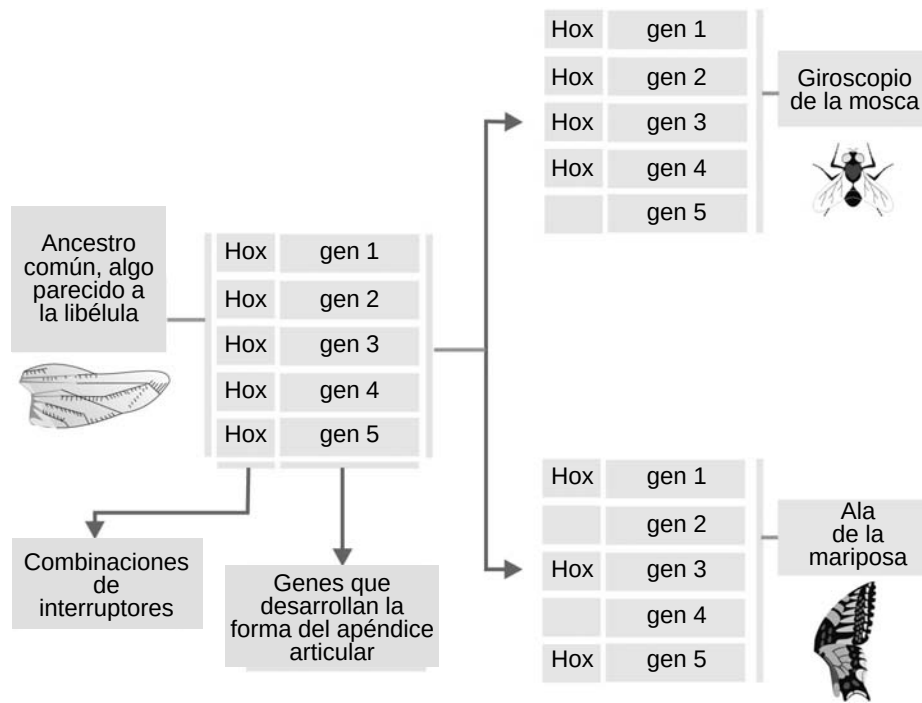


Figura 2-16. La proteína Hox no cambia pero el apéndice articular que se desarrolla es diferente. Todo depende de las mutaciones en los interruptores.

dos), activaron a los genes cuya finalidad fue la de llevar a cabo el desarrollo de una nueva parte o módulo distal (mano) en el apéndice articulado o extremidad del embrión.

Debido a ciertos cambios que se presentan en las secuencias de los nucleótidos de los interruptores donde actúan las proteínas de los genes Hox para dar forma y función a las extremidades superiores de algunos animales voladores, mencionaremos los siguientes ejemplos: los pterosaurios vuelan con los dedos (alas digitales), ya que la membrana principal del ala se inserta en el cuarto dedo; los murciélagos vuelan con las manos y las aves lo hacen gracias al movimiento de todo el brazo: “dedos alados”, “manos aladas” y brazos alados”, respectivamente (figura 2-17).

Ahora, los mismos cambios en las secuencias de los nucleótidos de los interruptores donde actúan las proteínas de los genes Hox pueden hacer que no se expresen los genes correspondientes y que, por lo tanto, no se desarrolle alguno de los miembros o apéndices articulares, tal como sucedió con las serpientes, las ballenas y los delfines. Por otro lado, también puede suceder lo contrario y presen-

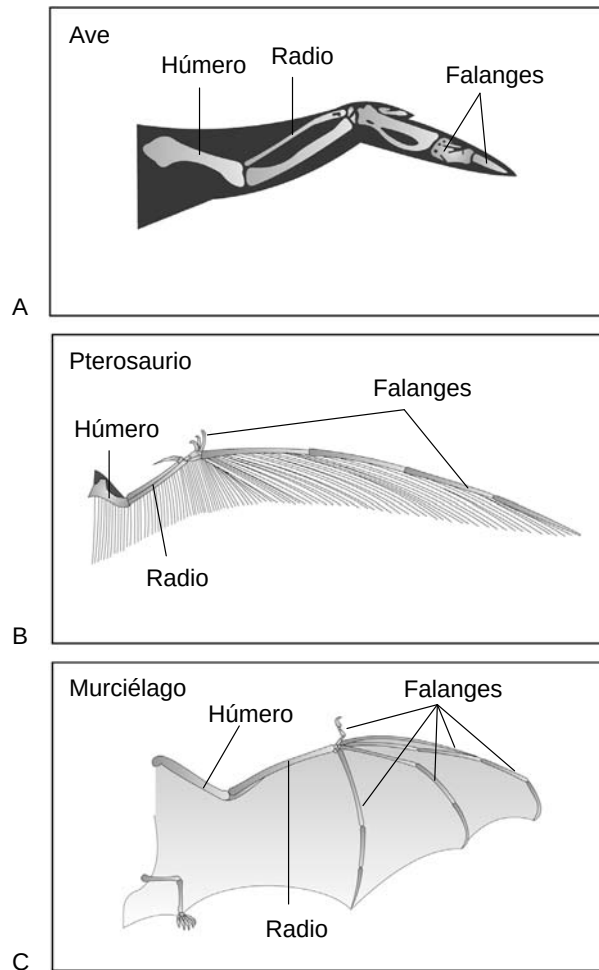


Figura 2-17. Anatomía comparativa de las extremidades superiores de algunos animales voladores: **A.** Ave. **B.** Pterosaurio. **C.** Murciélago.

tarse una sobreexpresión genética mediada por mutaciones en los interruptores, y dar lugar así a miembros anatómicos extras o supernumerarios, como sucede en la polidactilia (más de cinco dedos en una mano).

Repasemos pues, los cuatro secretos para la innovación en la evolución:

- 1. Trabajo con elementos con los que ya se cuenta, modificando estructuras existentes.** La naturaleza trabaja más bien como una persona que trata de arreglar algo, improvisando con los materiales que tiene, modificando y retocando estructuras a lo largo de las épocas, no trabaja como un inge-

niero que cuenta con planos específicos y herramientas especializadas. La naturaleza improvisa. Los mismos genes pueden ser utilizados de diferentes maneras.

2 y 3. Multifuncionalidad y redundancia. Factores reconocidos por primera vez por Charles Darwin; esto es, que cualquier parte o característica de una estructura anatómica o fisiológica, que en un principio parecía redundante, con el tiempo establece una especialización y se vuelve multifuncional. La multifuncionalidad y la redundancia siempre encuentran oportunidades para emplearse.

4. Modularidad. La arquitectura modular de los artrópodos y los vertebrados ha sido, en gran medida, la clave del éxito para la supervivencia. La modularidad ha permitido la modificación y la especialización de partes corporales de manera individual o por separado. El común denominador de la modularidad anatómica en todos los animales corresponde a la organización modular de los embriones y a la lógica de la genética modular de los interruptores. Dichos interruptores dan lugar a los cambios observados en la evolución de alguna parte de la estructura anatómica. Los interruptores son el secreto de la modularidad, y la modularidad es el secreto, clave del éxito, de los artrópodos en los vertebrados.

Con todo esto, la consecuente innovación en la biodiversidad permite la invasión de nuevos nichos ecológicos y la invasión, a su vez, permite la expansión de la diversidad a través del territorio (agua, tierra o aire) disponible.

Todo lo que hemos revisado hasta ahora se aplica a la evolución humana. Es decir, nuestra evolución no es diferente de la de otras especies. La aparición de las características humanas se debe a cambios que modificaron estructuras que existían previamente en los primates y en los grandes simios, y que se han venido acumulando a lo largo de varios millones de años. La evolución de las características anatómicas y fisiológicas que nos hacen humanos será analizada posteriormente, pero no queríamos dejar de mencionar que los humanos y su evolución están sujetos a los mismos principios genéticos evolutivos presentes en todas las especies.

En la actualidad, lo más relevante de la síntesis moderna en el pensamiento evolutivo es la reconciliación entre el punto de vista paleontológico, o macroevolución, y el punto de vista genético, o microevolución. El primero se refiere a la evolución que se aprecia en un nivel por encima de la especiación, haciendo referencia a la especie; el segundo se refiere a las variaciones detectadas en una misma especie o por debajo del nivel de especiación; la síntesis moderna acierta al indicar que los cambios en gran escala o, lo que es lo mismo, en la manera en cómo son visualizados en los registros fósiles, pueden ser explicados como sigue: “la selección natural actuando durante largos periodos de tiempo sobre pequeños

cambios genéticos que producen o son responsables de la variación entre las especies”. Lo anterior es resultado de que se han logrado reunir suficientes evidencias que explican las maneras en que son utilizados ciertos genes del desarrollo muy antiguos (ancestrales) para dar forma a los diferentes tipos de animales, desde el urbilaterio hasta el *Homo sapiens*.

El descubrimiento de que los genes del desarrollo son ancestrales y que se comparten en tipos muy diferentes de animales ha sido un gran avance científico, que ha venido a corroborar la idea de Charles Darwin sobre la descendencia de todas las formas vivientes a partir de un ancestro común. Los genes del desarrollo que compartimos con una considerable cantidad de animales nos han revelado profundas conexiones entre grupos de animales que anteriormente no habían sido apreciadas porque nos habíamos dejado llevar por las dramáticas diferencias anatómicas que se aprecian a simple vista. Además, los genes y las estructuras orgánicas que durante mucho tiempo se pensó que eran invenciones análogas que se habían dado de manera independiente en diferentes animales, como los ojos, el corazón o los miembros articulados, ahora resulta ser que todas ellas cuentan con “ingredientes” genéticos comunes que controlan su desarrollo y formación. Esto nos ha forzado a cambiar, de manera radical, el pensamiento que consentíamos sobre la novedosa aparición de estructuras complejas. De manera que en lugar de que cada uno de los órganos mencionados (entre muchos otros) hubiera sido inventado separada y repetitivamente, por el contrario, cada uno de ellos fue evolucionando mediante la modificación de redes de información reguladoras (interruptores) de la expresión genética ancestrales bajo el comando de los mismos genes Hox del control maestro. La antiquísima historia con la que cuentan los genes maestros del desarrollo revela que la invención de éstos no es el detonante principal para que se dé el fenómeno evolutivo y de la generación de las diferentes especies, sino que representan sólo un camino o manera de hacer cierta labor cuya realización es determinada ecológicamente (selección natural). Lo que logran esos genes del desarrollo, *per se*, es asombroso; el enorme potencial que tienen en cuanto a las combinaciones que se pueden dar entre los genes Hox del desarrollo embrionario actuando sobre un vasto arreglo de posibilidades en los interruptores genéticos da como resultado una gran complejidad y diversidad en todos los seres vivos. Según las palabras de Charles Darwin, 1859: “*endless forms most beautiful*”.

Entonces, la innovación en la evolución ha sido una cuestión que consiste principalmente en la modificación de estructuras ya existentes y en “enseñar nuevos trucos a genes viejos”. La clave para la innovación, hablando a nivel genético, es la multifuncionalidad de los genes del desarrollo, que radica en que su desempeño puede llevarse a cabo en diferentes momentos y lugares del desarrollo del embrión a través de su acción sobre los diferentes interruptores genéticos. Así, una misma proteína de los genes del desarrollo puede inducir la formación de es-

estructuras corporales muy diferentes, siempre y cuando su acción se lleve a cabo en diferentes sitios y momentos del desarrollo.

Podemos ahora formular el siguiente enunciado: misma proteína sobre diferentes interruptores y en diferentes contextos, es igual a la aparición de diferentes órganos o partes corporales. Luego, el sinfín de innovaciones estructurales evolucionan a través de ciclos de invención–expansión–invención–expansión, ya que las nuevas estructuras anatómicas ofrecerán y mostrarán otras formas de vida, que permiten explorar diferentes nichos ecológicos (expansión) y, una vez adaptadas a su entorno, continuar con la innovación para volver a intentar otra expansión. Las aves, los pterosaurios y los murciélagos inventaron las alas, aunque cada ala es diferente, que les permitieron su expansión hacia nuevos y diferentes nichos ecológicos; lo anterior quiere decir que las demandas y oportunidades ecológicas pueden satisfacerse con el mismo tipo de invento: “alas”, aunque en detalle, cada uno de los pares de alas de los animales mencionados sea, en esencia, diferente.

En conclusión, la gran versatilidad de los interruptores genéticos, desde los genes Hox hasta la gran variedad de productos que coordinan, son el común denominador que subyace en la evolución de todas las formas vivientes y, por lo tanto, responsables de todos los cambios, grandes y pequeños; según las revelaciones de toda esta nueva ciencia de la evolución y el desarrollo, podemos decir que la macroevolución es un producto de la microevolución.

A nuestro entender, las proposiciones genéticas basadas en el “juego” de los interruptores de la expresión genética son las responsables de la mayoría de las innovaciones evolutivas que han logrado, con los mismos genes Hox del control maestro, una espectacular diversificación de la vida en nuestro planeta. Sin embargo, hay que comentar otros factores que sin duda alguna intervienen en la “sintonía fina” para que una especie logre adaptarse a su entorno y, en caso de tener éxito, ser seleccionada naturalmente. Podemos decir, por ejemplo, que unos de estos factores son los epigenéticos, o sea, los fenómenos que no tienen nada que ver con cambios en las secuencias de las bases nitrogenadas, pero que influyen o intervienen haciendo variar la expresión de uno o varios genes.

LA SINTONÍA FINA

Heredamos de nuestros progenitores algo más aparte de los genes. Heredamos desde ciertos materiales biológicos existentes en el citoplasma del óvulo hasta muchas otras cosas, como las preferencias, los hábitos alimenticios, las ideas, el hogar y un nicho ecológico; por lo tanto, existen varias maneras para transmitir ciertos materiales e información de padres a hijos. Ya vimos que los interruptores

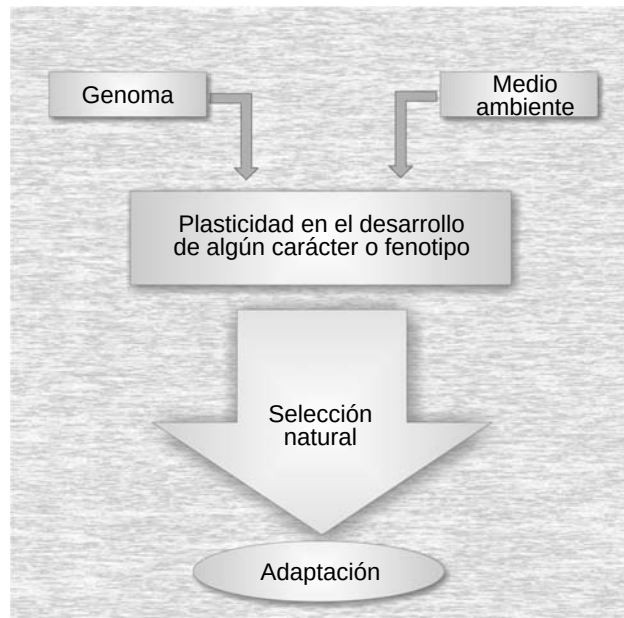


Figura 2–18. Los seres vivos gozamos de una gran plasticidad durante el desarrollo. El DNA no actúa solo ni de manera autoritaria. El medio ambiente interviene también en el desarrollo de un individuo.

o genes reguladores, aunque muy importantes para generar variabilidad, no actúan solos, sino que entran en función otras moléculas reguladoras, que a su vez son el producto de otros genes, o bien el resultado directo o indirecto de ciertos nutrientes u otros factores ambientales; de esta manera, como muchas otras, los factores ambientales participan en el procesamiento de la información genética. Así, los organismos multicelulares, que incluyen a los seres humanos, gozan de una gran plasticidad en el desarrollo. Sí, el desarrollo de cada carácter depende de una gran red de interacciones entre los genes, sus productos y el medio ambiente en el cual suceden. En otras palabras, el DNA no actúa solo ni de manera autoritaria codificando para “lo que debe o no debe hacer”; sino que es sensible y puede expresarse de diferentes formas, dependiendo de los factores del medio ambiente, tanto de adentro como de afuera de la célula (figura 2–18).

Nos adentraremos entonces en las otras tres dimensiones de la evolución. Estas dimensiones no se presentan en lugar del sistema de transmisión genética en forma de DNA, sino que son adicionales a él. Ya vimos que el sistema genético es la base para toda la organización biológica, pero las dimensiones a discutir permiten que se presenten variaciones en los diferentes tipos de información que se transmiten genéticamente. Estas variaciones ocurren en los altos niveles de orga-

nización biológica, o sea a nivel celular, de organismo o incluso de grupo o grupos de organismos. La primera de estas dimensiones es la que ocurre a nivel epigenético y permite que ciertas variaciones en el fenotipo sean transmitidas de una generación a otra. Es decir, todas las células de nuestro organismo comparten exactamente el mismo material genético; sin embargo, y citando un ejemplo, las células de la piel se reproducen constantemente y siempre su descendencia consistirá en células de la piel y no de otro órgano; así, las variaciones en el fenotipo pueden ser heredadas. ¿Cómo puede suceder esto? La diferencia entre las células de diferentes órganos se da por la manera en que cada tipo de célula maneja la información contenida en su DNA, mediante el ya conocido sistema de “prendido y apagado” de interruptores genéticos que caracterizan a un fenotipo celular específico; los sistemas hereditarios epigenéticos (SHE) transmiten la manera como se interpreta la información del DNA para que la hija de una célula de la piel continúe siendo una célula de la piel. Transmiten la inercia del fenotipo celular en lugar del genotipo, de una generación a otra. Pero, ¿mediante qué mecanismos llevan a cabo tal función? Los podemos resumir en cuatro puntos:

1. Se heredan patrones de expresión genética o de actividad genética por parte de las células progenitoras; esto es, se hereda un medio ambiente celular de expresión genética para que las células hijas continúen con el mismo patrón de funcionamiento en una especie de inercia metabólica que se hace sentir en el núcleo de las células y, obviamente, en los interruptores genéticos para que éstos continúen el de sus progenitores.
2. Se hereda también un patrón de memoria estructural o arquitectónica, que tiene que ver con la estructura celular y no con los genes. Significa que las versiones alternativas de algunas estructuras celulares pueden ser heredadas debido a que las estructuras afines y que existen previamente en los tejidos guían la formación de las estructuras similares en las células hijas sin que se requiera DNA como intermediario; el ejemplo más claro está conformado por los *priones*, donde una estructura proteica (el *prion*) puede inducir e induce cambios directamente en otra proteína similar para hacerla igual a ella, sin la necesidad de que intervenga la expresión genética.
3. Las histonas son un tipo de proteínas encargadas de doblar y guardar o empaquetar las cadenas de DNA a manera de cromosomas, permitiendo así la expresión de unos genes e inhibiendo la expresión de otros; resulta que también se hereda la manera en que las secuencias de DNA se “empaquetan” de diferentes maneras dependiendo del tipo celular al que nos referimos en un momento dado; la forma en la que se dobla el DNA en los cromosomas depende de las proteínas histonas que son independientes del DNA.
4. Tienen que ver con el RNA y se llaman retrotransposomas. Recordando un poco el funcionamiento del DNA vemos que la cadena o secuencia de nu-

cleótidos se desdobra y se abre para ser copiada por el RNA; éste, en su forma de mensajero (RNAm), sale del núcleo celular con el mensaje para luego transcribirlo en el ribosoma (RNAr) para que se forme una proteína a partir de los aminoácidos que ingerimos de la dieta. Así, los retrotransposomas son fragmentos de RNAm que en lugar de salir al citoplasma con el mensaje regresan al núcleo celular e integran dicha información de nuevo al DNA, pero en otro lugar de la cadena, lo cual trae como consecuencia cambios en la expresión de los genes, activando o desactivando interruptores o incluso cambiando por completo de lugar a los genes.

En estos cuatro puntos se resume la dimensión de lo epigenético y la manera como puede influir para la evolución de las especies.

Exploraremos ahora otras dos dimensiones que pueden repercutir, en un momento dado, en la evolución de las especies. Una tiene que ver con lo conductual y la otra con lo cultural.

En primer lugar tenemos los sistemas hereditarios conductuales (SHC), y se refieren al aprendizaje logrado mediante la socialización, es decir, a lo que se puede aprender desde y a través de las experiencias de otros miembros de la misma especie.

Podemos clasificar a los SHC en tres tipos de sistemas:

1. El primero tiene que ver con la herencia a través de sustancias que influyen en la conducta de la descendencia; esto es, desde que las especies se encuentran en el útero materno y durante la lactancia los seres vivos reciben información por parte las progenitoras acerca de lo que ellas comen y es fuente segura de alimento para la supervivencia. Se descubrió recientemente que los hábitos alimentarios pueden transmitirse mediante la saliva y el aliento, incluso, en algunos animales, a través del olfateo de heces; también es posible adquirir información gracias a la observación; todo, en conjunto, tiene la finalidad de evitar experimentar en carne propia los efectos indeseables, tóxicos o incluso peligrosos de ciertos productos alimenticios.
2. El segundo tipo de SHC se refiere a la herencia a través del aprendizaje social no imitativo; es la adquisición de la información mediante la observación y aprendizaje a partir de las actividades y experiencias de otros seres con los cuales se interactúa. En Inglaterra existe una especie de ave que se dio cuenta de que al abrir los frascos de leche que dejaba el lechero al pie de puerta podía ingerir el preciado alimento; la noticia entre las aves se divulgó rápidamente y todas empezaron a frecuentar los frascos de leche para alimentarse, pero la manera de abrirlas era diferente: cada ave les quitaba la tapa a su manera. Las aves aprendieron a partir de las experiencias de otras aves a conseguir alimento y experimentaron en cabeza ajena; sin embargo, la manera de efectuar físicamente la tarea fue diferente.

3. El tercero y último tipo de SHC consiste en la herencia a través del aprendizaje social imitativo. A diferencia del no imitativo, se refiere al hecho de aprender no sólo qué hacer (como en el tipo 2) sino cómo hacerlo; se copian con precisión las acciones de otro; por ejemplo: los macacos japoneses comen papas y en una ocasión a uno de ellos, una hembra, se le ocurrió enjuagar una papa en el mar para limpiarla de la arena y comerla cómodamente; por casualidad notó que además de poder comerla limpia adquiriría una sazón salada. Tiempo después, todos los macacos empezaron a realizar exactamente el mismo procedimiento para comerse las papas.

En cuanto a lo cultural se refiere, tenemos que hacer referencia a la comunicación mediante símbolos. La herencia de sistemas simbólicos (SHS) ha permitido, en los seres humanos, transmitir la información generada por miles de generaciones, no sólo entre miembros de una sola familia o comunidad, sino a través de todo el mundo. La información se puede transmitir por medio del lenguaje hablado o escrito, por imágenes y mediante innumerables medios informativos. Toda esta información resulta de gran utilidad, pues concentra el resultado de miles de experiencias humanas. Se hereda, pues, un nicho ecológico muy complejo que invariablemente ha influido en la evolución de los seres humanos.

Con toda esta variabilidad y herencia, junto con el paso del tiempo, las especies buscan adaptarse al medio ambiente. El hecho de adaptarse o no adaptarse tiene mucho que ver con el grado variable en el éxito reproductivo, de manera que, si se cuenta con una gran descendencia, se dice que la especie ha sido seleccionada de manera natural.

Esto es exactamente lo mismo que dijo Charles Darwin hace 150 años. La evolución es variabilidad, herencia, descendencia con modificación, tiempo y selección natural. A Darwin le faltaron todas estas pruebas que hasta ahora se han podido esclarecer, casi en su mayoría, y en sus publicaciones se vio obligado a establecer argumentos por la falta de pruebas contundentes.

Una vez que alguna especie ha sido seleccionada, continúa sometiéndose a otros factores que pueden determinar su destino, independientemente de las proposiciones de su genoma. Veamos: existe una situación conocida como la “deriva genética”, que como su nombre lo indica carece de dirección y se basa en cuestiones aleatorias. Consiste en la evolución del genoma de una población determinada, a lo largo de las generaciones sucesivas, que contribuye a determinar la frecuencia de genes que se da en dicha población. Se dice que es una cuestión de azar porque no en pocas ocasiones depende, por ejemplo, de que un organismo encuentre una pareja sexual para lograr reproducirse; aunque también puede depender de que dicho organismo y sus genes lleguen sanos, fuertes y atractivos a la edad reproductiva para poder heredar sus genes a la siguiente generación. Con frecuencia, cuando los individuos de alguna especie son víctimas de sus depreda-

dores o padecen algún accidente o enfermedad antes de poder tener crías, sus genes no pueden transmitirse y se pierden para siempre. También, para que una especie logre su adaptación a largo plazo, influye otro factor, conocido como el “flujo de genes”, en el que tiene que ver la migración de las poblaciones con respecto a la frecuencia de genes entre ellas. Es decir, cuando ciertas poblaciones se desplazan a otras zonas geográficas, se llevan consigo a los genes que, por ende, dejarán de interactuar con las poblaciones que permanecen en el lugar de origen.

Además, los aislamientos geográficos y el clima son fenómenos importantes para que la frecuencia de genes se incremente en alguna población, de manera que cuando cierto grupo de organismos pertenecientes a una sola especie quedan aislados geográficamente, por ejemplo cuando sube el nivel del mar en una península y la convierte posteriormente en una isla, la frecuencia de genes de esta población aislada empieza a incrementarse, dado que sus individuos se encuentran agrupados en un terreno limitado y dejan de interactuar sexualmente con los individuos en la especie continental. Lo anterior trae como consecuencia que los genes recesivos (los que no se expresan a menos que concuerden o coincidan un par de ellos en un mismo huevo fecundado) puedan manifestarse y expresen la nueva característica de adaptación. Luego, conforme pasa el tiempo, dichas características se van manifestando y acumulando en cada vez más miembros de la especie insular hasta que llegan a diferir sensiblemente de la especie continental de la cual surgieron originalmente. Después de un tiempo todavía más prolongado, llegan a ser tan diferentes que se consideran dos especies diferentes, dado que no pueden interactuar sexualmente. Recordemos que se entiende como especie a un grupo de individuos que comparten ciertas características anatómicas y fisiológicas, a tal grado que les permiten llevar a cabo la reproducción para mantenerse a sí mismos como especie.

Para contrastar, mencionaremos que los fenómenos geológicos y climatológicos, aunados a otros del tipo astronómico, pueden ser, además de fuerzas constructivas, fuerzas con gran poder de destrucción para las especies. Desde el punto de vista de las grandes catástrofes ambientales, como son los impactos de asteroides en la Tierra, las glaciaciones, los movimientos sísmicos, el vulcanismo, las inundaciones y los cambios climatológicos, los genes no pueden ser los directores de la evolución, sino que más bien se vuelven víctimas del medio ambiente, el cual es el responsable del cambio. No hay más que recordar la tragedia que vivieron los grandes dinosaurios en la transición del Cretácico al Terciario, cuando la mayoría de ellos se extinguieron después de que la Tierra sufriera un megaimpacto de un asteroide. Sin embargo, no hay que dejar de reconocer que los genes contribuyen con la materia prima a partir de la cual la vida se genera a sí misma y, así, los dinosaurios que sobrevivieron evolucionaron en aves.

La herencia de nichos ecológicos es un factor más que interviene en el proceso evolutivo mientras los organismos se encuentran en su proceso de adaptación e

incluso cuando ya se han adaptado. En la herencia de nichos ecológicos, los individuos heredan un medio ambiente que ha sido modificado previamente por los antecesores de su misma especie. Por ejemplo, el hombre empezó a tolerar la lactosa (azúcar de la leche) hasta la edad adulta, a pesar de que sus ancestros del Neolítico iniciaron con la actividad ganadera hace aproximadamente 10 000 años.

Todos los factores y fenómenos mencionados hasta ahora entran en juego para originar la evolución. Es la nueva teoría de la gran síntesis moderna. Con la variabilidad mediada por las mutaciones en los interruptores genéticos, los fenómenos epigenéticos, los sistemas de herencia conductual imitativa y no imitativa, la deriva genética, el flujo de genes, los aislamientos y fenómenos geológicos y climatológicos, la herencia de nichos ecológicos y otros, los organismos logran o no logran adaptarse. Si no lo hacen, entonces su especie y su estirpe genética desaparecen para siempre, se extinguen (destino común y a largo plazo de la mayoría de las especies), pero si logran adaptarse y con esto disfrutar de una mayor supervivencia, entonces tienen y cuentan con mejores oportunidades para reproducirse y transmitir sus genes a generaciones futuras: son seleccionados de manera natural.

La selección natural es, pues, un proceso mediante el cual los efectos del medio ambiente conducen a un grado variable de éxito reproductivo entre los organismos. Actúa sobre una diversidad fenotípica existente, reflejo de la diversidad genética. La selección natural no puede, por sí misma, crear nada nuevo (ni órganos ni estructuras anatómicas) sino que actúa favoreciendo a los individuos que poseen características útiles que se pueden seguir perfeccionando o refinando con el tiempo.

Otro aspecto importante y que no debe pasarse por alto es que el rasgo, característica o habilidad, sometido a selección natural, no ha de ser necesariamente físico (estructura anatómica, toxina o defensa), sino que puede tratarse también de algún tipo de comportamiento y así, con el paso del tiempo, el temperamento y otras conductas se siguen perfeccionando.

Existen otros rasgos de los seres vivos que no son objeto o resultado de la selección natural, sino que son neutros y se ven seleccionados simplemente por haber ido acompañando a otros rasgos que sí fueron elegidos después de someterse a la acción de la selección. Pero, si el medio ambiente cambia, dichos rasgos o características neutrales pueden convertirse en algo positivo o, por el contrario, en algo negativo para el común de la especie. Si se torna negativo, la tendencia del rasgo será a la marginación o a la desaparición; por el contrario, si el rasgo neutro se convierte en algo positivo, entonces favorecerá la aptitud reproductiva del individuo. Con el paso de millones de años, los rasgos heredados se van perfeccionando y se afina su adaptación al medio, gracias a que las generaciones subsiguientes son reflejo de los organismos que previamente tuvieron un mayor éxito reproductivo. Claro está que eso ocurrirá mientras el medio ambiente no presente un cambio radical, como lo han demostrado las catástrofes ambientales.

Con todos los fenómenos que intervienen en el mecanismo de la evolución, los organismos se vuelven más aptos en su medio, como si hubiesen sido diseñados a la perfección desde un principio, pero ahora sabemos que no es así, sino que empezando con un genoma “explorador” que desea adaptarse (además de guardar celosamente la información valiosa), algunos organismos logran finalmente el éxito reproductivo; se dice entonces que han sido seleccionados y, si el medio ambiente no cambia y se mantiene estable, entonces el incremento resultante en la proporción de individuos que son reproductores eficaces mejoran la adaptación de la población a su medio ambiente. Muchas veces la adaptación de una especie dura hasta que se presentan cambios radicales en el medio ambiente y, por lo general, como vimos antes, son fenómenos naturales con fuerzas extraordinarias, tales como erupciones volcánicas, cambio de circulación en los océanos, glaciaciones (congelamiento casi global), choques de plataformas continentales, formación o desaparición de mares e impactos de asteroides contra la Tierra, entre otros.

LAS IMPERFECCIONES

Tenemos que aclarar que, aunque la adaptación de los organismos a su medio ambiente nos parece perfecta, lamentablemente no lo es. Todos son vulnerables. Incluso los mecanismos de defensa son ejemplos de esa vulnerabilidad. Por ejemplo, las deposiciones acuosas que sufren los seres humanos como consecuencia de una infección gastrointestinal son una manera de responder a la agresión de la infección y ayudan a desechar rápidamente el microbio invasor debido a que se incrementa la velocidad de los movimientos intestinales; no obstante, cuando se trata de un niño, un adulto mayor o un enfermo debilitado, dicho mecanismo de defensa puede llevar a la deshidratación y a la muerte. Por otro lado, las mismas evacuaciones líquidas y frecuentes son un arma utilizada por los gérmenes para diseminarse y producir más contagios, lo cual también ocurre con la tos y los estornudos, que contagian las vías respiratorias. Otro tipo de vulnerabilidad que se presenta con los mecanismos de defensa es la fiebre. El incremento en la temperatura corporal es la respuesta a una infección (en la mayoría de los casos) que tiene la finalidad de modificarle el medio ambiente al inoportuno huésped (germen), ayudando así al sistema inmunitario a combatir la infección. Sin embargo, una temperatura elevada y constante puede traer graves consecuencias al sistema nervioso central. Todos los organismos son vulnerables, ninguno es perfecto.

Otra vulnerabilidad compete a los conflictos. Todas las especies viven eternamente en lucha y enfrentamientos con otros seres vivos de igual o diferente especie, y pueden ser de todo tipo y características, y microscópicos o macroscópicos.

Es la eterna lucha entre depredadores y sus víctimas, en la que alguien siempre es vulnerable.

Los seres vivos también somos víctimas de la falta de congruencia entre el genoma y el medio ambiente. En no raras ocasiones el medio ambiente cambia velozmente y al genoma no le da tiempo de hacer los “ajustes” necesarios para mantener adaptados a los individuos. Tal es el caso del genoma humano y, por lo tanto, de nuestro fenotipo, que no están programados para enfrentar la manera en que nos alimentamos, y de ahí que surjan ciertos estados mórbidos como la obesidad, la diabetes o la hipertensión arterial; tampoco estamos diseñados para vivir en una sociedad con altos niveles de industrialización, respirando gases nocivos, exponiéndonos a químicos que no existían o que eran muy raros en el ambiente natural de hace 1 000 o 2 000 años. Consumimos una gran cantidad de alimentos con saborizantes y colorantes artificiales, alimentamos al ganado y cuidamos los cultivos agregando cualquier cantidad de químicos no naturales que, aunados al uso y abuso de antibióticos, contribuyen a la aparición de problemas de hipersensibilidad o alergias.

También existen las diferencias genéticas como otro factor que nos hace vulnerables. Recordemos que el polimorfismo simple de nucleótidos hace que ningún individuo sea exactamente igual a otro, incluso entre miembros de una misma especie. No hay dos seres iguales. Estas pequeñas o grandes diferencias brindan diferentes formas o maneras de actuar y de responder ante diversas esferas de la vida. Así, quienes presentan conductas extremas (buscadores de riesgos) tendrán una probabilidad más alta de sufrir un accidente en comparación con quienes prefieren llevar una vida tranquila. Otro ejemplo puede referirse a quienes presentan reacciones secundarias o adversas a ciertos medicamentos, lo cual los hace susceptibles a padecer las consecuencias hasta llegar a ser víctimas de ellas; por lo tanto, hay personas que al ingerir ácido acetilsalicílico (Aspirina®) llegan a experimentar un estado asmático que los lleva a una unidad de terapia intensiva o incluso a la muerte. Lo anterior no depende directamente del medicamento, como lo ha comprobado la mayoría de los que han tomado dicho remedio en alguna ocasión, sino de la interacción del medicamento con la naturaleza única y particular de cada individuo. Estas diferencias genéticas hacen que unos individuos sean más vulnerables que otros.

Por último, recordemos el caso del paludismo y la anemia de células falciformes, donde aparece otra más de las vulnerabilidades, conocida como “tratos a nivel genético”. Resulta que el paludismo, o malaria, es una enfermedad parasitaria caracterizada por fiebre y anemia, que se transmite de un humano a otro mediante la picadura de un mosquito (del género *Anopheles*) infectado por un parásito del género *Plasmodium*. Cuando el mosquito pica al ser humano inyecta al parásito en la sangre. El *Plasmodium* se introduce en los glóbulos rojos para continuar con su ciclo de vida, pero en el proceso termina por romper dichas células sanguíneas,

lo cual conduce a un estado de anemia. Por otro lado, en las zonas endémicas (tropicales) del paludismo se ha descubierto que los humanos que ahí habitan presentan un mayor índice de una enfermedad genética conocida como anemia de células falciformes. Esta anemia, también conocida como anemia drepanocítica, es causada por un tipo anormal de hemoglobina (la proteína dentro de los glóbulos rojos que transporta el oxígeno), llamada hemoglobina S. Sin embargo, la hemoglobina S reduce la cantidad de oxígeno dentro de las células, alterando su forma; y así los glóbulos rojos, que normalmente tienen forma de disco, adquieren una forma semilunar. Como resultado, funcionan anormalmente y causan pequeños coágulos de sangre que dan origen a episodios dolorosos llamados “crisis drepanocíticas”. La anemia de células falciformes se hereda como un rasgo autosómico recesivo, lo cual significa que se presenta en alguien que haya heredado el gen responsable de la producción de hemoglobina S por parte de ambos padres. Es mucho más común en ciertos grupos étnicos (principalmente en clima tropical) y afecta a una de cada 500 personas de raza negra. Pero, ¿qué tiene que ver el paludismo con la anemia de las células falciformes? Pues precisamente un trato a nivel genético que los hace vulnerables. Resulta que quienes son portadores del gen (sólo portadores y no enfermos) tienen una menor susceptibilidad de padecer paludismo, que es una de las principales causas de enfermedad y muerte en esas regiones. Por lo tanto, el trato a nivel genético consiste en portar y mantener el gen “defectuoso” en la población con tal de protegerse contra la enfermedad, a expensas (vulnerabilidad) de que cuando coinciden ambos genes defectuosos en un individuo se manifiesta la anemia de células falciformes.

La evolución dejó de ser una idea, ya no es una hipótesis, y tampoco debe considerarse como una teoría. La evolución es un fenómeno tan real y palpable como la misma naturaleza. Se da desde el nivel molecular hasta los niveles ecológicos regionales y globales. Entendiendo el fenómeno evolutivo nos podemos explicar, en gran medida, nuestras virtudes y defectos, gracias y desgracias, salud y enfermedad; tenemos la obligación de conocerla para actuar responsable y razonablemente con respecto a nuestro entorno y medio ambiente, tanto desde el punto de vista macroscópico como desde el microscópico. Al comprender la evolución entendemos el pasado de la vida en nuestro planeta y el lugar que ocupamos en la naturaleza.

De la historia natural

¿Sería demasiado osado imaginar que, con el paso del tiempo, desde que la Tierra empezó a existir, quizá millones de eras antes del comienzo de la historia del género humano, sería demasiado osado imaginar que todos los animales de sangre caliente salieron de un filamento vivo, provisto de la facultad de continuar mejorando merced a su propia actividad inherente y de transmitir esos mejoramientos de generación en generación a su posteridad?, ¡un mundo sin fin!

Erasmus Darwin

Todo empezó hace 4 500 millones de años. La Tierra estaba recién formada, se acababan de diferenciar sus diferentes capas (núcleo, manto y corteza), y la atmósfera, en aquel entonces, estaba compuesta principalmente por bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y metano; debido a la composición de los gases atmosféricos el cielo no era azul sino anaranjado. El Sol todavía era pequeño, estaba recién nacido y no calentaba lo suficiente. Sin embargo, la Tierra se mantenía templada gracias al calor remanente o residual posterior a la caída de los meteoritos, a las altas concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera y al decaimiento isotópico del uranio contenido en el núcleo terrestre, mismo que activó la tectónica planetaria y que a su vez empezó a darle un mayor volumen a las plataformas continentales. Emergieron volcanes que descargaban a la atmósfera cantidades elevadas de bióxido de carbono, vapor de agua, metano, amoníaco y gases de cloruro de hidrógeno y de sulfuro de hidrógeno. Todos estos elementos, como se verá más adelante, pudieron ser muy útiles para la síntesis de compuestos orgánicos que, dicho sea de paso, no son sinónimos de vida. Otros



Figura 3-1. El libro *Zoonomia*, escrito por Erasmus Darwin, sirvió de inspiración para su nieto Charles.

fenómenos naturales, como las tormentas eléctricas (aportando fotones del electromagnetismo), empezaron a presentarse de manera más o menos repetitiva y las moléculas, tanto las inorgánicas como las orgánicas, también se vieron sometidas a los efectos geológicos y atmosféricos de aquella época. Las moléculas antes mencionadas (bióxido de carbono, monóxido de carbono, metano y amoníaco), junto con una gran cantidad de elementos atómicos simples pero reactivos a su alrededor (hierro, nitrógeno, magnesio, silicio y pequeñas cantidades de oxígeno), empezaron a reaccionar entre ellas formándose, por ejemplo, a partir del amoníaco, del nitrógeno y del metano los primeros ácidos glicólicos y algunos aminoácidos. Estos últimos son moléculas asimétricas más complejas y son compuestos básicos para la formación de las proteínas. Hagamos una analogía: así como un ladrillo sirve para la construcción de una casa, un aminoácido es necesario para la construcción de una proteína. Existe un fuerte debate entre los científicos, pues algunos postulan que los aminoácidos se formaron en la Tierra y otros dicen que llegaron del espacio exterior, pero lo que vale la pena aclarar es que, aunque los aminoácidos son los compuestos principales de las proteínas y son moléculas orgánicas, tampoco se les puede considerar como algo viviente, pues son simples compuestos orgánicos que se utilizan para la construcción de las proteínas. Hay otros descubrimientos recientes e importantes: compuestos químicos como la adenina y la guanina (que son bases nitrogenadas) pudieron haberse sintetizado a partir de esta misma sopa prebiótica en la Tierra primordial. La adenina es una molécula de particular importancia, ya que es uno de los ingredientes principales para constituir los ácidos nucleicos DNA y RNA que forman a los genes

y también es la base para la síntesis de trifosfato de adenosina (ATP), molécula indispensable para el manejo de la energía en las células. Analicemos fríamente: las moléculas antes mencionadas no pueden considerarse como una forma de vida, son simples compuestos orgánicos que han podido sintetizarse en un laboratorio semejando las condiciones que reinaban en la Tierra hace 4 000 millones de años.

Las zonas rocosas del fondo del mar y de los litorales son indispensables para encontrar algunas explicaciones al origen de la vida. Veamos, contamos con los elementos químicos, moléculas orgánicas pequeñas y con un medio ambiente cargado de fotones muy dinámico que induce, acelera y facilita las reacciones químicas entre los diferentes átomos y moléculas. Tenemos moléculas orgánicas pequeñas que empiezan a reaccionar una y otra vez sin cesar. Durante millones de años reaccionan unas con otras logrando crear a veces uniones fuertes entre ellas que resisten las presiones ambientales, pero otras veces las reacciones que las unen son muy débiles y se vuelven a fragmentar. Infinidad de reacciones químicas se llevaron a cabo en todo el planeta. Dichas reacciones se presentaron en todos los rincones del planeta: en la atmósfera, en los océanos y también sobre las rocas. De hecho, las reacciones químicas que se llevaron a cabo sobre las rocas son las más admisibles para explicar el origen de la vida: la piedra magnetita, que es un mineral óxido de hierro, puede detonar la recombinación de nitrógeno y gases de hidrógeno para formar amoníaco. En otras palabras, esta piedra puede inducir y facilitar una reacción química entre el nitrógeno y los gases de hidrógeno para producir amoníaco, compuesto esencial que las células necesitan para formar moléculas proteicas. Otro ejemplo es el de los minerales que sirvieron como contenedores. Todos hemos notado que las superficies de las rocas no son lisas, sino que tienen irregularidades y porosidades, sitios que pudieron servir como resguardo y acomodo a moléculas orgánicas para formar, después de varios ensayos y mucho tiempo, algunas moléculas cada vez de mayor tamaño. Bajo la influencia de los fenómenos ambientales, grandes colecciones de moléculas orgánicas se acumulaban e interactuaban entre sí. Algunas se comportaban de manera más estable que otras y por lo mismo su existencia perduraba. Otras se descomponían o sus enlaces se rompían y dejaban de existir. Entre las moléculas exitosas se establecieron uniones cada vez más fuertes y lograron desarrollar tamaños muy grandes; también lograron resistir los efectos del medio, tales como las mareas, las tormentas y las diferencias de temperatura y presión. A partir de este momento podemos aplicar los conceptos de selección natural propuestos por Charles Darwin: las moléculas más aptas, las más resistentes a los efectos del medio ambiente (presión de selección natural), eran las que persistían por un mayor tiempo y las menos aptas eran destruidas rápidamente. Ésta es evolución química, la evolución darwiniana a un nivel molecular. Vale la pena aclarar que el término “evolución” debe ser aplicado a los cambios observables en los seres vivos

con el paso del tiempo, pero aquí se ha querido aplicar el concepto evolutivo a nivel molecular, no porque se trate de complejos químicos “vivos”, sino con la finalidad de entender que solamente las estructuras moleculares con enlaces muy estables y fuertes lograron permanecer para, con el tiempo, transformarse en otras diferentes o de mayor tamaño.

De entre miles de billones de moléculas, sólo algunas fueron seleccionadas de manera natural para dar lugar al origen de la vida. Dichas moléculas se acumularon en una gran variedad de combinaciones y el resultado final fue un alto grado de complejidad. Las moléculas ganadoras fueron las que presentaron cierto tipo de uniones que les permitieron desarrollar habilidades químicas útiles para mantenerse firmes ante la adversidad del medio ambiente. No fue una selección al azar, sino que las moléculas más aptas fueron las triunfadoras. Todas estas moléculas se aglomeraron sobre las rocas formando una capa delgada, babosa y resbalosa, parecida a la que se forma en algunos depósitos de agua, como una pila. Sucedió en las rocas de la costa oceánica, en la orilla de los lagos o en las profundidades. A veces esta capa gelatinosa se secaba a la intemperie y en otras ocasiones se desprendían porciones de ella de tamaño variable, según lo fuerte de las mareas o el choque de las olas.

En las capas resbalosas que se formaron a partir de la aglomeración de cualquier cantidad de moléculas sobre las rocas bien pudo haber aparecido una gran variedad de moléculas muy complejas acompañadas de otras más simples o no tan sofisticadas que lograron cooperar de alguna u otra manera en lo que se denomina “hiperciclos”. Esto se explica así: una molécula A pudo inducir una reacción en la molécula B, misma que a su vez ocasionó una modificación en la molécula C para que se mantuviera estable la molécula A, cerrando un ciclo que tiende al equilibrio. Cabe mencionar que en estos hiperciclos pueden interactuar varios cientos o miles de moléculas y no solamente tres. Los hiperciclos son el resultado de un proceso de organización progresiva en los sistemas químicos que tienden a una organización automática en las moléculas que los componen. Estos eventos de organización y cooperación entre las moléculas con tendencia al orden y al equilibrio posiblemente se llevaron a cabo en las capas gelatinosas, dando como resultado una colección cooperativa de estructuras moleculares muy diferentes entre sí, pero que, trabajando juntas, fueron capaces de mantenerse a sí mismas. Cabe mencionar que la mayoría de las moléculas en los hiperciclos debieron estar compuestas por los átomos que predominan en los organismos vivos: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON).

Algunos investigadores proponen que una de las moléculas más exitosas del mundo prebiótico fue precisamente el RNA, una de muchas que lograron sobrevivir, y tan importante que de hecho han propuesto que a esa era se le llame “el mundo RNA”. La importancia de esta molécula deriva de su comportamiento químico, que es muy versátil, puede guardar información, es capaz de ayudar en

ciertas reacciones químicas fungiendo como un catalizador o enzima (acelerando reacciones químicas) y, por si fuera poco, logra hacer copias de sí misma. Como vimos en su momento, el RNA está constituido por una cadena de compuestos químicos llamados nucleótidos; cada nucleótido, a su vez, está conformado por una molécula de un azúcar denominada ribosa, un fosfato y uno de cuatro posibles compuestos nitrogenados llamados bases, a saber: adenina, guanina, citocina y uracilo. Por lo regular las cadenas de RNA son muy largas, pero cuando formaron parte de las moléculas primordiales en los hiperciclos de las capas gelatinosas de aquella época dichas cadenas de RNA pudieron haber estado constituidas por apenas tres nucleótidos, pequeñas cadenas de tres, conocidos como oligonucleótidos (pocos nucleótidos), pero con la capacidad de reaccionar y unirse a los aminoácidos que debieron abundar también en el mismo medio. Las uniones entre los oligonucleótidos y los aminoácidos se dieron gracias a la presencia de otra molécula, una enzima denominada ribosima 2. Una vez unidos, el oligonucleótido y el aminoácido formaron un cofactor. Cuando el cofactor se unía a otra enzima, conocida como ribosima 1, entonces tenían la capacidad de actuar juntos para catalizar o acelerar alguna otra reacción química (recordemos nuevamente al fenómeno de los hiperciclos que se da en la química), y cuando la ribosima 1 utilizaba dos o más cofactores (cada uno con su aminoácido) entraba en acción otra enzima, conocida como ribosima 3, misma que se encargaba de enlazar o enganchar un aminoácido con otro, como eslabones en una cadena. Es posible que se iniciara así una maquinaria con la capacidad de fabricar proteínas, ya que las proteínas no son otra cosa sino cadenas de aminoácidos, en una especie de ancestro bioquímico para la síntesis de proteínas a partir de información almacenada en los oligonucleótidos. En la bioquímica actual, la síntesis de proteínas en todas las células de cualquier ser viviente se debe a la interacción de la información contenida en el RNA con los aminoácidos que provienen principalmente de la dieta a partir de la cual se nutren los organismos vivos. Solamente el RNA puede desempeñar ambas funciones, puede almacenar información del código genético (instrucciones para la síntesis proteica) y también puede llevar a cabo un trabajo enzimático (ribosimas), que es un trabajo bioquímico indispensable para la formación de proteínas. Estas dos características hacen que la molécula de RNA sea un fuerte candidato para explicar el origen de la vida y el origen de los genes (figura 3-2).

Sin embargo, el RNA tiene un pequeño defecto: es una molécula inestable, por lo que es probable que haya tenido un antecesor muy parecido a ella, conocido ahora como ácido nucleico peptídico, o NPA, que es mucho más estable. Con respecto a la organización molecular que dio pie, en un sentido cada vez más complejo, al origen de la vida, tenemos por un lado a las moléculas relacionadas con los genes, que son los ácidos nucleicos NPA y RNA, que se originaron de entre tantas moléculas en el mundo prebiótico, y por otro lado a muchas moléculas más

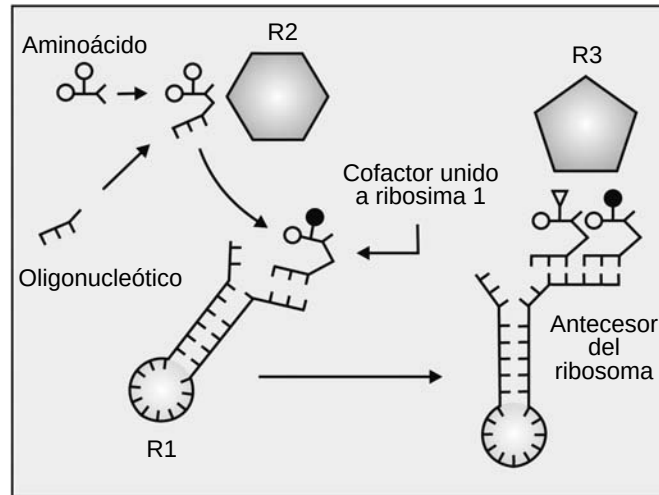


Figura 3-2. Ribosimas. Ver el texto para una explicación detallada.

interaccionando en los hiperciclos de los medios gelatinosos en una especie de metabolismo primordial. ¿Qué sería lo que se formó primero, los genes o el metabolismo? ¿Los ácidos nucleicos o los hiperciclos moleculares de las capas gelatinosas? Lo más probable es que los genes hayan aparecido muy poco tiempo después de que cierta organización molecular se llevara a cabo en el mundo de las capas gelatinosas, en el siguiente orden: presencia de elementos químicos, caos molecular, orden molecular (hiperciclos o metabolismo) y genes (ácidos nucleicos). En un sentido más elaborado, las organizaciones moleculares en las capas gelatinosas pudieron proveer a los genes con algo de protección, materias primas, energía y moléculas en el momento de la reproducción de los mismos (NPA y RNA). Posteriormente, los ácidos nucleicos también pudieron proveer al medio gelatinoso una forma para administrar y almacenar información química. Cuanta más información almacenada tuvieran estas agrupaciones moleculares, más fácil sería su existencia. Además, si se cuenta con una manera de almacenar información, entonces se tiene la capacidad de adquirir más información. Todo esto pudo haber ocurrido en esas capas delgadas, pegajosas y gelatinosas sobre las rocas. Un simulacro de vida, un “seudo organismo” pudo haber operado a este nivel molecular. Este material sobre las rocas quizá carecía de la capacidad para reproducirse, pero sí contaba con la posibilidad de atraer a otras moléculas con propiedades similares (una propiedad podría ser la facilidad para adosarse sobre las rocas) desde la sopa primordial que lo rodeaba. Mediante este mecanismo de atracción se reponían de las pérdidas resultantes cuando algunas moléculas eran desprendidas de las capas por las olas y mareas que llegaban a romper las uniones químicas.

Tenían la capacidad de mantenerse a sí mismas. Esto es sólo un simulacro de vida, todavía no es vida como tal, eran moléculas con propiedades similares que tendían a acumularse en un medio ambiente que las favorecía hasta que un factor adverso barría con ellas.

EL PROTOBIONTE

Durante el tiempo en el que se formaron las capas gelatinosas en las superficies rocosas, es posible que hayan existido unas estructuras moleculares conocidas como protobiontes. Los protobiontes son estructuras moleculares que tienen la capacidad de reproducirse o de hacer copias de sí mismos y están constituidos por un minúsculo fragmento de ácido nucleico (NPA o RNA). Los químicos y la energía necesaria para su reproducción se obtendrían del mismo medio o complejo molecular que los rodeaba. Es factible que los protobiontes hayan sido las primeras entidades con capacidad reproductora y, al igual que lo hacen los virus en el presente, los protobiontes sólo se reproducían dentro de sus hospedadores (el medio gelatinoso). Cabe aclarar que la capacidad que tiene el RNA (la molécula genética más arcaica) de hacer copias de sí mismo se ha comprobado una y otra vez en el laboratorio mediante una reacción llamada polimerización. La polimerización es el conjunto de reacciones químicas en las que las moléculas se combinan para formar otras en las que se repiten las unidades estructurales de las primeras. No debemos olvidar que en el mecanismo reproductivo de una sola molécula podían obtenerse millones de la misma mientras se encontrara en un sustrato hospedador favorable. Hasta ahora tenemos a una molécula que hace copias de sí misma dentro de un medio ambiente seguro que satisface sus necesidades y, aunque el protobionte agotara los recursos para su reproducción, el mismo medio se encargaba de atraer a más y más compuestos de manera natural desde la sopa orgánica primordial. Podríamos estar hablando de que el protobionte fue una clase de parásito molecular en un medio ambiente también molecular que le brindó protección y medios para su reproducción.

La materia prima para la construcción del protobionte fue muy variable y, como resultado, las copias no tendrían que haber sido exactas al original, presentándose por lo tanto un muy alto índice de mutaciones. Como ya se comentó, una mutación es un cambio en la secuencia de las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos que lleva a un cambio en la información de una molécula determinada. Con los años, algunas versiones de estas moléculas con capacidad reproductora empezaron a afectar de una u otra manera a su medio ambiente circundante, puesto que utilizaban moléculas y espacio del mismo. La manera como los protobiontes afectaron su entorno se dio por una simple acumulación de su número hasta

saturar la capacidad contenedora de la capa gelatinosa hospedadora. Aquí es muy importante mencionar de nuevo a la evolución darwiniana: cuando una molécula con capacidad reproductora empieza a modificar su medio ambiente, en cierto momento tiene que evolucionar para compensar los cambios que está causando en su entorno. ¿Cómo puede darse este suceso? Un protobionte empieza a reproducirse de manera desmesurada hasta que se percata de que está consumiendo el medio ambiente al punto de que ya no cabe en él. Entonces tiene que proponer soluciones para resolver los problemas, en otras palabras, tiene que evolucionar. Para que este mecanismo se lleve a cabo de manera satisfactoria no se establece una sola propuesta de solución, sino miles de ellas, de las cuales la mayoría no solucionarán el dilema ante la nueva situación, pero algunas sí lo harán. Estas moléculas denominadas protobiontes fueron sometidas a una fuerte presión de selección natural hasta que iniciaron la producción de otras moléculas proteicas diferentes que ayudaron al medio ambiente a repararse a sí mismo y a crecer en tamaño para dar espacio suficiente a los protobiontes subsecuentes, que eran cada vez más numerosos. Fue entonces cuando la relación dejó de ser parasitaria y surgió una relación en donde ambas partes (protobionte y medio gelatinoso) se aportaron beneficios y se vieron recompensados mutuamente. Si el protobionte se reproduce al grado de no caber en el medio hospedador, entonces él mismo se encargará de sintetizar moléculas para ayudar al medio a repararse y a crecer. Por ejemplo, algunas de estas moléculas pudieron constituir proteínas con sitios específicos para fijar azúcares, otras tuvieron la capacidad de ayudar al protobionte a crecer, otras más repararon la capa protectora superficial del medio y algunas más atrajeron a otras nuevas, que se llegaron a utilizar como materia prima para construir al protobionte propiamente dicho. Finalmente, nuevas clases de protobiontes lograban invadir diferentes áreas del medio gelatinoso sin despojarlo de sus recursos y algunos de ellos sintetizaron moléculas para los hospedadores, obteniendo así un beneficio mutuo.

Lo escrito anteriormente es un fuerte paradigma para explicar el origen de la vida, ya que ofrece una explicación acerca del inicio de los genes y del metabolismo, y de la manera en que entre ambos han avanzado de lo más simple a lo cada vez más complejo. El metabolismo ofrece la estabilidad en el medio y los ácidos nucleicos o genes aportan una manera de almacenar la información y también variabilidad para explorar el medio y aportar soluciones que beneficien la relación. A esta hipótesis sobre el origen de la vida se le conoce como la hipótesis del origen dual, la cual postula que la vida no tiene un origen único sino dos: por un lado los ácidos nucleicos y por otro los sistemas metabólicos, ambos con dirección hacia un punto convergente llamado protobionte (figura 3–3).

Al igual que las galaxias, las estrellas y los planetas, todo tuvo su origen en un nivel molecular. En términos bioquímicos, y para continuar con el origen de la vida, llegó un momento en el que las reacciones químicas que daban lugar a la

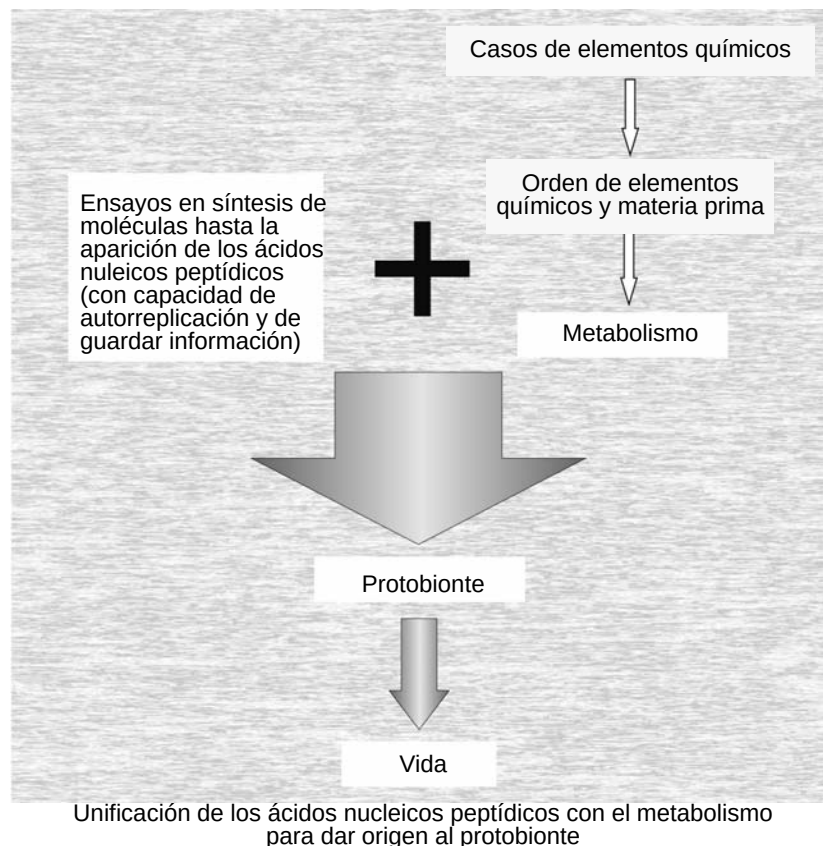


Figura 3-3. Hipótesis del origen dual. La vida no tiene un solo origen, sino dos: por un lado los ácidos nucleicos y, por el otro, los sistemas metabólicos.

© Editorial Alii. Fotocopiar sin autorización es un delito.

síntesis de nuevas proteínas, que en su conjunto se encontraban flotando frágiles y sometidos a los sucesos de su alrededor, necesitaron estar protegidas en un entorno más limitado. Se volvió indispensable contar con una pared o membrana que al envolver a un grupo de proteínas pudiera aislarlas, aunque fuese parcialmente, del medio ambiente hostil. Al parecer, no fue un gran problema y se resolvió fácilmente, ya que los mismos hidrocarburos que llegaron en los meteoritos aportaron la solución. Los hidrocarburos son moléculas de gran tamaño formadas por átomos de carbono y de hidrógeno, que ofrecen una característica muy especial, pues son capaces de formar vesículas grasas que funcionan como aislantes; es probable que todas las personas hayamos visto cómo estas vesículas grasas flotan en un plato de sopa perfectamente aisladas del agua que las rodea.

Los científicos del Centro de Investigaciones Ames de la NASA han logrado reproducir en el laboratorio cómo la vida en la Tierra pudo originarse a partir de

luz sobre nubes de hielo. Utilizaron los ingredientes que se encuentran en las nubes de hielo entre las estrellas, como agua, monóxido de carbono, bióxido de carbono, metanol y amonio hasta formar una mezcla amorfa de hielo. Después irradiaron el hielo con fotones generados por una lámpara de rayos ultravioleta y el resultado fue que no quedó algo de hielo ni gas, sino que obtuvieron “estructuras vesiculares” con la capacidad de capturar otras moléculas en su interior. Las vesículas obtenidas en dicho experimento cumplieron con todas las características de las membranas celulares que están conformadas por lípidos. Es una teoría sorprendente, ya que hay que recordar que cuando la Tierra era joven no contaba con una capa de ozono que la protegiera de las radiaciones solares y, nuevamente, todos los ingredientes necesarios llegaron desde el espacio exterior.

Finalmente, hay que considerar que hubo millones de experimentos de vida que intercambiaban información molecular, pero solamente una combinación o mezcla de componentes fue estable durante el tiempo necesario para evolucionar a una sopa de ancestros comunes.

Una molécula formada de ácidos nucleicos (NPA o RNA) con la capacidad de almacenar información y realizar trabajos enzimáticos, que lograra proponer soluciones para adecuarse al ambiente, que se adaptara al medio metabólico y que ambos, los ácidos nucleicos y el medio metabólico, estuvieran protegidos o cubiertos por una membrana de lípidos, podría ser considerada como un ser vivo, como el origen de la vida, ya que cumplía con los requisitos indispensables para la misma: capacidad de reproducción y habilidad para proponer soluciones ante problemas enfrentados en el medio ambiente (evolución); los dos son el común denominador para todas las formas vivientes. ¿Cuándo sucedió? Según diferentes estudios sobre los registros más antiguos que muestran ciertas huellas de vida, podemos decir que sucedió hace 3 500 millones de años aproximadamente, o sea mil millones de años después de que terminó de formarse la Tierra hace 4 650 millones de años; al respecto son varias las huellas fósiles estudiadas:

- Carbono ligero. Se han descubierto en Groenlandia rocas que se formaron hace 3 700 millones de años, en cuyo interior hay rastros de un carbono conocido como ligero; a diferencia del carbono pesado, que se encuentra en materiales no biológicos, el carbono ligero refleja la preferencia que tienen los organismos vivos por este elemento conforme convierten el bióxido de carbono en material celular.
- Estromatolitos. Son formaciones construidas por colonias de microbios. En el noroeste de Australia se descubrieron fósiles de estromatolitos que datan de hace 3 500 millones de años.
- Microfósiles. Remanentes fosilizados de células que alguna vez vivieron. Se encontraron también en el noroeste de Australia y datan de hace 3 500 millones de años.

- **Minerales biológicos.** Son granos minerales productos de células vivas, encontrados en Australia, con una antigüedad de 3 900 millones de años. Este hallazgo es debatido actualmente. También se encontraron en un meteorito de Marte.
- **Fósiles moleculares.** Moléculas orgánicas complejas muy parecidas a las que utilizan las células en la actualidad, principalmente hidrocarburos encontrados en Australia de hace 2 700 millones de años. Son los vestigios de vida más aceptados, no hay disputa ni debates. También son evidencia de unas células llamadas eucariotas (son aquellas células que, como se verá más adelante, contienen un núcleo verdadero) y también de otras conocidas como cianobacterias productoras de oxígeno.

EÓN

Vale la pena hacer un pequeño y útil paréntesis para ordenar la historia de nuestro planeta, la cual se ha dividido en diferentes partes para poder ubicar los hallazgos fósiles. Un eón es la división principal del tiempo geológico. Los eones son las principales unidades que los geólogos utilizan para medir la edad de la Tierra. Se dividen en eras, y éstas en periodos, mismos que a su vez se dividen en épocas. Los eones en los que se divide la historia de la Tierra son el Precámbrico (desde hace 4 650 millones de años hasta hace 540 millones de años) y el Fanerozoico (desde hace 540 millones de años hasta la actualidad). El eón precámbrico a su vez se divide en tres eras, que son la Prearcaica (que se extiende desde la formación de la tierra hace 4 650 millones de años hasta hace unos 3 800 millones de años), la Arcaica (desde hace 3 800 millones de años hasta hace 2 500 millones de años) y la Proterozoica (de 2 500 millones de años hasta hace 540 millones de años); el Fanerozoico se divide también en tres eras, conocidas como la Paleozoica (de hace 540 millones de años hasta hace 248 millones de años), la Mesozoica (de los 248 millones de años hasta los 65 millones de años) y por último la Cenozoica (de hace 65 millones de años a la fecha). Más adelante ubicaremos los acontecimientos de acuerdo con los eones, las eras, los periodos y las épocas especificando el significado de cada una de ellas. El origen de la vida pertenece a la era Prearcaica del eón precámbrico (cuadro 3-1).

LA VIDA Y EL “FILO DE LA NAVAJA”

Definir lo que está vivo de lo que no lo está depende de las características o cualidades de la vida que queramos tomar en cuenta. Anteriormente mencionamos que

Cuadro 3–1. Divisiones en la historia de nuestro planeta

Eón	Era	Periodo	Época	Años
Precámbrico	Prearcaica			4.6 mda – 3.8 mda
	Arcaica			3.8 mda – 2.5 mda
	Proterozoica	Paleoproterozoico		2.5 mda –
		Mesoproterozoico		–
		Neoproterozoico		– 540 mda
	Fanerozoico	Paleozoico	Cámbrico	540 mda – 500 mda
			Ordovícico	500 mda – 439 mda
			Silúrico	439 mda – 409 mda
			Devónico	409 mda – 360 mda
			Carbonífero	360 mda – 290 mda
			Pérmico	290 mda – 250 mda
		Mesozoico	Triásico	250 mda – 206 mda
			Jurásico	206 mda – 144 mda
			Cretácico	144 mda – 65 mda
	Cenozoico	Terciario	Paleoceno	65 mda – 55 mda
			Eoceno	55 mda – 34 mda
			Oligoceno	34 mda – 23 mda
			Mioceno	23 mda – 5 mda
			Plioceno	5 mda – 2.6 mda

mda = millones de años.

un requisito indispensable para la vida era la capacidad reproductora. Pero, ¿qué pasa por ejemplo con las mulas? Una mula es hija de un asno y una yegua o de un caballo y una burra. La mula casi siempre es estéril, aunque no por ello deja de estar viva. Así que todo depende de los atributos o restricciones que se le apliquen a la definición y entre los cuales tenemos los siguientes: nacer, crecer, reproducirse, morir, respirar, comer y generar excretas, reproducirse sexualmente, evolucionar por selección natural, genes y metabolismo, y contar con moléculas biológicas. Un perro, por ejemplo, cumple con todos los atributos mencionados con anterioridad, pero la mula por lo regular no lo hace, ya que, como dijimos antes, casi siempre es estéril y no puede reproducirse de manera sexual ni asexual. Por otro lado, una bacteria es un ser vivo, cumple con la mayoría de los atributos pero no presenta reproducción sexual sino asexual, y aunque unas respiran otras pueden vivir sin hacerlo; las bacterias se reproducen y cuentan con autonomía bioquímica, llevan consigo actividades metabólicas que les proporcionan las moléculas y la energía necesarias para sostenerse con vida. En contraste, los virus no respiran, no crecen, no comen ni generan excretas, no presentan reproducción sexual ni tampoco llevan a cabo algún metabolismo. Sin embargo, se reproducen

y evolucionan. Por lo tanto, hay quienes piensan que los virus son seres vivos y hay quienes lo niegan, pero el debate continúa.

De todas las propiedades antes mencionadas que caracterizan a un ser vivo, solamente la reproducción y la evolución por selección natural son las más aceptadas para definir vida. Es decir, la vida es cualquier sistema químico que pueda replicarse, ser sometido y responder de una u otra manera a la presión ejercida por las fuerzas de selección natural. Los virus se reproducen y son sometidos a la selección natural, aunque no cumplen con el nivel de autonomía bioquímica esencial (metabolismo) para la mayoría de las definiciones. Podemos concluir que, aunque los virus no son seres totalmente vivos, son algo más que materia inerte. Se encuentran en el “filo de la navaja” de la vida. Sin embargo, la función que desempeñan los virus en la Tierra es mucho más importante e interesante que caer en discusiones bizantinas acerca de si están vivos o no. Los virus interactúan con el material genético de todos los seres vivos y, aunque la mayoría son ino- cuos, el potencial que tienen para visitar varios genomas permite la invención de nuevos genes, contribuyendo de manera importante al cambio evolutivo. Los virus son importantes para la vida.

Regresemos ahora a nuestra historia en donde la dejamos, con los primeros seres vivos de hace 3 500 millones de años.

Conforme los sistemas bioquímicos dirigidos por el RNA se fueron haciendo más complejos, dicha molécula perdió parcialmente su capacidad de llevar a cabo todas las funciones, como guardar información, llevar información de uno a otro lado de la célula, trabajos enzimáticos y síntesis de proteínas, por lo que se vio obligada a fabricar una molécula de mayor tamaño y también más estable que se encargara de guardar la información con seguridad para poderla transmitir a las generaciones futuras: el DNA, material genético de todos los organismos celulares y casi todos los virus, encargado de transmitir la información necesaria para la producción de las proteínas y la replicación celular. A partir de este momento, el RNA copiaría la información guardada en el DNA de las células para llevarla al citoplasma, sitio donde tomaría parte también en la síntesis de las proteínas (producción de las proteínas que necesitan las células para realizar sus actividades y desarrollarse), mismas que cumplirían con una gran variedad de funciones: estructurales, toxinas, defensas, enzimas digestivas y de otros tipos, canales en las membranas celulares y servicio de mensajería, entre otras.

Se piensa que la primera forma indiscutible de vida pudo haber sido un microbio extremófilo anaeróbico (que no necesita oxígeno para vivir) llamado “termófilo” (de los microbios que viven a temperaturas y presiones extremas en ausencia de oxígeno), conformado por sus ácidos nucleicos y un medio metabólico rodeados por una pared celular. Quizá estos seres obtenían su energía mediante la absorción de productos energéticos provenientes del medio ambiente o de la síntesis de dichos productos mediante reacciones químicas simples. Este grupo de micro-

bios fue descubierto y estudiado en 1970 por algunos científicos que decidieron buscar gérmenes en el agua expulsada de un géiser y, efectivamente, los encontraron. Son seres vivos que pueden vivir a temperaturas de hasta 100 °C y por esto se les denominó termófilos. Otros investigadores se han sumergido en los océanos a bordo de submarinos especiales para explorar las fumarolas que se encuentran a grandes profundidades (una fumarola consiste en la emisión de gases sulfurosos y vapor de agua cargados de algunas otras sustancias procedentes de un conducto volcánico pero localizado en el lecho oceánico a una profundidad aproximada de 3.5 kilómetros, donde prevalece una oscuridad absoluta), pues aquí también encontraron microbios; la temperatura de una fumarola asciende a los 150 °C, por lo que a los microbios se les dio el nombre de “supertermófilos”. También se han encontrado otros viviendo en condiciones de extrema acidez o alcalinidad y unos más que son capaces de sintetizar metano, a los que se les conoce como “metanógenos” o generadores de metano. A todo este grupo de microbios se les clasifica en la actualidad en el súper reino de las Arqueobacterias o *Archea*, palabra que significa “ancestros”. Las arqueobacterias o archeas tienen formas de vida que nos pudieran parecer extrañas en la actualidad, pero cuando dominaron el planeta, hace 3 500 millones de años, eran de lo más común. Las archeas pueden obtener su energía a partir de formas oxidadas de hierro, azufre y manganeso, y logran vivir sin necesidad de luz solar, y algunas (las anaerobias) sin necesidad de oxígeno. También pueden vivir alimentándose de productos inorgánicos disueltos en las rocas. El descubrimiento de estos seres vivos “extremófilos” nos lleva a tomar en consideración dos puntos importantes: el primero es plantearnos la posibilidad de que exista este tipo de vida en otras partes del Universo, y el segundo, que de cualquier manera la vida tiene ciertos límites físicos, pues puede florecer solamente dentro de un rango de temperatura y presión que permita la existencia de agua en estado líquido, que es un requisito indispensable.

Ya analizamos cuándo empezó la vida (hace 3 500 millones de años) y cómo fue que lo hizo (mediante la unificación de los ácidos nucleicos con los complejos metabólicos, rodeados de una pared celular); sólo falta aclarar en dónde. Gracias al descubrimiento de las archeas y de sus nichos ecológicos se piensa que la vida se originó en las profundidades de los océanos, sobre las rocas que rodean las fumarolas hidrotermales.

OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA

Todas las reacciones químicas que dan sustento a las formas vivientes requieren energía para poderse llevar a cabo. Se necesita forzosamente el intercambio de electrones. Veamos: la energía se almacena en los átomos y los átomos forman

moléculas, de manera que al fragmentar moléculas, la energía almacenada en los enlaces para su previa formación es liberada. Siguiendo estos principios, algunas archeas, por ejemplo las generadoras de metano, que es el gas inflamable que sale de las aguas pantanosas, llevan a cabo la siguiente reacción: utilizan el hidrógeno y el bióxido de carbono para producir agua y gas metano, y de esta manera obtener energía. Luego, la energía obtenida en forma de electrones es almacenada en una molécula conocida como trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas en inglés). El ATP, a su vez, está conformado por una molécula de adenina (compuesto que contiene nitrógeno y que también es uno de los componentes principales de los genes), una molécula de ribosa (azúcar) y, obviamente, por tres fosfatos. Cada uno de los tres fosfatos está formado por un átomo de fósforo y cuatro de oxígeno, y el conjunto de los tres fosfatos se encuentra unido a la ribosa mediante uno de los cuatro átomos de oxígeno. Las dos uniones o puentes entre los tres fosfatos son de alta energía, relativamente débiles, y cuando las enzimas los rompen ceden la energía con facilidad. Con la liberación del grupo fosfato (el que no está unido a la ribosa) se generan siete kilocalorías de energía disponible para la realización de diversos trabajos celulares; así, la molécula de ATP se convierte en una molécula de ADP (difosfato de adenosina). La mayoría de las reacciones celulares que consumen energía están potenciadas por la conversión de ATP en ADP, tales como la síntesis de proteínas, la duplicación celular, el movimiento de los músculos o la transmisión nerviosa, entre muchísimas otras. Luego, el ADP recupera la tercera unidad de fosfato mediante reacciones químicas que utilizan la energía proveniente de los alimentos. Así pues, las moléculas de ATP altamente energéticas son utilizadas para proveer energía a otras reacciones químicas necesarias para la incorporación de diferentes elementos atómicos indispensables para el crecimiento y funcionamiento celular, tales como el nitrógeno, para formar más ácidos nucleicos y más ATP, o el carbono, para formar estructuras orgánicas. Es notable cómo todos los seres vivos almacenamos energía de la misma manera, en moléculas de ATP, lo cual apoya la teoría de que todos compartimos un ancestro común. Además, todos guardamos la información genética en ácidos nucleicos y compartimos muchas otras reacciones químicas básicas del metabolismo.

Otras archeas reducen sulfatos y producen sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es venenoso; estas reacciones que se observan en las archeas extremófilas son capaces de lograr que se obtenga energía casi en cualquier parte del medio ambiente. Se “alimentan” directamente de compuestos químicos simples que se encuentran a su alrededor, por lo cual se les denominan “autótrofos”. Dicho de otra manera, existen, según su forma de nutrirse, dos tipos de organismos: los autótrofos, que utilizan como fuente de alimento la energía que se desprende de reacciones químicas, del carbono, del dióxido de carbono o de la luz; las plantas, las algas verdeazuladas y algunas bacterias son ejemplos de este tipo. Y los organismos “heterótrofos”, como los animales, los hongos y muchas bacterias, que no pueden asimilar

el carbono oxidado y necesitan obtenerlo forzosamente en forma de moléculas elaboradas por los autótrofos. Otra reacción química para explicar el origen de la energía utilizada por las primeras archeas es: $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} = \text{FeS}_2 + 2\text{H}$. Esta reacción proporciona dos electrones, energía que almacenada en ATP se necesitaba para romper el CO_2 (abundante en esa época), con la finalidad de poder utilizar el carbono en la fabricación de compuestos basados en él, indispensables para la vida.

Tan sólo para recordar, y antes de continuar con la obtención de la energía, mencionaremos que las archeas son organismos autótrofos; son células (unidad mínima de un organismo con la capacidad de actuar de manera autónoma) que pueden vivir en ambientes muy extremos (como los que regían en la Tierra hace 3 500 millones de años), que cuentan con un metabolismo celular que se lleva a cabo en el citoplasma (que es todo el volumen de la célula, limitado por la pared o membrana celular), que tienen material genético (ácidos nucleicos) nadando libremente en el citoplasma y que se parecen a las bacterias verdaderas que se originaron también en aquellos tiempos remotos. Las archeas y las bacterias (eubacterias) son organismos procariontes (también conocidas como procariotas), esto quiere decir que tienen sus ácidos nucleicos libres, no están envueltos en una membrana, en contraposición con los organismos eucariontes, que presentan un núcleo celular, o sea sus ácidos nucleicos envueltos por una membrana aislándolos del medio ambiente del citoplasma celular. Las archeas son, evolutivamente hablando, más antiguas que las eubacterias, carecen de mureína en su pared celular y presentan propiedades bioquímicas poco comunes (analizadas previamente).

Continuemos con la energía, que consiste en romper moléculas de azúcar y convertirlas en diferentes ácidos, alcoholes y otros compuestos, almacenando así la energía liberada en moléculas de ATP. Algunas bacterias fermentadoras liberaban metano y bióxido de carbono como productos de desecho hacia la atmósfera, ayudando a mantener niveles adecuados de CO_2 atmosférico para calentar la Tierra mediante el efecto invernadero, lo cual fue de gran importancia, ya que entonces el Sol era 25 a 40% menos luminoso y el riesgo de que el planeta se enfriara, y la vida con él, era muy alto. Otras bacterias fermentadoras consumen glucosa y liberan ácido pirúvico como producto de desecho, otras más liberan etanol (mecanismo que en la actualidad se utiliza para la producción del vino y de la cerveza) y otras liberan ácido láctico, el cual a su vez es utilizado como fuente energética por otras bacterias diferentes, que al consumirlo, liberan ácido acético (vinagre), estableciéndose así una de las primeras cadenas alimentarias.

LA REVOLUCIÓN DEL OXÍGENO

El siguiente paso fue inducido e impulsado por las grandes cantidades de bióxido de carbono que existían en la Tierra. El bióxido de carbono era un compuesto que

la vida necesitaba y del cual no podía prescindir; la vida tenía que usar el carbono de dicha molécula para la construcción de otras moléculas más complejas, como las proteínas y los azúcares. Además, la cantidad de este compuesto era vasta y lo mejor de todo es que se podía disponer de él. Miles de millones de propuestas con diferentes tipos de reacciones químicas fueron probadas con la intención de que alguna de ellas lograra descomponer o romper el bióxido de carbono para poder integrar el carbono a la estructura y función celular. Una de estas reacciones químicas fue la utilización del sulfuro de hidrógeno (H_2S) que emanaba en los vapores de las erupciones volcánicas y no utilizar agua (H_2O) como fuente principal de hidrógeno, mismo que, al combinarlo con la luz solar y con el CO_2 del aire, formaba compuestos orgánicos. Esta reacción no liberaba oxígeno, pero fue el primer proceso de fotosíntesis inventado por las bacterias, diferente del que usan las plantas en la actualidad. Fue una buena solución, pero la fuente de sulfuro de hidrógeno estaba limitada. Por supuesto que el hidrógeno, tan socorrido por la vida, abundaba en el H_2O , pero los enlaces entre los átomos de hidrógeno y oxígeno del agua son mucho más fuertes y difíciles de romper que los del H_2S , y muchas bacterias no pudieron lograrlo. No fue sino hasta que una bacteria desarrolló la habilidad de utilizar la luz solar de alta energía (longitud de onda corta) sobre un pigmento verde (ahora conocido como clorofila) para romper la molécula de agua en sus componentes: hidrógeno y oxígeno; y después utilizar el hidrógeno para construir azúcar y otros carbohidratos y, por otro lado, liberar oxígeno en el aire. En la misma reacción, estas bacterias fueron capaces de aprovechar el bióxido de carbono atmosférico, carbono para su crecimiento y oxígeno para usarlo para la formación de otros compuestos orgánicos y liberar un tanto en la atmósfera. Éste es el proceso de la fotosíntesis como la conocemos comúnmente, como el motor que mueve en la actualidad a todas las plantas verdes. A las bacterias que realizan el proceso de la fotosíntesis se les conoce como “cianobacterias”, y fueron unas trabajadoras incansables que se encargaron de modificar la composición de los gases de la atmósfera terrestre.

Recordemos la ecuación completa y equilibrada de la fotosíntesis en la que el agua actúa como donante de electrones en presencia de luz: $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{luz solar} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$; nótese que en la reacción de la fotosíntesis se ocupan grandes cantidades de bióxido de carbono, el cual fue abundante durante los primeros 2 000 millones de años, y se desprenden también grandes cantidades de oxígeno, que en aquel entonces era un elemento químico raro y hasta tóxico.

Vale la pena mencionar que la abundancia del bióxido de carbono fue una presión importante desde el punto de vista evolutivo para que un grupo de las primeras bacterias simples o procariotas desarrollara la capacidad de realizar fotosíntesis. Otros grupos de procariotas siguieron haciendo lo mismo de siempre. La evolución no es un programa que desarrollen de la misma manera todos los organismos.

Como la atmósfera era muy rica en bióxido de carbono entonces había alimento suficiente para que las cianobacterias profleraran rápidamente, superando en un tiempo reducido a las bacterias comedoras de sulfuros y de otros elementos químicos. Las cianobacterias se reprodujeron en tal medida que produjeron grandes cantidades de oxígeno por todo el mundo, cambiando para siempre la historia de la Tierra. Por otro lado, hay que recordar que, mientras tanto, la tectónica planetaria se había mantenido activa (tal y como lo hace actualmente), causando el aumento de tamaño de los continentes.

Una de las primeras comunidades biológicas fue constituida por las procariotas, que formaban capas de microbios, unas sobre otras; en las capas superiores se encontraban las cianobacterias, que tomaban su energía de la luz solar, mientras que las bacterias que ocupaban las capas inferiores y no tenían acceso a la luz solar ni al bióxido de carbono se alimentaban de los desechos que les caían de las cianobacterias que habitaban en las capas superiores. Las bacterias que existían entonces eran las bacterias púrpuras, las bacterias grampositivas, las cianobacterias y las bacterias anaeróbicas fotosintéticas. Las archeas de aquellos tiempos eran las metanógenas, las extremófilas y las termoacidófilas. Las cianobacterias continuaron reproduciéndose y formaron, capa sobre capa, unas estructuras conocidas hoy como estromatolitos, que también dejaron sus huellas fósiles. En los estromatolitos surgieron algunos de los primeros nichos ecológicos. Pasaron miles de millones de años y las cianobacterias continuaron produciendo grandes cantidades de oxígeno que se acumulaban cada vez más en la atmósfera terrestre. En las capas más altas de la atmósfera se inició la formación del ozono (O_3), que empezó desde entonces a proteger la superficie del planeta de los rayos solares; las concentraciones de oxígeno continuaron incrementándose dramáticamente. Al principio, los efectos tóxicos del mismo no se notaron mucho gracias a que había suficientes elementos metálicos, como el hierro, que capturaban rápidamente los átomos libres de oxígeno y se oxidaban. El tiempo siguió su marcha, poco a poco los metales se fueron saturando y el gas tóxico (oxígeno) empezó a acumularse en la atmósfera. Hace aproximadamente 2 000 millones de años, la contaminación por oxígeno llevó a una catástrofe global, de proporciones sin precedente. Numerosas especies de bacterias sucumbieron para siempre; otras, como las archeas, tuvieron que confinarse en el fondo del océano, y otras más habitaron las capas profundas de la corteza terrestre (es por esto que hoy las encontramos en lugares inusuales); el mundo microbiano tuvo que reorganizarse para poder sobrevivir. Entre hace 2 200 y 1 800 millones de años la concentración de oxígeno atmosférico se incrementó de 1 a 15%.

Muchas estrategias que pretendían lograr la protección de la oxidación evolucionaron hasta que finalmente la crisis cedió ante una de las más grandes y exitosas innovaciones en la historia de la vida: el fenómeno de la respiración. La respiración de oxígeno fue la segunda gran invención de las bacterias, pues es una

manera ingeniosa y eficaz de explotar la gran reactividad que tiene el átomo de oxígeno. Básicamente consiste en llevar a cabo una combustión controlada, en la que se rompen moléculas orgánicas (provenientes de los alimentos) y se libera bióxido de carbono, agua y grandes cantidades de energía. A este ciclo bioquímico se le denomina ciclo de Krebs, por Hans Adolf Krebs, quien lo descubrió en 1937. Todo empieza mediante la incorporación de una molécula de glucosa (azúcar) que, mediante el proceso de la fermentación, producirá ácido pirúvico y dos moléculas de ATP; el ácido pirúvico se incorpora luego al ciclo de Krebs, del cual se obtienen 36 moléculas de ATP, bióxido de carbono y agua, después, la transferencia energética termina cuando se requiere oxígeno molecular (O_2) para que acepte al hidrógeno, formando así dos moléculas de agua. El microcosmos de la química hizo algo más que adaptarse, creó un mecanismo energético con tendencia al equilibrio. Con este invento espectacular, las cianobacterias tenían dos mecanismos complementarios a su disposición: la generación de oxígeno libre a través de la fotosíntesis y su absorción a través de la respiración. Así empezó a mantenerse el equilibrio atmosférico entre la cantidad de oxígeno que se producía y la que se consumía, llegando a estabilizarse en la cifra de 21% (que prevalece hasta nuestros días). Si la concentración de oxígeno atmosférico disminuyera por debajo de 15%, entonces nada podría someterse a la combustión; los seres vivos complejos de la actualidad no podríamos respirarlo y todos moriríamos de asfixia; si los niveles aumentaran por arriba de 25%, entonces todo lo que existe sobre la superficie del planeta se quemaría de manera espontánea.

En este momento, todos sabemos de la diversidad tan importante que presentan las bacterias en cuanto a su capacidad de idear y crear soluciones ante los problemas del medio ambiente. Desde entonces, y hasta la fecha, no han cambiado gran cosa desde el punto de vista morfológico (formas), pero sí lo han hecho desde el punto de vista metabólico (funciones), lo cual es importante a considerar, puesto que la increíble capacidad que tienen para adaptarse al medio ambiente, por nocivo que sea, es precisamente la raíz del problema que enfrentamos cuando utilizamos los antibióticos y antisépticos de manera indiscriminada.

LOS EUKARIOTES

También conocidos como eucariotas, son los organismos vivos formados por una o más células que, a diferencia de las arqueas y las bacterias, tienen núcleos verdaderos, es decir, el DNA se encuentra separado del citoplasma por una membrana bien diferenciada. Recordemos que en los procariontes o procariotas el material genético (DNA) se encuentra flotando libremente en el citoplasma y solamente se organiza y se compacta antes de la división celular. Todos los procariontes son

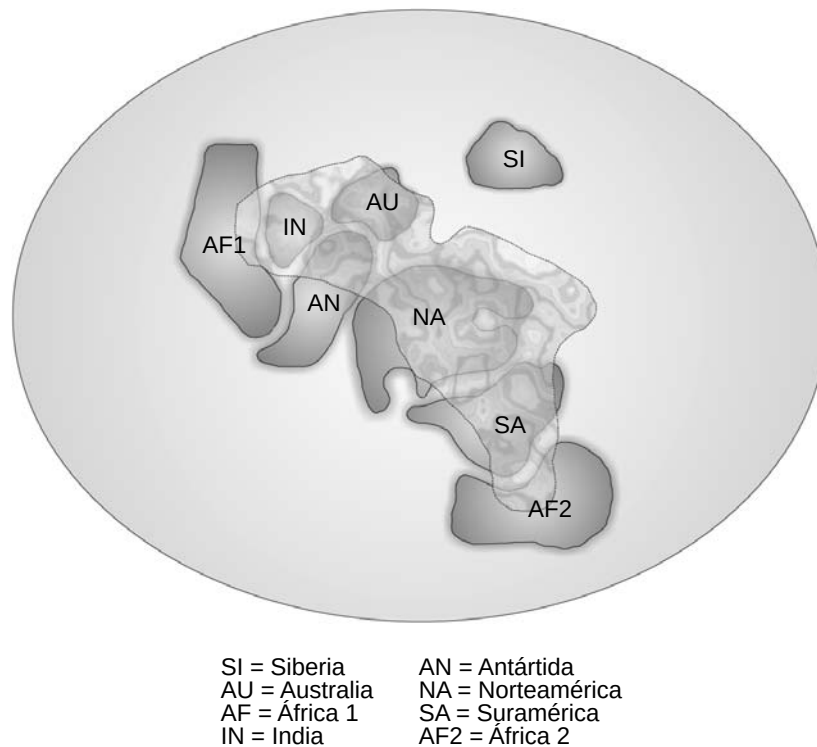


Figura 3–4. Distribución de los continentes hace 2 200 millones de años, época en la que ocurrió una de las mayores glaciaciones en nuestro planeta. Megacontinente denominado Nena.

organismos unicelulares (formados por una sola célula), mientras que los eucariontes pueden ser unicelulares, que comprenden a los protozoos (como las amebas), y pluricelulares (formados de dos o más células, llegando a miles o millones de ellas), que incluyen hongos, plantas y metazoos (animales complejos).

Existen fósiles de eucariontes que datan de hace 2 200 millones de años. Curiosamente, coinciden con una de las mayores glaciaciones ocurridas en nuestro planeta, por lo que se piensa que dicho fenómeno geológico pudo ser una fuerte presión de selección natural para la aparición de los eucariontes (figura 3–4).

Para hasta entonces sólo existían procariontes, pero para que surgieran los eucariontes ocurrió uno de los fenómenos evolutivos más importantes: la endosimbiosis. La simbiosis es la asociación de individuos animales o vegetales de diferentes especies, en la que ambos asociados o simbioses sacan provecho de la vida en común; la endosimbiosis se refiere a la integración de un organismo en el interior de otro para que ambos se benefician mutuamente.

Ahora analizaremos el paradigma aceptado acerca del surgimiento de los eucariontes: una célula, un organismo unicelular (al parecer se trató de una archea o arqueobacteria anaeróbica y termófila) desarrolló, entre otras características que serán analizadas más adelante y como respuesta a la presión de selección natural ejercida por la glaciación, una asociación simbiótica con una bacteria, una que en la actualidad se podría parecer a una bacteria espiroqueta y que tiene la característica de poseer un flagelo (como un látigo) que impulsa su movimiento y le permite desplazarse grandes distancias. La espiroqueta más conocida es la *Treponema pallidum*, que causa la sífilis. La simbiosis consistió en que la espiroqueta podría haberse acercado a la archea hasta adosarse a su membrana celular para aprovechar y alimentarse de los productos de desecho de la arqueobacteria. Ésta, a su vez, ganaría movimiento, ya que se vería empujada y desplazada de lugar gracias a la acción del flagelo en movimiento de la espiroqueta; pronto esta relación simbiótica se hizo permanente, ya que ambas obtenían un beneficio. Después, la archea incorporó en su interior a la espiroqueta. Lo anterior se supuso debido a la existencia de ciertos esqueletos celulares (citoesqueletos) que se observan en muchos tipos de eucariontes anaeróbicos de la actualidad, como por ejemplo el que presenta la *Trichomona vaginalis*. Este sistema citoesquelético se conoce como cariomastigonte, donde “cario” significa núcleo y “mastigonte” significa látigo, o sea, un “látigo unido al núcleo”. Esto ha llevado a algunos investigadores a concluir que cuando la archea anaeróbica incorporó a la espiroqueta se creó el primer eucarionte, ya que ambas fusionaron sus genes, aunque al parecer perdieron algunos, y los encerraron en una membrana aislándolos del resto del citoplasma (figura 3–5). La insistencia de los científicos en creer que la espiroqueta se fusionó con la archea para originar al eucarionte nace de las observaciones sobre la replicación celular, esto es, cuando una célula va a dividirse necesita duplicar sus genes (DNA) para pasarlos a cada una de las células hijas, y cuando lo hace necesita forzosamente de ciertos orgánulos (pequeños órganos localizados en el citoplasma) que se conocen con el nombre de centriolos y microtúbulos; las estructuras de ambos están constituidas por las mismas estructuras moleculares que los flagelos de las espiroquetas.

Así pues, el material genético de ambas se fusionó y el nuevo ser unicelular contó con mayor información para enfrentar los problemas del medio ambiente. Tan preciada molécula (DNA) se rodeó de una membrana para aislarse del resto del citoplasma por varias razones: quizá una fue para facilitar la organización del material genético y evitar que se “enredara” con otras moléculas; otra, para aislarla del poder oxidante del oxígeno que se encontraba en diferentes partes de la célula; una más, para mantener un medio ambiente bioquímico diferente al del resto de la célula, que favoreciera el buen funcionamiento de los genes; y otra más, para protegerla de otros organismos que llegarían a formar parte de la célula, integrándose a su funcionamiento tal como lo hizo la espiroqueta.

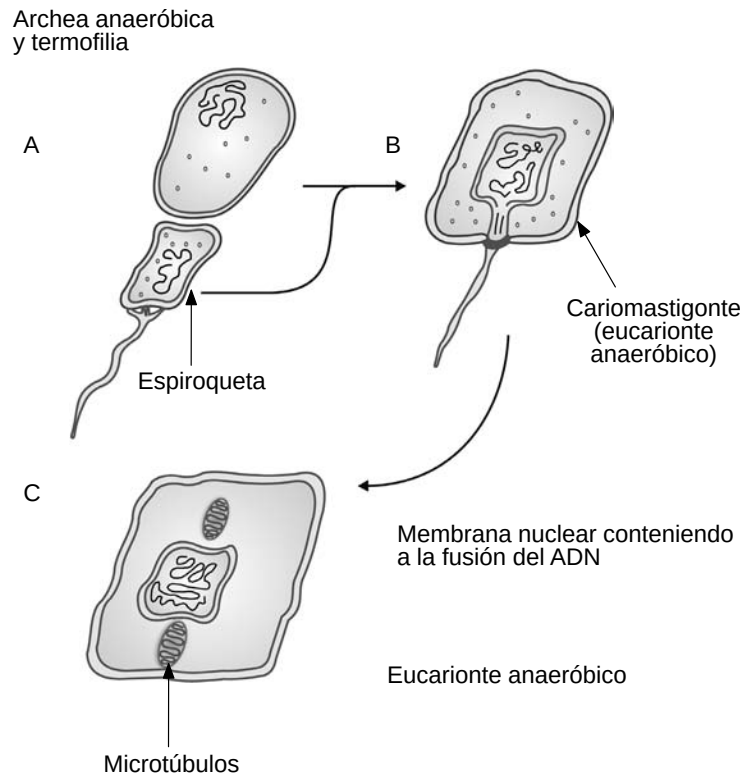


Figura 3-5. Paradigma para explicar el origen de los eucariontes. **A.** Simbiosis. **B.** Endosimbiosis. **C.** Eucarionte anaeróbico resultado de **A + B**.

Otro ejemplo de la endosimbiosis lo tenemos en un orgánulo intracelular conocido como mitocondria, abundante en la mayoría de las células eucariontes. La mitocondria es un orgánulo en el citoplasma celular que se encarga de proporcionar energía a la célula, utiliza el oxígeno para quemar compuestos orgánicos (como azúcares) y así fabrica el trifosfato de adenosina (compuesto químico cargado de energía que se invierte en la gran mayoría de los procesos metabólicos en toda la célula). Ancestralmente, la mitocondria fue una bacteria independiente del grupo de las bacterias púrpuras, cuyo pariente más cercano (comprobado por muestras de DNA) es en la actualidad una bacteria conocida como *Rickettsia prowasekii*, que causa la tifo, caracterizada por fiebre, dolor de cabeza, síntomas gastrointestinales y manchas punteadas en la piel. Este padecimiento se adquiere cuando una pulga pica en la piel y deposita sus excretas contaminadas con bacterias en la zona de la picadura; el prurito que se desencadena hace que al rascarse se introduzcan las rickettsias en el organismo. En algún momento, en un pasado

muy distante, una bacteria capaz de respirar oxígeno dio origen a los ancestros de ambas, es decir, por un lado originó una bacteria púrpura que a su vez se convertiría en mitocondria y, por otro, a la *Rickettsia prowasekii*; ambas líneas fueron originalmente microbios vivos libres e independientes, que se alimentaban de los nutrientes que las rodeaban. De manera eventual, cada una de estas líneas evolutivas de microbios empezaron a vivir dentro de otros organismos. La *R. prowasekii* evolucionó en un cruel parásito con la capacidad de zambullirse en sus hospedadores y arruinarlos con enfermedades dañinas. La otra línea bacteriana, la que invadió a los eucariontes, pudo establecer una relación más amable y cordial: una relación endosimbiótica. Se ha sugerido que esta protomitochondria permanecía cerca de los primeros eucariontes alimentándose de sus productos de desecho. De pronto, los eucariontes tuvieron interés y confianza en los compuestos bioquímicos y en las habilidades de las protomitochondrias que vivían junto a ellos; quizás fue la habilidad de utilizar el oxígeno en el fenómeno de la respiración lo que los atrajo (siendo eucariontes anaeróbicos significaba una buena oferta) y finalmente llegó el momento en el cual las dos especies se fusionaron y los intercambios entre ellos empezaron a llevarse a cabo en una sola célula; la protomitochondria se encontraría en un ambiente rico en nutrientes y el eucarionte anaeróbico se convertiría en un eucarionte aeróbico, consumiría oxígeno y obtendría así un mayor aporte energético para invertirlo en el crecimiento y otras funciones celulares (figura 3–6). Otros tipos diferentes de bacterias púrpuras, ni las protomitochondrias ni las *Rickettsias*, siguieron viviendo libres e independientes.

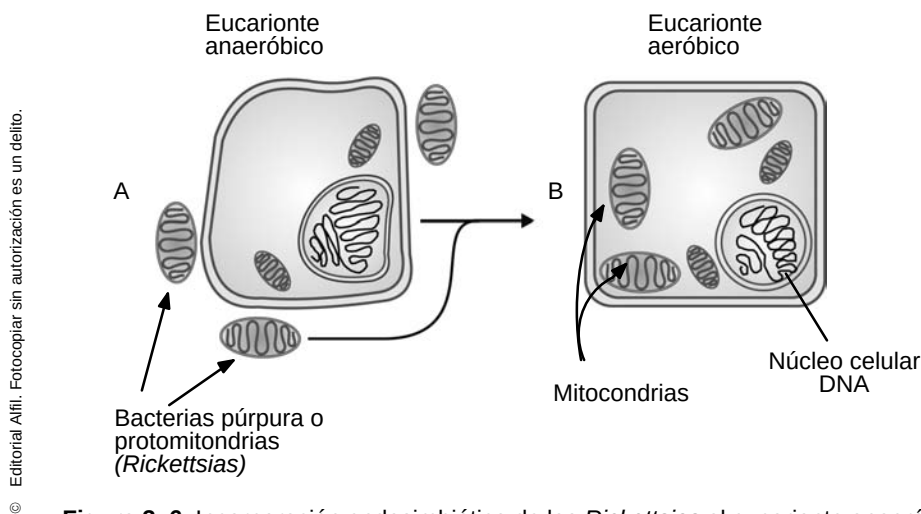


Figura 3–6. Incorporación endosimbiótica de las *Rickettsias* al eucarionte anaeróbico para convertirlo en un eucarionte aeróbico.

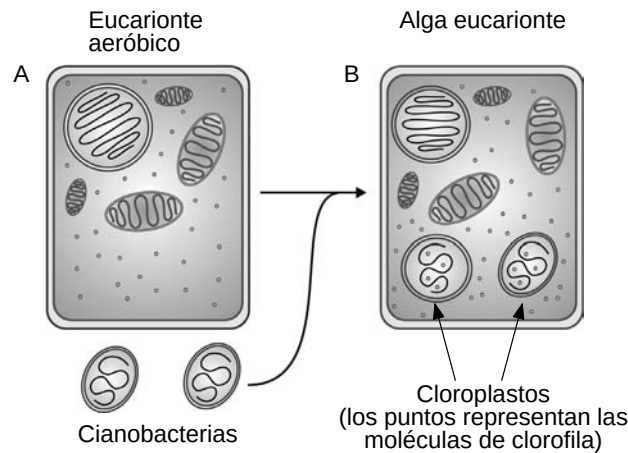


Figura 3–7. Relación endosimbiótica de un eucarionte aeróbico que incorpora a las cianobacterias en su citoplasma para dar origen a un alga eucarionte. Mediante todas estas endosimbiosis se fue incrementando la complejidad celular.

Sigamos con las endosimbiosis para dar forma y función a otros eucariontes: ahora tenemos a un eucarionte aeróbico (una célula con una membrana nuclear y con mitocondria) y a una cianobacteria. Ambos podrían vivir por separado, pero se unieron en una relación endosimbiótica; es decir, la célula eucarionte incluyó en su citoplasma a la cianobacteria y juntas formaron un alga eucarionte. La cianobacteria dejó de ser un organismo independiente y pasó a ser un orgánulo en el citoplasma de la célula con núcleo. Dicho orgánulo ahora es conocido como cloroplasto y tiene la capacidad de llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis proporcionándole a la célula más energía. En los cloroplastos, las plantas verdes convierten la luz solar y el bióxido de carbono en materia orgánica como la celulosa (que es un azúcar). Con esta endosimbiosis se formó un ser más complejo y más preparado para resolver los problemas ambientales a los que se enfrentaba (figura 3–7).

La relación endosimbiótica de los cloroplastos permanece en la actualidad en todas las plantas verdes. Como mencionamos anteriormente, los cloroplastos absorben la energía solar para llevar a cabo el proceso de la fotosíntesis, las células tienen en su interior entre 40 y 50 cloroplastos. Adentro de los cloroplastos se encuentran las moléculas de clorofila. Cuando cualquier molécula absorbe luz y calor solar, se acelera a un estado energético más elevado. ¿Qué le pasa a esta energía? En la mayoría de los casos, las moléculas excitadas emiten la energía como luz o como calor y vuelven a su estado normal. En el caso de las moléculas de clorofila (pigmento verde), los fotones de la energía solar son absorbidos y sus electrones se excitan y saltan a un nivel de energía superior, iniciando en el cloro-

plasto una compleja serie de reacciones que dan lugar al almacenamiento de energía en forma de enlaces químicos de ATP. Es por esta propiedad de absorción y aprovechamiento energético con las que cuentan las plantas verdes que, cuando caminamos descalzos en un día soleado, preferimos hacerlo sobre el pasto y no sobre el cemento.

La evolución mediante la endosimbiosis es una manera de modificar especies sin necesidad de acumular mutaciones de manera gradual. Todo esto se llegó a descubrir debido a que tanto las mitocondrias (antes bacterias púrpuras) como los cloroplastos (antes cianobacterias) contienen su propio DNA y son orgánulos que se reproducen por sí mismos, sin la ayuda del material genético contenido en el núcleo de las células, por lo que su DNA es diferente al del núcleo celular. La evolución simbiótica, por extraña que parezca, sigue las reglas básicas propuestas por Charles Darwin: una vez que la bacteria se incorpora a su nuevo hospedador, sus genes continúan moldeándose; el DNA mitocondrial puede mutar y cambiar, si la mutación interfiere con el trabajo o la función de crear energía para la célula, entonces dicha mutación puede ser eliminada por selección natural. Pero si la mutación en la mitocondria ayuda a que se desempeñe mejor en su trabajo, entonces incrementará la adaptación y la afinidad del organismo a su medio ambiente y así la selección natural favorecerá a ese gen mutado y se propagará en todas las generaciones.

La mitocondria ha perdido muchos de los genes que usaba cuando era una bacteria libre y que sus ancestros utilizaban para vivir en el mundo exterior; algunos de esos genes fueron secuestrados por el núcleo celular y otros permanecen en las mitocondrias desarrollando un conflicto perpetuo entre genomas de la mitocondria y del núcleo celular. Una vez que la mitocondria se ganó la confianza de sus hospedadores, gracias a que llevaba a cabo sus tareas de manera adecuada, entonces aseguró su supervivencia, pero perdió su libertad. Hasta después de que los microbios presentaron toda esta evolución pudieron aparecer primero los organismos unicelulares protistas y después los multicelulares.

LA GRAN FAMILIA Y LOS TRES SÚPER REINOS

Los genes, que hoy conforman a todos los seres vivos, son el resultado de miles de millones de años de evolución continua, de combinaciones, recombinaciones y modificaciones múltiples. Todos los seres que habitamos este planeta estamos emparentados de una u otra forma. Por ejemplo, todos usamos ATP para almacenar y usar la energía y todos tenemos ácidos nucleicos en nuestras células, en forma de DNA. De manera que, estudiando el DNA, se ha podido llegar a conclusiones importantes sobre nuestra historia evolutiva y sobre la de los demás seres vivientes. En el DNA está escrita, en gran parte, la autobiografía de las especies.

Las bacterias se reproducen principalmente mediante la clonación, es decir, para replicarse, una bacteria duplica su DNA y luego se divide en dos, originando dos bacterias hijas exactamente iguales. Las mutaciones (recordemos que son los cambios que pueden ocurrir en la secuencia de los nucleótidos) que puedan presentarse en la duplicación genética (antes de la división) pasarán intactas a sus descendientes. Sin embargo, y para sorpresa de muchos, los microbios pueden incorporar material genético nuevo, directamente en su genoma, una vez que han nacido, es decir, en cualquier momento de su vida. Este hecho es muy importante para entender cómo son las raíces del árbol de la vida. Muchas especies bacterianas pueden acarrear fragmentos de DNA, en forma de aros, en el interior de su citoplasma celular, conocidos como plásmidos, separados de sus cromosomas (los cromosomas son la manera en la que se organiza la molécula de DNA). Estos plásmidos son intercambiados de bacteria a bacteria, entre miembros de una misma especie o incluso entre miembros de diferentes especies, géneros y familias bacterianas. Existen virus que pueden acarrear fragmentos de DNA entre las diferentes poblaciones de bacterias (conocidas como bacteriófagos) y tomar material genético de alguna bacteria para inyectarlo en otra. Incluso, cuando una bacteria muere, su material genético queda libre y con la cualidad de poder ser incorporado en otra bacteria viva (lo adopta y lo integra a su genoma), que puede usar los fragmentos útiles y desechar los inútiles. Un ejemplo de esta gran promiscuidad genética se observa en la *Escherichia coli*, la cual ha recolectado en los últimos 100 millones de años el material genético de otras bacterias unas 230 veces. La evidencia de esta transferencia de genes se presenta desde las raíces más profundas del árbol de la vida y se ilustra con los siguientes ejemplos: existe una archea conocida como *Archeoglobus fulgidus*, que vive en la profundidad del océano y tiene las cualidades de una archea, pero se alimenta de aceites y productos derivados del petróleo utilizando exactamente las mismas enzimas digestivas que solamente se encuentran en ciertas bacterias y no en otras archeas, lo cual quiere decir que adoptaron ciertos genes de alguna bacteria pero siguen siendo archeas. Nuestros propios genes tienen todavía cierta herencia ancestral que continúa funcionando eficazmente, como los genes que manejan el procesamiento de la información durante la lectura del DNA; estos genes están íntimamente relacionados con los genes que para el mismo fin se encuentran en las archeas. Por otro lado, nuestros genes encargados del proceso para la alimentación celular y de los sistemas de limpieza y desecho de productos inservibles de la célula son mucho más parecidos a los que tienen las bacterias. El descubrimiento de estos genes compartidos ha complicado el entendimiento de la evolución de la vida en los tiempos más remotos dado que entonces se compartía y se intercambiaba una gran cantidad de información genética.

Conforme la vida emergió a partir del mundo del RNA hacia el mundo del DNA, permaneció “atascada” en la manera de reproducirse a sí misma. No tenía

ninguna de las enzimas más perfeccionadas encargadas de que la lectura del código genético fuera la correcta ni otros mecanismos que aseguraran que las células copiaran correctamente su información genética, de manera que, sin estos salvavidas, las mutaciones eran, más que la excepción, la regla. Las proteínas más simples o sencillas podían sobrevivir durante algunas pocas generaciones sin ser destruidas; cualquier proteína compleja que requiriera una gran cantidad de información genética era mucho más vulnerable. Con un sistema tan frágil de reproducción como éste, los genes primordiales (o los más antiguos) tenían que moverse de un microbio a otro en vez de moverse de una generación a otra de manera descendente; en otras palabras, para lograr su supervivencia, los genes tenían que transmitirse horizontalmente a otras bacterias en lugar de transmitirse verticalmente a sus descendientes, lo cual contribuyó a la promiscuidad genética observada en las raíces del árbol de la vida, incluso antes del primer ancestro común.

Hace más de 3 000 millones de años, la vida no tenía una genealogía definida, era más bien un flujo constante de genes en sentido horizontal entre todos los microbios que la conformaban, dando lugar a una sola gran familia. Después, los sistemas genéticos se fueron perfeccionando, haciendo que los genes errantes o vagabundos encontraran cada vez más difícil la manera de acoplarse, ajustarse o integrarse a un sistema genético determinado. Empezaron a evolucionar sistemas más complejos de genes capaces de hacer mejores y más precisos trabajos, hasta que los sistemas genéticos se volvieron más especializados y realizaron eficazmente sus tareas. Entonces lograron transmitirse de una manera más segura en sentido vertical, de generación en generación, en lugar de hacerlo en sentido horizontal. Empezaron a formar líneas más claras de descendencia y así, una vez que escaparon de estar atascados, dieron lugar a las tres principales formas de vida o a los tres súper reinos que conocemos actualmente: las archeas o arqueobacterias, las bacterias o eubacterias (ambas son procariotas) y a las eucariotas o eucariontes. A estos tres súper reinos, en la clasificación de los seres vivos, les siguen los reinos; para empezar a familiarizarnos con ellos mencionaremos los cinco que existen, a saber: el reino Mónica, también denominado el reino de las procariotas o procariontes, constituido por los organismos procariontes: bacterias, archeas y algas verdeazuladas; el reino Protista, también denominado reino de los protocistas, el cual incluye a los organismos eucariontes unicelulares, como las algas y los protozoos o animales unicelulares, como algunos parásitos; el reino de los Hongos, el reino Vegetal y el reino Animal. Todos, a excepción del Mónica, están constituidos por eucariontes (figura 3-8).

Los tres súper reinos (archeas, bacterias y eucariotas) dominaron la Tierra durante el eón precámbrico, desde la era Arcaica (desde hace 3 800 millones de años hasta hace 2 500 millones de años) hasta la Proterozoica (desde hace 2 500 millones de años hasta hace 540 millones de años); el periodo más antiguo de la era

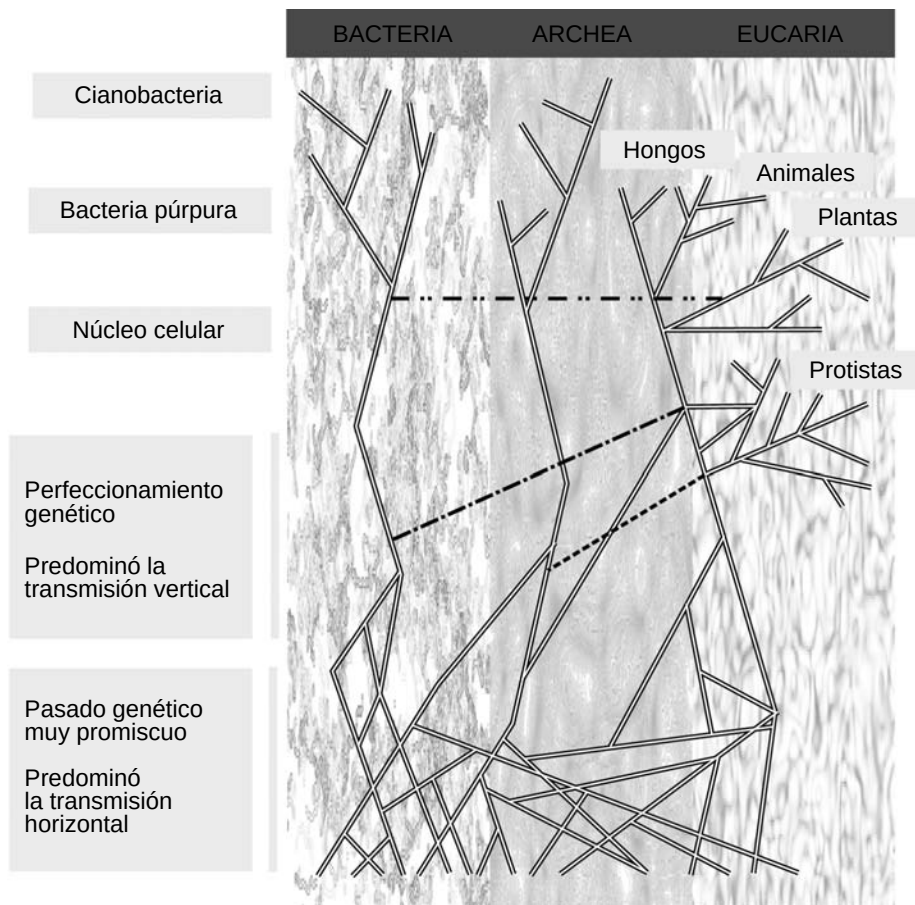


Figura 3-8. Origen de las principales tres divisiones en los seres vivos. El estudio de los genes ha revelado que más bien se trata de un “arbusto” genealógico en lugar de un “árbol” genealógico.

Proterozoica se llama Paleoproterozoico, y sus principales formas vivientes fueron los procariontes (seres unicelulares sin núcleo celular) y los eucariontes más simples (seres unicelulares con núcleo celular). Para mediados de la era Proterozoica, o sea en el periodo del Mesoproterozoico, la Tierra consistía en un megacontinente denominado Nena dispuesto ecuatorialmente en sentido longitudinal, de este a oeste. Para finales de la era Proterozoica, en el periodo Neoproterozoico, la vida contaba ya con cinco reinos en materia biológica, todos resultado de las diferentes propuestas genéticas, cooperación genética, duplicación de genes, transferencia horizontal, endosimbiosis, mutaciones, reproducción sexual y de-

más mecanismos genéticos que generan propuestas para someterlas a la selección natural. En el Neoproterozoico no es fácil establecer diferencias claras entre el reino animal y el reino vegetal, o saber con precisión qué clase de organismos unicelulares eucariontes habitaron en aquel entonces, ya que es difícil encontrar huellas fósiles de los mismos. Podemos suponer que probablemente fueron animales unicelulares pertenecientes al reino de los protistas. Un protista es un ser unicelular capaz de reproducirse, de mantener su organización metabólica, de tomar energía del medio ambiente, de utilizar la energía necesaria y transformarla, de fagocitar (envolver partículas en su citoplasma) y de digerir para obtener energía de una manera alterna; algunos presentan movilidad propia y, llegado el momento, mueren. Los seres más antiguos pertenecientes al reino de los protistas son: el moho del lodo (*Myxomycophyta*), las algas cafés (*Phaeophyta*), las algas rojas (*Rhodophyta*) y los protozoos. Algunos protozoos viven en la actualidad, como parásitos parecidos a las amibas (organismos unicelulares), que son las responsables de la amibiasis intestinal. Desde el punto de vista evolutivo, ¿qué o quiénes siguieron a los protozoos? Siguieron los organismos multicelulares o metazoos, hace 800 millones de años aproximadamente. Para lograr este salto hubo de darse un alto grado de cooperación genética y morfológica entre los organismos unicelulares, y este grado de cooperación intercelular requiere mucho tiempo y muchos cambios para lograr con éxito la adaptación. Por ejemplo, uno de estos cambios increíbles fue el de poder perder la pared celular (membrana de recubrimiento) y unirse a otros eucariontes que tampoco la tuvieran. Después, entre varios, crear una membrana que los protegiera a todos en conjunto y que, al mismo tiempo, los aislara y diferenciara del medio ambiente y de los otros miembros de la misma especie. Las células que quedaban por dentro de esta cubierta empezaron a intercambiar material e información entre ellas, como muy al principio lo hicieron las moléculas en las capas gelatinosas. Así, poco a poco, se empezaron a adherir unas con otras y a comunicarse entre ellas mediante impulsos químicos hasta que lograron formar los tejidos mediante la agregación y participación de diferentes células por beneficio mutuo. La pérdida de la pared celular y la formación de una cubierta general protectora para varias células ha sido uno de los grandes pasos evolutivos, una novedad que dio origen a los tejidos conocidos como epitelios. Nuestra piel es un epitelio que nos protege de los rigores del medio ambiente.

Durante el Neoproterozoico, el megacontinente Nena se fragmentó como resultado de los movimientos tectónicos planetarios y dio origen, por un lado, a un gran continente llamado Rodinia, localizado en el Hemisferio Norte y, por otro a una serie de plataformas continentales más pequeñas, localizadas en el Hemisferio Sur, que dieron lugar a las porciones de tierra correspondientes al sur de China, parte de África, América del Sur y Siberia. En la plataforma continental de Rodinia se encontraban lo que en un futuro serían América del Norte, Australia,

Antártida y Báltica. Dichos cambios en la conformación geológica de la Tierra ocasionaron alteraciones climatológicas importantes; una de ellas lo fue una gran glaciación y es probable que esto haya sido una presión de selección natural para que iniciara la complejidad animal de los metazoos.

Los eucariontes metazoos más primitivos de los que se tiene conocimiento son los anélidos (gusanos segmentados), los celentéreos o cnidarios (corales, pólipos marinos, medusas y anémonas marinas) y los espongiarios (esponjas); todos habitaron el planeta en el Neoproterozoico y todos son invertebrados. Para esas fechas, ya habían aparecido tres tipos del reino animal: los anélidos, los celentéreos y los espongiarios, que vivieron (y muchos todavía existen) en los océanos; estas curiosas criaturas tienen muchos tipos de células que realizan funciones diferentes y especializadas, pero mantienen un nivel bajo o primitivo de organización. Las esponjas no tienen sistema gastrointestinal ni cavidad corporal especializada para procesar los alimentos, tampoco un sistema nervioso. A partir de un metazoo tan sencillo como las esponjas, que no son más que un conjunto organizado de células, sin aparatos ni sistemas, pudo haberse originado un organismo con ectodermo y endodermo, que son las capas celulares externa e interna, respectivamente. La piel de nuestro cuerpo es un ectodermo y las mucosas de la boca y de la garganta son un endodermo; conforme evolucionó la complejidad animal en cuanto a sus planos de construcción, se formó el mesodermo, que es la capa celular intermedia entre las dos anteriores. En nuestro cuerpo, los músculos son parte del mesodermo. Todas estas innovaciones fueron el resultado de diferentes propuestas genéticas.

Para fines del Neoproterozoico, la Tierra se empezó a recuperar de una glaciación. Correspondientes a estas fechas se han descubierto fósiles de animales pertenecientes al tipo cnidarios, también conocidos como ediacaran o ediacaradiana por haber sido encontrados en la colina australiana de Ediacara. Como mencionamos antes, la fauna de esta época se caracteriza por formas vivientes de organismos multicelulares simples, con una organización tisular muy sencilla o mínima, carentes de sangre o sistema circulatorio y algunos con un sistema nervioso muy primitivo. Sus paredes corporales están compuestas de dos capas de células separadas por un material gelatinoso; en algunos de ellos, la capa interna delimita una cavidad estomacal y una boca primitiva que se alimenta de fitoplancton (algas microscópicas que abundan en las aguas de los océanos); la mayoría de la fauna ediacaran desapareció como consecuencia de las transformaciones del planeta, pero dio lugar al surgimiento de una nueva fauna compuesta por individuos con concha y a una gran variedad de animales marinos, como moluscos y los primeros artrópodos.

Dispongámonos ahora a penetrar en uno de los hechos más fascinantes de la historia natural: la explosión del Cámbrico, que se llevó a cabo totalmente por debajo del agua (figura 3–9).

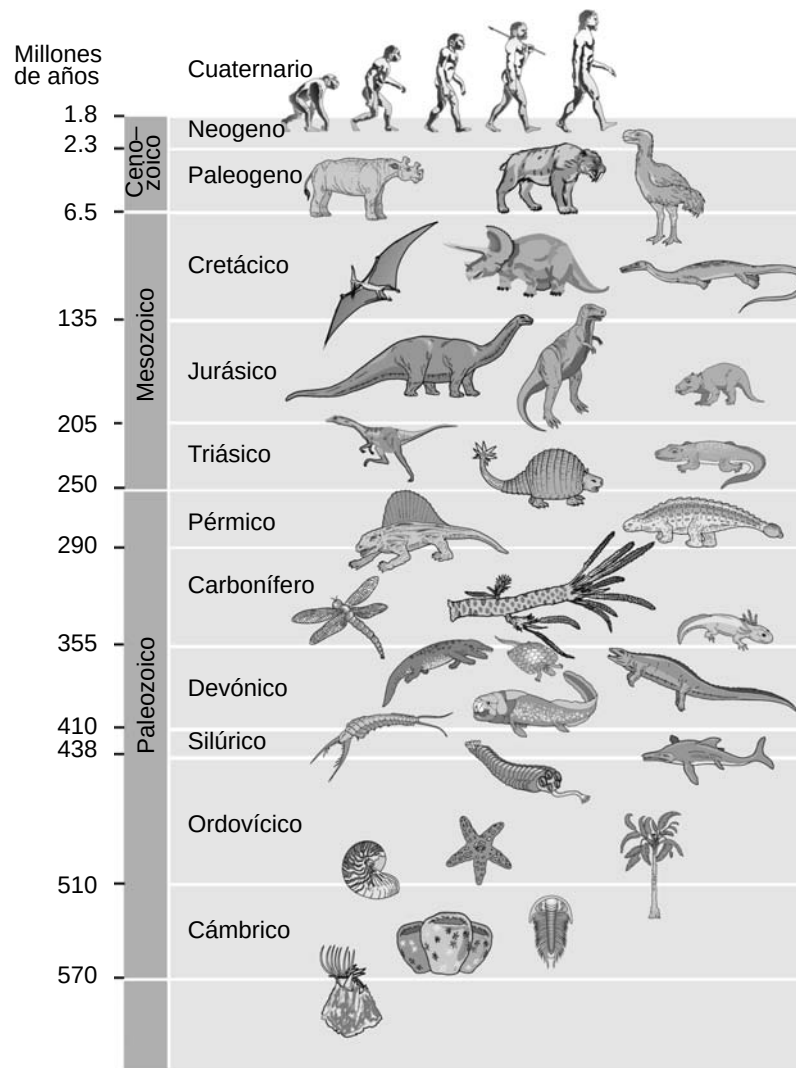


Figura 3-9. Relación de las eras geológicas con los principales tipos de organismos que habitaron en cada una de ellas.

CÁMBRICO

Al inicio del eón Fanerozoico, hace unos 540 millones de años, los organismos multicelulares empezaron a ser abundantes y visibles con facilidad. La era más

primitiva del eón Fanerozoico se llama Paleozoica, que quiere decir “vida ancestral”. La era Paleozoica abarca desde hace 540 millones de años hasta hace 250 millones de años y se divide en seis periodos; el más antiguo es el Cámbrico o Cambriano. La explosión del Cámbrico (como se le conoce) siguió a periodos de la historia natural donde la vida sufrió mucho a consecuencia de los fenómenos geofísicos. La vida se vio sometida al aislamiento genético y a tremendas presiones selectivas como resultado de las glaciaciones.

El periodo Cámbrico abarca un intervalo de 40 millones de años, transcurridos de 540 a 500 millones de años atrás. El término fue acuñado en 1835 por el geólogo inglés Adam Sedgwick y procede de Cambria, forma latinizada de Cymry, nombre que los antiguos romanos le daban a las rocas sedimentarias de Gales. El Cámbrico está caracterizado por la aparición de animales que formaban un esqueleto (incluían las conchas) de carbonato de calcio y de fosfato de calcio, además de otros animales conocidos como trilobites que, como su nombre lo indica, su cuerpo tenía tres divisiones: cabeza, tórax con caparazón y apéndices articulados. El caparazón estaba formado de carbonato de calcio y tenían un sistema nervioso bien desarrollado, cerebro, ojos y antenas; algunos cazaban para alimentarse. Los trilobites son verdaderos artrópodos (animales invertebrados dotados con un esqueleto externo y apéndices articulados) que desarrollaron ojos complejos y extremidades articuladas que les ayudaban a cazar. Dado que sus exoesqueletos eran de quitina (caparazones quitinosos), dejaron abundantes huellas fósiles (figura 3–10), pero el hecho más importante es que la anatomía de los trilobites, o sus planos básicos corporales, se conserva hasta la fecha. Con estos nuevos diseños y equipos, la voracidad llegó para quedarse, pues a la fecha continúa la batalla eterna entre depredadores y presas. A partir del cámbrico pasó a la historia la pasividad de la fotosíntesis y la existencia pacífica entre bacterias y algas.

En la explosión del Cámbrico se observa un gran número de tipos (filo) y subtipos (subfilo) de animales, donde además de los anélidos, cnidarios y espongiarios que se originaron en Neoproterozoico, tenemos a los animales invertebrados de cuerpo blando, moluscos, y a los que tienen una envoltura externa dura y calcárea comúnmente conocida como concha; gracias a esa envoltura rígida dejaron también un legado fósil abundante. Del tipo de los moluscos se derivan varios subtipos. Para reconocer algunos podemos mencionar a los cefalópodos (que tienen los pies en la cabeza y los tentáculos rodean su boca), como los pulpos, los calamares y los nautilus; a los gasterópodos o gastrópodos (pies en el estómago), como los caracoles y las babosas; y a los bivalva (cualquier molusco que tiene una concha dividida en dos mitades, una derecha y una izquierda), como las almejas, las ostras y los mejillones. Hay que aclarar que los moluscos con conchas derecha e izquierda son diferentes a los braquiópodos, que antes se clasificaban con los moluscos, porque difieren de ellos por sus conchas o valvas dorsal y ventral en lugar de derecha e izquierda. Los braquiópodos se originaron un poco antes

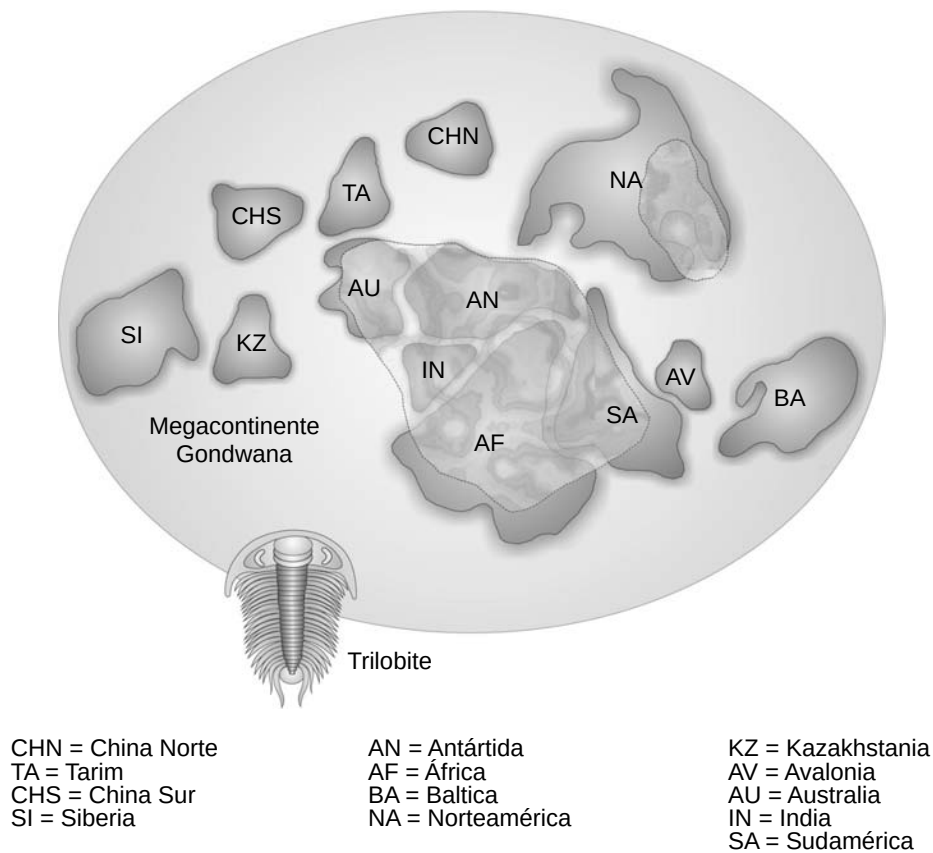


Figura 3-10. Apariencia de la Tierra hace 540 millones de años. Los trilobites fueron una especie muy exitosa en este periodo.

que los moluscos y también son diferentes porque tienen un apéndice a modo de brazo a cada lado de la boca.

El tipo artrópodo que se originó en la explosión cámbrica presentó para entonces dos subtipos, el de los trilobites (el más antiguo) y el de los crustáceos (cangrejo, langosta y camarón), que dicho sea de paso se encuentran entre los animales de mayor éxito, dada su larga supervivencia y dominio de los mares, como los insectos, que dominan la tierra; los otros subtipos de artrópodos son los arácnidos y los insectos, pero ambos se originaron en periodos posteriores al Cámbrico.

Los equinodermos, como la estrella de mar, el erizo de mar y el pepino de mar, conforman otro tipo que surgió en este periodo, al igual que el tipo de los hemicordados, que son animales marinos vermiformes con hendiduras branquiales faríngeas (branquias), y el tipo de los cordados, que presentan al menos en un momento

de su vida una varilla esquelética rígida, denominada notocorda, localizada por encima del intestino y por debajo de un cordón nervioso. Del tipo de los cordados tenemos dos subtipos, el subtipo de los cefalocordados, como las lancetas (animales parecidos a los peces), y el subtipo de los vertebrados, animales con cráneo y columna dorsal segmentada en su estado adulto. Durante el periodo Cámbrico los únicos vertebrados que se tienen registrados son los agnatos, superclase de peces desprovistos de mandíbulas, con cuerpo anguiliforme, es decir, parecido al de las anguilas. Concluimos, pues, que durante la explosión cámbrica se originaron los principales diseños corporales para una gran cantidad de seres; todos los tipos de animales se originaron aquí, a partir de este momento. En los periodos siguientes al Cámbrico se fueron originando y diversificando las especies a partir de los tipos mencionados en sus correspondientes subtipos, superclases, clases, subclases, infraclases, órdenes, subórdenes, superfamilias, familias, géneros y especies, como veremos en las próximas páginas.

No hay duda de que el cambio tan rápido y abrupto de la explosión del Cámbrico se debe a que los animales se constituyeron de maneras y formas que hasta entonces no existían; ahora sus genéticas eran mucho más complejas, cooperadoras y flexibles que en cualquier otro momento de la historia. A continuación presentaremos dos hipótesis postuladas para formar paradigmas que expliquen el éxito desmesurado de la explosión del Cámbrico en cuanto a diversidad biológica. La primera tiene que ver con las causas ambientales: el oxígeno alcanzó un valor crítico, era exagerada la cantidad que se encontraba en el mar y en la atmósfera terrestre, lo cual ocasionó una detonación en la diversificación. Si la vida no se diversificaba entonces, todos los seres vivos morirían debido a los efectos tóxicos del oxígeno. Bajo esta gran presión ambiental, la genética propuso nuevos planes de supervivencia y entonces empezó a incorporar más oxígeno en su metabolismo. La explosión del Cámbrico es prueba fehaciente de que esto sucedió, ya que se requiere oxígeno para llevar a cabo las reacciones químicas necesarias para formar la mineralización de los huesos y de las conchas. Sin oxígeno sólo se pueden formar esqueletos en forma de colágena (cartílago), que es menos resistente que los huesos. Otras causas ambientales son los nutrientes disponibles en grandes cantidades, basados en fosfatos que se liberaron cuando el supercontinente Rodinia se fragmentó. Las temperaturas moderadas y templadas que le siguieron a los eventos del Proterozoico a finales de la glaciación y los movimientos de los continentes que inducían la fragmentación de los ecosistemas (aislamientos geográficos) también fueron factores importantes. Los movimientos de las plataformas continentales exponían extensiones de tierra en nuevas latitudes y longitudes con diferentes altitudes y temperaturas sobre la superficie terrestre, lo cual pudo haber contribuido a una gran diversificación. La segunda hipótesis se refiere a las causas biológicas. Entre ellas tenemos: la capacidad de llevar a cabo un metabolismo basado en el oxígeno, la aparición de la reproducción sexual en

los eucariontes, el surgimiento de esqueletos para poder dar soporte a organismos de mayor tamaño, el desarrollo de nuevos y efectivos sistemas circulatorios, respiratorios y gastrointestinales y, finalmente, la aparición de los depredadores, que también contribuye a la diversificación de las especies, pues las presas tienen que idear nuevos mecanismos y funciones corporales para poder huir y protegerse. Sin embargo, las causas precisas continúan siendo un misterio.

En toda la historia natural de la Tierra no se ha dado otra situación en la que se observe la diversidad biológica que caracteriza al Cámbrico. Hay otra hipótesis para tratar de explicar cómo fue que durante este tiempo surgieron tantas variedades nuevas de especies: las novedades evolutivas aparecen cuando abundan las oportunidades ecológicas y cuando hay una gran cantidad de lugares novedosos que se pueden habitar, y como resultado de esto, la vida genera propuestas con características anatómicas diferentes en los organismos cuyas finalidades son tratar de ocupar y aprovechar los nuevos nichos ecológicos. La explosión del Cámbrico llama la atención porque la vida oceánica se tornó extraordinariamente rica en diversidad y cantidad. En este periodo, el cambio en el medio ambiente y las propuestas genéticas se manifestaron y se encontraron para generar una “tormenta” evolutiva como nunca antes ni después.

El Cámbrico es también un periodo geológico, para el que la ciencia dispone de pruebas convincentes sobre la existencia de placas tectónicas. Las múltiples colisiones entre ellas dieron lugar, a lo largo de este periodo, a otra gigantesca masa de tierra o supercontinente al que se le conoce con el nombre de Gondwana. En esta ocasión se incorporó el germen de los cuatro continentes australes de nuestros días: América del Sur, Antártida y Australia Occidental. Incluía también la India, regiones de México, Florida, Europa (parte del sur) y tal vez China. Es obvio que la distribución de los continentes durante el Cámbrico era muy diferente a la actual. Para entonces, y a diferencia de Rodinia, la mayoría de las masas terrestres se encontraban en los trópicos o en el Hemisferio Sur. Gondwana, que cubría un área mucho más extensa que las masas continentales del Norte, se extendía desde los trópicos y las regiones templadas del Sur hasta casi el Polo Sur.

Aunque la vida no había invadido la tierra ni el aire, los mares del Cámbrico contaban ya con una gran variedad de invertebrados marinos: anélidos, cnidarios, esponjas, braquiópodos, moluscos, artrópodos primitivos (trilobites y crustáceos), unas cuantas especies de equinodermos y escasos vertebrados. La única vida vegetal de este periodo fueron las algas marinas.

ORDOVÍCIO

Seguimos en el eón Fanerozoico y en la era Paleozoica, pero ahora nos ubicaremos en el periodo Ordovícico, que comenzó hace 500 millones de años y terminó

hace 439 millones de años; su nombre procede del de una antigua tribu de celtas, los orodovices, que se establecieron en Gales, donde las rocas de esta edad se estudiaron sistemáticamente.

Para entonces, y como consecuencia de los movimientos tectónicos planetarios, las placas continentales de América del Norte y de Europa colisionaron y levantaron rocas para formar una cordillera montañosa, la Taconic, visible hasta la fecha al este de Nueva York, en Estados Unidos. En el Hemisferio Sur, Gondwana no sufrió grandes cambios.

La Tierra seguía siendo un planeta dominado por la flora y la fauna marinas. En el reino vegetal no hubo innovaciones; las algas verdes (eucariontes fotosintéticos) continuaron representando la base de la pirámide alimentaria para un vasto número de especies acuáticas. Este tipo de plancton abundó en los océanos alimentándose de luz solar y contribuyendo al incremento de oxígeno en la atmósfera terrestre. En la actualidad se estima que cerca de 90% del oxígeno atmosférico proviene de dicho fitoplancton; además, ciertas algas microscópicas se protegieron con una delgada armadura de carbonato de calcio y, cuando los mares retrocedieron y abandonaron las plataformas continentales para dar lugar a la tierra firme, billones de estas algas murieron, dejando depósitos importantes de caliza, una roca sedimentaria. De manera que hace 500 millones de años, un tercio de la superficie terrestre estaba privada de vida, el área estéril era la superficie continental sobre el nivel del mar. Es muy probable que existieran algunas bacterias en las rocas (debido a las precipitaciones pluviales) o en las costas, pero no había una vida macroscópica sobre los continentes, que estaban formados de arena y rocas desérticas sometidas a la erosión por las tormentas de viento y lluvias. El clima durante la mayor parte del Ordovícico fue cálido y húmedo en América del Norte, Europa y Asia, pero más frío en los continentes meridionales. Los invertebrados marinos seguían siendo la forma de vida predominante. Hacia finales de este periodo se originaron los arácnidos en pocas formas y muy primitivos invertebrados excavadores, uniéndose a los otros dos subtipos del tipo de los artrópodos: trilobites y crustáceos. Por estas épocas se produjo un fuerte descenso en la temperatura del planeta y se formaron casquetes glaciares; este breve episodio llevó a la extinción de una gran variedad de trilobites, cefalópodos y otras formas de vida.

El hecho de que la Tierra se tornara verde fue una transformación extraordinaria que le dio belleza al planeta y una oportunidad para otra gran expansión de vida, pero no sucedió en el Ordovícico, sino en el periodo siguiente, el Silúrico.

SILÚRICO

Este periodo, que abarca desde hace 439 hasta hace 409 millones de años, fue llamado así por el geólogo inglés sir Roderick Impey Murchinson, quien tomó su

nombre de una antigua tribu británica, los siluros, que vivieron en el sureste de lo que hoy es Gales, en donde se estudiaron de manera sistemática las rocas sedimentarias. Desde el punto de vista geológico, la forma de los continentes no fue muy diferente de la del periodo previo, el Ordovícico. El megacontinente Gondwana seguía conformado por las plataformas continentales pertenecientes a América del Sur, África, Australia, Antártida y la India, pero desplazado más al sur, y otra masa continental localizada a nivel del ecuador, a 15° de latitud norte, que incluía a América del Norte, Europa y Asia. El clima no era uniforme y se inclinaba a un promedio bajo, ya que las regiones situadas a más de 65° de latitud norte y sur del ecuador estaban cubiertas de hielo glaciar.

En las rocas de este periodo se han descubierto los primeros restos fósiles indiscutibles de vegetación terrestre; en él se originaron las plantas vasculares primitivas. ¿Cómo lo lograron? La colonización de las tierras continentales por parte de las plantas requirió vencer muchos y muy importantes obstáculos fisiológicos. Si una especie de planta logró sobrevivir sobre tierra firme, necesariamente tuvo que requerir un número considerable de antecesores que se dieron a la tarea de resolver determinados problemas antes de lograr el éxito; éstos son los ensayos genéticos. En rocas sedimentarias que datan de hace 430 millones de años se han descubierto fósiles de esporas que seguramente se propagaban por el aire de la atmósfera, en lugar de hacerlo por el agua. Las primeras plantas tuvieron que haber vivido en la orilla del mar y, para vencer el problema de respirar directamente del aire y no del agua, desarrollaron un sistema de aperturas conocidas como estomas. También desarrollaron raíces para obtener nutrimentos, pero en aquel entonces las raíces eran muy pequeñas. Imaginemos que las plantas eran más bien como unas costras que se desprendían fácilmente de la superficie de la arena. A este grupo (subdivisión del reino vegetal) de fósiles de plantas vasculares primitivas y sin hojas se le denomina *Psilophytina* o psilofitas. En su conquista por la tierra firme, las plantas tuvieron que resolver otros problemas, como el de contar con una mayor rigidez para incrementar su estatura en contra de la fuerza de gravedad de la Tierra y también para alcanzar la luz solar. Por otro lado, necesitaron un sistema de transporte de agua que fuera desde la raíz hasta las ramas y las hojas, para lo cual requirieron un sistema vascular que les permitiera distribuir los resultados del proceso de la fotosíntesis de las hojas al resto de la planta. Estos cambios cruciales en cuanto a la solución a los “problemas de ingeniería” posiblemente se dieron de manera impredecible en una de tantas multiplicaciones celulares con mutaciones, recombinaciones y duplicaciones genéticas: “el DNA propone y el medio ambiente dispone”. Así se originaron las plantas vasculares en el Silúrico.

Las esporas, que fueron una gran aportación de la naturaleza, se tornaron indispensables para que se lograra la invasión de las plantas acuáticas sobre la tierra gracias a que permitieron incrementar la viabilidad de una planta en ausencia de

agua abundante. Podemos darnos cuenta, nuevamente, de que la génesis de nuevas especies ha tenido mucho que ver con la genética y la geografía. Es importante recalcar que, si no hubiera sido por la tectónica planetaria y por la formación secundaria de los continentes, no hubiera habido lugar terrestre para la invasión de especies marinas.

En los mares del Silúrico surgieron los primeros peces con mandíbula y espinas, además de otros peces con mandíbula y caparazón o armadura cefálica, mismos que dieron lugar a la aparición de una nueva superclase del subtipo de los vertebrados, la superclase de los gnatostomos (del griego *gnathos*, “mandíbula” y *stoma*, “boca”) o peces mandibulados. Recordemos que el subtipo de los vertebrados pertenece al tipo de los cordados del reino animal. Los peces con mandíbula y espinas, y los peces con mandíbula y armadura cefálica pertenecen a dos clases de la superclase de los gnatostomos: los primeros, a la clase *acanthodii*, y los segundos, a la clase de los placodermos. Continuemos ahora con el tipo de los artrópodos, que durante el Silúrico originaron los primeros insectos terrestres, creando el subtipo de los insectos. Los artrópodos del Silúrico disfrutaron la punta de la pirámide alimentaria durante los albores de la transición del agua a la tierra firme; los había de todos los tamaños, incluyendo el *Slimonia*, un artrópodo del tamaño de un ser humano. Cualquier persona que haya comido un camarón podrá haberse percatado de su estructura: el esqueleto lo tiene por fuera y todos los músculos por dentro, es un diseño espectacular, práctico y exitoso, que, sin duda, funciona mejor en tamaño pequeño. Tal es la razón por la que los grandes artrópodos, como el *Slimonia*, no hayan sido seleccionados de manera natural y se hayan extinguido. Sin embargo, miles de artrópodos diferentes, más pequeños y de todos los subtipos (trilobites, crustáceos, arácnidos e insectos) lograron un gran éxito reproductivo con el diseño de su plano corporal y dejaron un legado fósil muy numeroso. Incluso algunos de ellos permanecen vivos hasta nuestros días, representando verdaderos “fósiles vivientes”.

DEVÓNICO

La cuarta división de la era Paleozoica se inició hace 409 millones de años y terminó hace 360 millones de años, y debe su nombre a la localidad inglesa de Devon, en el suroeste de Inglaterra. Para entonces, América del Norte y Europa se encontraban centradas sobre el ecuador, mientras que las porciones africanas y sudamericana de Gondwana estaban centradas en el Polo Sur. Bajo las condiciones geológicas y climáticas del Devónico, junto con la recién formada capa de ozono atmosférico que protegía al planeta de la letal radiación ultravioleta del Sol, continuaron desarrollándose en tierra firme los artrópodos. En el mar abun-

daron unos moluscos helicoidales que solían tener un caparazón enrollado sobre sí mismo. Dichos moluscos han sido conocidos como ammonites por el extraordinario parecido de sus caparazones con los cuernos de un carnero, representación de Amón, antigua deidad egipcia. Los ammonites pertenecen a la clase *Ammonoidea*, del subtipo cefalópodos, del tipo moluscos del Reino Animal, y fueron muy exitosos, desde el punto de vista reproductivo, durante este periodo y hasta el Cretácico. Desafortunadamente, se extinguieron al mismo tiempo que los dinosaurios.

Durante el Devónico, aún en la era Paleozoica, hizo su aparición una variada cantidad de insectos sin alas, primero, y con alas, después. Desde luego que las alas sirvieron para poder escapar de algunos depredadores, como los arácnidos y algunos peces. La vida en los océanos continuó desarrollándose y se originaron los peces cartilaginosos, clase de los condriktios, que tenían el cerebro contenido en un cráneo, mandíbula, columna vertebral y esqueleto cartilaginoso, como los tiburones de la actualidad. También se manifestaron los peces lobulados o peces óseos, de la clase de los osteíktios, que desarrollaron esqueletos internos calcificados (huesos) en sus aletas pectorales y pélvicas. Tanto los condriktios como los osteíktios son diferentes clases de la superclase de los gnatostomos, subtipo de los vertebrados, tipo cordados, del reino animal. Los osteíktios son muy importantes para el resto de la escala evolutiva, ya que a partir de sus aletas carnosas con esqueletos osificados se originaron posteriormente las extremidades pectorales y pélvicas que corresponden con los de nuestras propias extremidades, señal segura de parentesco evolutivo cercano y que posteriormente dio origen a los anfibios, reptiles y mamíferos; incluso también a las serpientes que en un paso evolutivo posterior perdieron sus extremidades; otros convirtieron sus extremidades en alas y así continuó la magnificencia de la diversidad biológica.

Las transformaciones importantes de los seres vivos para invadir la tierra firme desde el mar se llevaron a cabo en el Devónico. ¿Por qué algunas plantas y animales optaron por abandonar el mar y dirigirse a las tierras arenosas, más hostiles? ¿Por qué abandonaron un medio para el cual estaban perfectamente adaptados? La respuesta es: porque buscaban el éxito en la reproducción. El aventurarse a un terreno no habitado tiene su recompensa: un medio ambiente tranquilo y virgen, donde se pueden tener crías, verlas crecer y prosperar sin que sean amenazadas por los depredadores. Las tortugas marinas continúan con dicha costumbre. Además, en tierra firme había una gran cantidad de alimento para ellos (plantas y artrópodos) y también la posibilidad de utilizar con mayor facilidad un elemento abundante e importante para la vida: el oxígeno.

Hace 360 millones de años, para finales del Devónico y principios del próximo periodo, llamado Carbonífero, cobraron existencia los peces pulmonados con la capacidad de respirar aire atmosférico: el dipnoo primitivo australiano (*Neoceratodus forsteri*) y el celacanto (*Latimeria chalumnae*), ambos de la clase de los os-

teíctios, que desarrollaron un pulmón como órgano primario de respiración y parecen compartir un ancestro común con el resto de los vertebrados terrestres. Estos peces pueden nadar en aguas poco profundas y, cuando la marea baja, quedan atrapados en el lodo, pero, al contrario de lo que sucede con otras especies de peces que bajo estas circunstancias irremediablemente mueren, el dipnoo primitivo y el celacanto sobreviven porque desarrollaron la capacidad de respirar oxígeno directamente del medio ambiente y porque, en el caso del celacanto, sus extremidades lobuladas y musculares le permitieron moverse en el fango. Ambos son candidatos importantes para pensar que a partir de ellos se desarrolló el reino animal de los tetrápodos vertebrados sobre tierra firme y, por si fuera poco, son considerados fósiles vivientes, ya que algunos de ellos viven en la actualidad. Quizá estos peces dieron lugar a un par de fósiles considerados como los primeros anfibios: el *Acanthostega* y el *Ichthyostega*, de hace 360 y 370 millones de años, respectivamente. Vale aclarar en este momento que aunque los anfibios (clase del subtipo vertebrados), podían alimentarse de insectos fuera del agua, de cualquier manera tenían que regresar a ella para reproducirse, como lo hacen los peces, mediante la fertilización externa, y también para refrescarse. Estas conductas de reproducción se observan en los sapos y las ranas de la actualidad. La clase anfibia se originó pues, a finales del Devónico y tenemos para este periodo un medio ambiente continental habitado por plantas, artrópodos (insectos y arácnidos) y anfibios; en el mar habían peces con esqueletos cartilagosos y con esqueletos osificados.

CARBONÍFERO

Para cualquier persona interesada en los recursos energéticos de la actualidad (petróleo), este periodo tiene una importancia; es la quinta división de la era Paleozoica, que se inició hace 360 millones de años y terminó hace 290 millones de años. Debe su nombre a los estratos geológicos portadores de grandes cantidades de carbón (del latín *carbo*, “carbón”, y *ferre*, “portar”) de Inglaterra y Gales.

De las masas continentales descritas con anterioridad sólo el protocontinente de Siberia se encontraba al norte de los trópicos, llegando casi hasta el Polo Norte. Gondwana se localizaba en su totalidad hacia el hemisferio sur, con una vasta superficie centrada en las inmediaciones del Polo Sur. Las plataformas continentales estaban cubiertas de bosques, la Tierra era una enorme y hermosa esfera azul y verde. Los árboles tenían troncos de hasta 30 metros de altura y sólo contaban con hojas en la parte superior. Esta época se caracterizó también por poseer una fauna “escondida”, constituida por anfibios y artrópodos. Todavía no había plantas con flores, sólo plantas verdes como helechos, musgos y coníferas. El nombre

de Carbonífero se debe a la gran cantidad de troncos de árboles que quedaron atrapados en los pantanos, exentos de los efectos ocasionados por el oxígeno atmosférico, y que con el paso del tiempo se transformaron en depósitos de carbón, que ahora son petróleo. En el Carbonífero, los árboles crecieron tan alto como les fue posible, compitiendo entre ellos por la luz solar. La Tierra estuvo más poblada que nunca por plantas verdes y árboles, lo cual ocasionó que los niveles de oxígeno producidos por la fotosíntesis fueran todavía más elevados. En respuesta, los insectos presentaron un crecimiento desmesurado, llegando a desarrollar tamaños monstruosos, y poseían grandes alas que les permitían llegar más fácil y rápido a las copas de los árboles. Los insectos crecieron y se diversificaron de manera sin precedente y también lo hicieron los arácnidos, que alcanzaron dimensiones colosales. El Carbonífero fue el periodo en el que los anfibios se perfeccionaron.

En este periodo empezaron a aparecer los primeros reptiles verdaderos, es decir, se originó la clase reptil, de la superclase de los gnatostomos, subtipo de los vertebrados, tipo cordados del reino animal; y, con ellos la separación del agua, pues estos animales ya no tenían que regresar al agua para reproducirse y, para evitar la deshidratación, desarrollaron una piel gruesa. La independencia del agua, junto con una gran cantidad de alimento que existía en el Carbonífero (insectos y arácnidos), posibilitó la conquista del medio terrestre por parte de los vertebrados.

Para procrear fuera del agua, los reptiles desarrollaron la fertilización interna (copulación) y apareció por vez primera el huevo amniote, tal y como lo hacen las aves. El huevo amniote fue un avance evolutivo crucial, que le permitió al embrión desarrollarse protegido del medio ambiente gracias a un cascarón semipermeable apto para el intercambio gaseoso a través de él; el amnios es una membrana interna del huevo que funciona como sustento y protección al nuevo individuo.

Recientemente se descubrió en Escocia un fósil denominado *Casineria*, un vertebrado que existió hace 340 millones de años y representó una transición entre los anfibios y los reptiles, y que medía 15 centímetros de longitud; tenía cuatro extremidades y una cola. Se cree que *Casineria* pudo ser un amniote o, por lo menos, un ancestro de los amniotes. Del Carbonífero existen pruebas de los primeros fósiles registrados que representan claramente a la clase de los reptiles, a los cuales pertenece la subclase anápsidos (cráneos sin abertura en la región temporal), representados en la actualidad sólo por las tortugas, y también la subclase sinápsidos (cráneos con una abertura baja en el cráneo), que durante el periodo Pérmico evolucionaron como los ancestros de los mamíferos.

PÉRMICO

El periodo Pérmico es el sexto y último de la era Paleozoica, que empezó hace 290 millones de años y finalizó hace 250 millones de años. Se denominó así en

honor de Perm (aldea al este de Rusia, Asia), en donde se correlacionaron estratos sedimentarios correspondientes a dicha época. También a esta época pertenecen yacimientos importantes de petróleo, gas y carbón. El final de la era Paleozoica estuvo caracterizado por una gran actividad geológica, una agitada y generalizada actividad de la corteza terrestre. Emergieron los continentes que se encontraban debajo de los mares poco profundos del Carbonífero; se formaron los sistemas montañosos de los Apalaches del centro y sur de Norteamérica y los montes Urales de Rusia; se unieron las plataformas continentales pertenecientes a Europa y Asia (Siberia con Rusia y China con Siberia) y en el oeste se dio una colisión entre las placas continentales de Norteamérica y el continente ancestral de Gondwana. Así, todas las plataformas continentales de la Tierra se unieron en un solo megacontinente llamado Pangea; América del Sur, África, Antártida, India y Australia se mantenían unidas cerca del Polo Sur. Lo más característico del Pérmico es, pues, la tectónica planetaria, y con ella los movimientos sísmicos. La Tierra se sacudió como nunca antes ni después lo ha hecho, y lo anterior trajo como consecuencia grandes modificaciones en la apariencia de los continentes. Por la misma causa se dieron variaciones climáticas extremas y la aparición y desaparición de diversos nichos ecológicos. La flora y la fauna se vieron sometidas a enormes presiones de selección natural y los sistemas para generar novedades genéticas se echaron a andar nuevamente (figura 3–11).

Los sinápsidos (subclase reptil), que existieron y dominaron durante este periodo, originaron el orden de los terápsidos, reptiles mamíferoides. Se llegó a esta conclusión debido a que los sinápsidos fueron los primeros animales en desarrollar una mandíbula y dientes que les permitieron masticar en lugar de desgarrar y deglutir como lo hacen otros reptiles (lagartos y cocodrilos); debido a la capacidad de masticación pudieron mejorar y hacer una digestión más eficiente, lo cual a su vez les permitió tener más fuerza y vitalidad. Gracias a una alimentación eficaz llevaron a cabo un metabolismo más intenso y se volvieron de sangre caliente. Algunos eran herbívoros y otros fueron carnívoros, lo cual les permitió incrementar su tamaño corporal y craneal gracias a un mayor aporte energético en forma de proteínas de origen vegetal y animal.

La clase reptil sigue diversificándose y hacen su aparición otras dos subclases de reptiles: los euriápsidos, con una abertura en el cráneo, los cuales se extinguieron; y, los diápsidos, con dos aberturas en el cráneo y que posteriormente dieron lugar a un número enorme de reptiles que proliferaron y fueron muy exitosos durante muchos millones de años en la siguiente era: la Mesozoica.

Hace 250 millones de años, en el momento de la transición entre el Pérmico y el Triásico, hubo una catástrofe ambiental global que llevó a la extinción de alrededor de 96% de las especies que para entonces existían. Los mecanismos que llevaron a este desastre todavía son tema de discusión. Sin embargo, algunas investigaciones recientes sugieren que la raíz del problema fue un incremento en

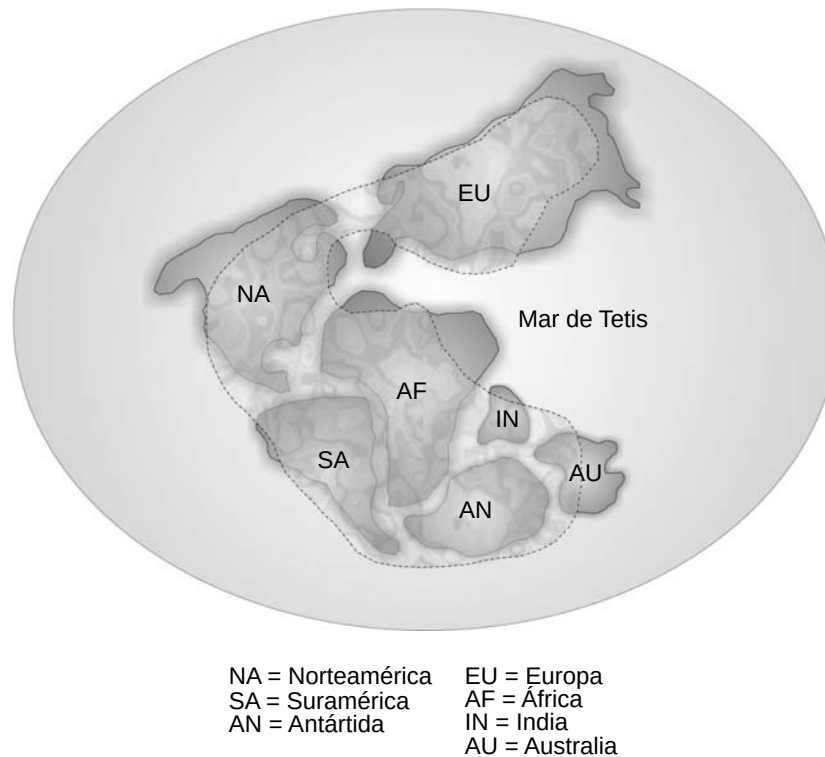


Figura 3-11. La Pangea o megacontinente del permo-triásico.

el bióxido de carbono atmosférico que permitió un sobrecalentamiento global del planeta mediante el efecto invernadero. Recordemos que este periodo estuvo caracterizado por una importante actividad geológica; las plataformas continentales aumentaron su tamaño y se unieron para formar la Pangea, lo cual pudo haber alterado el clima global de la Tierra. Se presentaron tormentas severas que, erosionando las capas superficiales de las plataformas continentales, expusieron el carbón subyacente, mismo que al reaccionar con el oxígeno atmosférico liberó bióxido de carbono a la atmósfera. También existen pruebas de una extensa y muy intensa actividad volcánica en la región de la actual Siberia, donde el flujo de lava liberó a la atmósfera gases de bióxido de carbono (entre otros gases); por último, se cree también que para ese momento se impactó en la Tierra un meteoro o un cometa de cerca de 9 km de diámetro al oeste de las islas Malvinas, donde existe una anomalía gravitacional en el fondo marino del sur del Atlántico. Muchas criaturas marinas, anfibios y reptiles, que para entonces poblaban la Tierra, fueron vulnerables a uno u otro factor y se extinguieron en este infausto evento conocido

como la extinción del Permo–Triásico. Los trilobites, artrópodos sumamente exitosos durante la era Paleozoica, desaparecieron para siempre.

Las especies que lograron sobrevivir o, que en otras palabras, fueron seleccionadas de manera natural, prosperaron y ocuparon los nichos ecológicos vacantes. La diferenciación y la proliferación se vieron particularmente facilitadas en la clase reptil, incluyendo a los predecesores de los dinosaurios. El término dinosaurio fue utilizado por primera vez en la imprenta por el anatomista inglés Richard Owen, en 1842, para describir a un grupo de fósiles que no podían clasificarse dentro de los grupos animales existentes. La palabra se deriva del griego *deino*, que se puede traducir como “terrible”, y *sauros*, que significa “reptil”. La extinción del Permo–Triásico marca el final de la era Paleozoica y el principio de la era Mesozoica, también conocida como “la era de los grandes reptiles” o como “la era de los dinosaurios”. La era Mesozoica inició hace 250 millones de años y terminó hace 65 millones de años, y significa “vida intermedia”, pues ocupa el espacio central del eón Fanerozoico y se divide en tres periodos, a saber: Triásico, Jurásico y Cretácico. Durante la era Mesozoica se diversificaron los reptiles y aparecieron algunos mamíferos y aves. Ya que nos acercamos a la era de los reptiles intentaremos aclarar su clasificación.

La clase reptil (animales que desarrollaron la fertilización interna y el huevo amniote) cuenta con cuatro subclases que son y que surgieron:

1. Anápsidos, hace 300 millones de años.
2. Sinápsidos, hace 300 millones de años.
3. Euriápsidos, hace 280 millones de años
4. Diápsidos, hace 260 millones de años.

La diferencia entre cada subclase está determinada por la cantidad de orificios que presentan los cráneos fósiles en la región temporal (en los humanos dicha región corresponde a los lados de la cabeza, por arriba de los pabellones auriculares u orejas); los anápsidos no tienen orificios y a esta subclase pertenecen las tortugas. Los sinápsidos presentan una abertura baja en el cráneo y fue a partir de ellos que evolucionaron, primero los terápsidos y luego los mamíferos. Los euriápsidos presentan dos aberturas en el cráneo y sus mejores representantes son los muy destacados reptiles marinos, el *Ictiosauro*, con hocico largo y cuerpo muy similar al de los delfines de la actualidad, y el *Plesiosauro*, de cuerpo ancho, cuello y cola largas con grandes aletas, y parecido al controvertido monstruo del lago Ness. Los euriápsidos están extintos.

La subclase de los diápsidos también tiene dos aberturas en el cráneo pero en diferentes sitios, y a su vez tiene tres infraclases:

- a. Lepidosaurios (la gran mayoría de los reptiles actuales, excepto cocodrilos y tortugas), como las iguanas y las lagartijas.

- b. Arcosaurios, como los cocodrilos y las serpientes.
- c. Dinosaurios.

Ahora nos dirigimos a los periodos de la era Mesozoica.

TRIÁSICO

Debe su nombre a una típica secuencia triple de rocas en Alemania. Inició hace 250 millones de años y terminó hace 206 millones de años, es el primer periodo de la era mesozoica. El supercontinente Pangea empezó a fragmentarse, Norteamérica se separó de Gondwana (en su parte africana), el clima era cálido y la vegetación estuvo dominada por coníferas y ginkgos. Los animales más representativos de este periodo son los dinosaurios, pero no los grandes reptiles que se observan en la era mesozoica más tardía, sino dinosaurios pequeños, entre 3 y 4.5 m de longitud. Los reptiles marinos más destacados fueron los ictiosauros y los plesiosauros. Para muchos paleontólogos, los mamíferos empezaron a manifestarse en el Triásico, aunque poco se sabe de su fisiología, de lo cual hablaremos más adelante. En cuanto a los invertebrados se refiere, durante este periodo aparecieron los insectos, representados por la primera especie en experimentar una metamorfosis completa, que incluía las fases correspondientes de larva, pupa o crisálida y adulto, como las moscas, que son verdaderos fósiles vivientes, pues han sobrevivido desde el Triásico hasta nuestros días.

JURÁSICO

Comprende desde hace 206 millones de años hasta hace 144 millones de años, debe su nombre a los estratos de roca de la cordillera Jura, que constituye la frontera entre Francia y Suiza. Para entonces, la Tierra tenía dos supercontinentes, uno en el norte, denominado Laurasia y conformado por Norteamérica, Europa y Asia, y otro al sur (Gondwana), constituido por América del Sur, África, Australia, la Antártida y la India, que empezaba a desplazarse hacia el norte en una trayectoria de colisión contra Laurasia. Entre Gondwana y Laurasia se encontraba el mar de Tetis, cuya parte occidental corresponde a lo que es ahora el mar Mediterráneo. El clima dominante fue cálido; prueba de esto es la existencia de restos fósiles de arrecifes de coral y bosques templados subtropicales con gimnospermas (coníferas y ginkgos) y helechos con semilla. Las angiospermas, que son las plantas con flor, aparecieron por primera vez a mediados del Jurásico.

Los dinosaurios, que se originaron hace 250 millones de años, fueron aumentando paulatinamente de tamaño a lo largo del Jurásico, debido a dos factores principales: era una gran ventaja alcanzar las hojas de los árboles y, en climas templados, un mayor tamaño ayudaba a conservar mejor la energía. Algunos alcanzaron tamaños gigantes, como el alosaurio (carnívoro) y el apatosaurio (herbívoros). El límite superior en cuanto al tamaño se refiere está en función de las fuerzas físicas del planeta (fuerzas de gravedad), por lo que por más grandes que hubieran querido ser, los dinosaurios siempre se iban a topar con un límite de fuerza física natural. A estas fuerzas físicas (que en otras circunstancias también pueden ser fuerzas químicas) se les conoce como fuerzas de restricción, porque limitan la capacidad de adaptación de un organismo.

Tal cual como lo muestra Steven Spielberg en la serie de películas *Parque Jurásico*, la Tierra estuvo dominada entonces por los dinosaurios, de todos tipos y tamaños; incluso también a este periodo corresponden los restos del ave más antigua, llamada *Archaeopteryx*.

CRETÁCICO

Este periodo, que inició hace 144 millones de años y terminó hace 65 millones de años, recibe su nombre por la abundancia de estratos de creta (roca caliza de carbonato cálcico de color blanco compuesta por restos de organismos marinos pequeños como los cocolitos). Durante el Cretácico la placa continental de África se separó de Gondwana y avanzó hacia el norte, sometiendo los sedimentos del mar de Tetis a poderosas fuerzas de compresión y creando las raíces de los Alpes europeos. La Antártida avanzó al sur y Australia hacia el este. Las placas de Norteamérica y Sudamérica se desplazaron hacia el oeste y generaron fuerzas orogénicas que dieron lugar a la elevación de las montañas Rocosas y a la cordillera de los Andes, respectivamente. El clima global era cálido, sin casquetes de hielo en los polos y con una temperatura de 14 °C en las aguas del Ártico. Con un clima así, los dinosaurios de sangre fría podían proliferar incluso en latitudes boreales; esto explica por qué se encuentran fósiles de dinosaurios y depósitos de petróleo en la Antártida actual.

Uno de los dinosaurios depredadores más temidos del Cretácico fue el *Velociraptor*. Debido a la gran depredación animal de estas épocas, muchos dinosaurios y algunos mamíferos decidieron probar mejor suerte en los océanos y regresaron al mar. Con respecto a la fama otorgada al *Tyrannosaurus* de este mismo periodo, vale aclarar que más bien se trataba de un animal carroñero y no de un depredador voraz.

Durante todos los años de la era Mesozoica, los mamíferos evolucionaron a partir de los sinápsidos (reptiles) y los terápsidos (reptiles mamíferoides), que

sobrevivieron a la extinción del Permo–Triásico. Recientemente se descubrió en el suroeste de China la cabeza de un fósil que data de hace 195 millones de años (principios del Jurásico) y parece corresponder al ancestro más remoto de los mamíferos; al fósil, que tiene apenas el tamaño de un clip, se le denominó *Hadrocodium wui*, y se cree que es un ancestro de los mamíferos porque tiene un cráneo grande y oído medio, típico de los mamíferos modernos. La clase de los mamíferos apareció, pues, durante el Jurásico. El paso evolutivo de los reptiles a los mamíferos es una de las transiciones más increíbles y bien documentadas gracias a la presencia de tres fósiles; los cambios evolutivos tienen que ver directamente con las configuraciones anatómicas de la mandíbula y del oído medio. Veamos, el *Dimetrodonte* es un reptil del periodo Pérmico que en el oído medio presenta un solo huesecillo pequeño y móvil denominado *Columnella auris*, cuya función es la de transmitir los sonidos captados por la membrana timpánica hasta el oído interno; por otro lado, el maxilar inferior o mandíbula del *Dimetrodonte* está conformado por varios huesos. El *Thrinaxodonte* es un reptil mamiferoide que existió durante el Triásico, cuyo maxilar inferior está formado por un menor número de huesos. El fósil perteneciente al *Morganocodonte*, del periodo Jurásico, tiene todavía una menor cantidad de huesos en la mandíbula y un mayor número de huesecillos en el oído medio. Es de notarse que se perdió un gran número de piezas dentales y que cambiaron su forma: de ser agudas y desgarradoras se convirtieron principalmente en estructuras trituradoras, lo cual mejoró la capacidad de absorción intestinal requerida debido al incremento en el metabolismo de los mamíferos por tratarse de animales de sangre caliente. Así pues, el oído medio de los mamíferos está caracterizado por la presencia de tres huesos pequeños y móviles (huesecillos) llamados martillo, yunque y estribo, que realizan la misma función que la *Columnella auris* de los reptiles, sólo que además se tiene la peculiaridad de amplificar el sonido, logrando así una mejor audición o una mayor agudeza auditiva (figura 3–12). Así las cosas, en los primeros vertebrados (o vertebrados más antiguos), el tejido mesenquimatoso destinado a formar los huesos y músculos del primer arco branquial, que es la zona embrionaria que forma la mandíbula y regiones anatómicas relacionadas (también conocido como arco mandibular o cartílago de Meckel), y el tejido mesenquimatoso del segundo arco branquial, zona embrionaria destinada a formar el hueso hioides y estructuras relacionadas (también llamado arco hioideo o cartílago de Reichert), estaban destinados a ser parte del aparato masticatorio.

Hay que especificar que el hueso mandibular de los reptiles está compuesto por varios huesos. Algunas modificaciones evolutivas posteriores disminuyeron el estrés en la articulación mandibular de algunos reptiles mamiferoides y ciertos componentes óseos de la mandíbula; el hueso articular y el hueso cuadrado, que resultaron redundantes o superfluos, en lugar de eliminarlos, la naturaleza los transformó en el martillo y el yunque, respectivamente. Dichos huesecillos, por

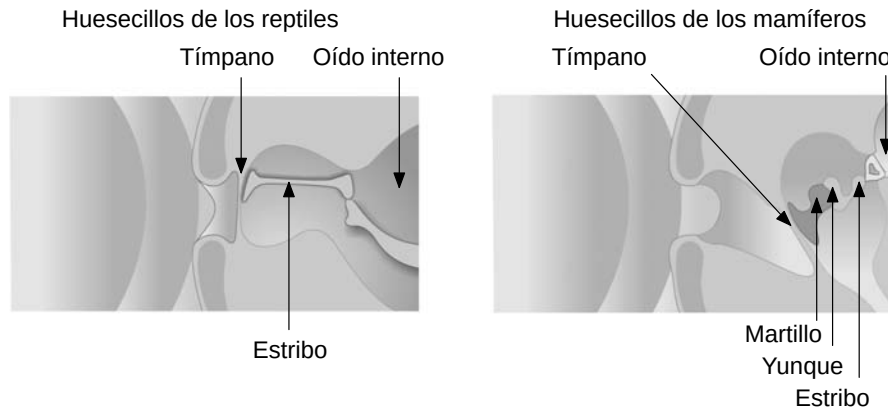


Figura 3-12. Diferencias entre la configuración anatómica del oído medio de un reptil y la del oído medio de un mamífero.

lo tanto, se derivan de los arcos branquiales que previamente daban forma a la mandíbula.

Una característica de los primeros mamíferos era su tamaño reducido, como pequeños esqueletos parecidos a los de los roedores del presente; cuando mucho, desarrollaron durante la era mesozoica tamaños medianos similares a los de los cánidos, que les permitieron conservar mejor la temperatura corporal, para lograr sobrevivir en temperaturas más frías. Estos animales desarrollaron pelo en la piel y empezaron a amamantar a sus crías. Quizá al principio sólo secretaban a través de glándulas corporales, parecidas a las sudoríparas, un tipo de líquido rico en proteínas y con propiedades antibióticas, que al lamerlo del cuerpo de la madre las crías se alimentaban y combatían infecciones. Después, la naturaleza agregó a estas secreciones algunas otras proteínas, como anticuerpos y grasa, además de adecuar unas glándulas especiales (mamarias) para dar lugar a la leche materna, que ayudaba a las crías a crecer más rápidamente. Se volvieron seres con un metabolismo elevado que les ayudó a mantenerse calientes en los lugares fríos. Este hecho les permitió ocupar nichos ecológicos que los vertebrados con sangre fría (reptiles y anfibios) dejaban de habitar. Además, gracias a su metabolismo elevado, los mamíferos podían cazar y recolectar alimentos durante la noche, lo cual favoreció la agudización de sus sentidos de la vista, del olfato y del oído, favoreciendo a su vez el desarrollo de una neocorteza cerebral más grande y compleja, que permitiera, por ejemplo, construir y recordar mapas de los lugares donde se encontraban algunas fuentes de alimentos. Todas estas innovaciones requirieron un mayor y constante aporte energético; un mamífero, de sangre caliente, no puede vivir mucho sin alimento, mientras que una serpiente, de sangre fría y metabolismo lento, puede comersse un ratón y dejar de comer por semanas. Hace 160 mi-

llones de años, durante el Jurásico, apareció la subclase de los mamíferos conocida como subclase de los prototerios, a la cual pertenece el orden de los monotremas, que incluye al actual ornitorrinco, la cual demuestra la transición hacia los mamíferos. El ornitorrinco pone huevos (como los reptiles) de cáscara muy suave; cuando las crías salen del cascarón, son amamantadas (como los mamíferos). El ornitorrinco es un animal que sirve de testigo para explicar cómo surgieron los mamíferos. Este animal, al igual que los reptiles, pone huevos fecundados y los incuba, pero cuando nacen las crías, a diferencia de los reptiles, éstas son alimentadas con leche secretada por glándulas que se encuentran difusamente localizadas en la piel de la región abdominal del animal. Además, el ornitorrinco sólo tiene un huesecillo en el oído medio, la *Columnella auris*.

Posteriormente, hace 140 millones de años, durante el Cretácico, surgió la subclase mamífera de los terios, dentro de la cual se incluyen dos infraclases, la de los metaterios y la de los euterios. A la infraclase de los metaterios pertenece el orden de los marsupiales. Continúa la transición a los mamíferos. Los marsupiales, como los canguros y los koalas, presentan la siguiente característica: el huevo (que no desarrolla cascarón) es fecundado por un espermatozoide en el útero de la hembra, luego se desarrolla un embrión que, en unas cuantas semanas, cuando mide apenas lo que mide un grano de arroz, sale del útero y se dirige hacia una bolsa especial en el abdomen de la madre; ahí es amamantado hasta que tiene el tamaño suficiente como para sobrevivir por sí mismo.

Más tarde, hace 125 millones de años, y también durante el Cretácico, hicieron su aparición los primeros mamíferos placentarios, pertenecientes a la infraclase de los euterios (a la cual pertenecen los seres humanos); en ellos, el huevo no desarrolla cascarón y tampoco el embrión sale del útero para terminar su desarrollo. En lugar de esto, el huevo fecundando desarrolla una bolsa (saco amniótico) y una placenta que se quedan en el interior del útero. La placenta es un tejido especial que se encarga de alimentar al embrión y permite que el feto crezca durante un tiempo más prolongado dentro del útero, lo cual es crítico para un mejor desarrollo del cerebro y otras estructuras. Así, las crías nacen mucho más desarrolladas que los marsupiales. El primer mamífero placentario del que se tiene conocimiento corresponde a un fósil encontrado al noreste de China al cual se le denominó *Eomaia*, muy parecido a un ratón. La era Mesozoica estuvo dominada entonces por los reptiles y, escondidos en madrigueras y cazando de noche, por los pequeños mamíferos.

¿Qué pasó después? ¿Por qué se extinguieron los dinosaurios? Es claro que tuvo que haber ocurrido una gran catástrofe a finales del Cretácico. Todo parece indicar (o por lo menos es el paradigma aceptado por la gran mayoría de los científicos de la actualidad), que este desastre lo ocasionó uno de los mayores impactos de meteoritos que ha sufrido la Tierra. El impacto llevó a la extinción a la mayor parte de los dinosaurios, pues sólo se salvaron aquellos que previamente

habían evolucionado en aves. Este fenómeno es conocido como el evento K/T (de Cretácico y Terciario), y ocurrió hace 65 millones de años. Si pensamos que tuvieron que pasar miles de millones de años para que se conformara la Tierra, veremos que la vida macroscópica es un evento sumamente reciente en la historia del planeta; en este corto tiempo hemos visto desde la aparición de los trilobites hasta la extinción de los dinosaurios. Así pues, el paradigma aceptado en la actualidad para explicar la extinción de los dinosaurios es la del megaimpacto. Se calcula que el meteorito medía 10 km de diámetro y que viajaba a una velocidad de 25 km por segundo (a esa velocidad, la distancia entre la Tierra y la Luna podría recorrerse en sólo cuatro horas). Dicho meteorito cayó cerca de la costa de la península de Yucatán, México, dejando un cráter (llamado Chicxulub) de 200 km de diámetro y 1 km de profundidad, aproximadamente (figura 3–13). La cantidad de polvo y rocas desplazadas por el impacto que dieron lugar al cráter Chicxulub fue de 50 000 billones de toneladas, y el movimiento que se percibió en la corteza terrestre se pudo haber semejado al de un sismo con magnitud de 12.4 grados. En los océanos se formaron tsunamis (grandes olas de fondo) de 300 m de altura que dejaron a los bosques a 500 m bajo el agua. Esta catástrofe ambiental se ha documentado gracias a los depósitos en las capas geológicas correspondientes al even-

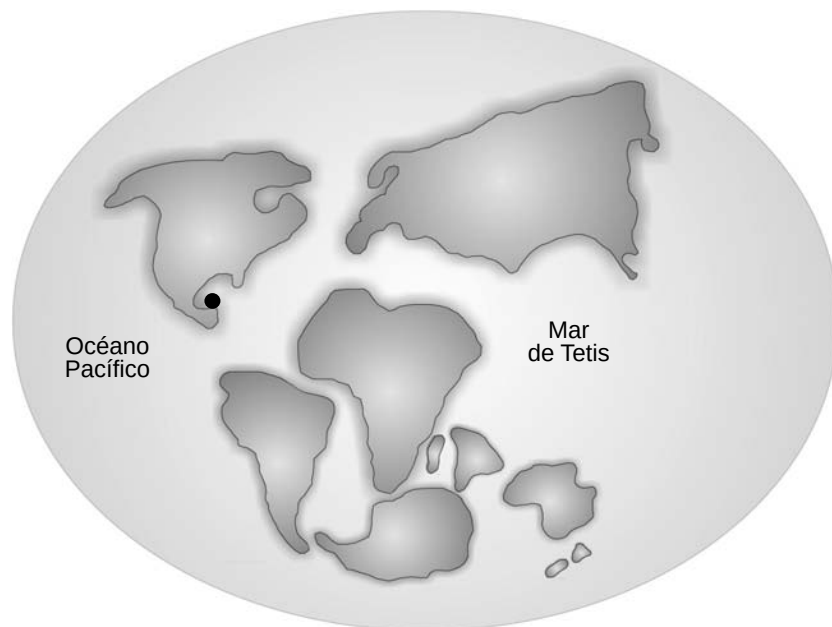


Figura 3–13. Los continentes en el cretácico. Señala el sitio del impacto del meteorito que cayó sobre la Tierra hace 65 millones de años.

to K/T de iridio, un material radiactivo que solamente se encuentra en los meteoritos. El impacto ocasionó un incendio de proporciones globales y levantó una gran nube de polvo y rocas, lanzando algunas de ellas al otro lado del planeta, otras quizá alcanzaron Marte, Venus o la Luna y varias quedaron orbitando alrededor de la Tierra durante algunos años hasta que cayeron a su superficie nuevamente atraídas por la fuerza de gravedad. La nube de polvo tampoco cayó de inmediato, sino que permaneció flotando en la atmósfera durante uno o dos años. Durante ese tiempo no se observó la luz solar y los días se convirtieron en noches. La temperatura bajó al punto de congelamiento causando la muerte de la mayoría de las plantas que realizaban la fotosíntesis, incluyendo al plancton; se destruyó así el primer eslabón de la cadena alimentaria. El enfriamiento global del planeta también ocasionó la extinción de los dinosaurios porque eran animales de sangre fría y no pudieron mantener sus cuerpo caliente. Una tercera parte de los mamíferos, que son de sangre caliente, y algunos reptiles pequeños, por su tamaño reducido, lograron mantener su temperatura corporal y pudieron sobrevivir para poblar otra vez el planeta. Nuevamente fueron fenómenos astronómicos, geofísicos y climáticos los que indujeron y marcaron los cambios evolutivos en las especies animales y vegetales. El choque fue brutal y no sólo acabó con los dinosaurios, sino con muchos otros seres vivos: plantas, animales distintos de los dinosaurios y ciertos moluscos, entre ellos los ammonites. En la extinción del K/T se perdieron 75% de las especies que vivían entonces.

Se dice que después de la tempestad viene la calma y así fue. Con el tiempo, las condiciones atmosféricas mejoraron. Algunas investigaciones recientes de fósiles de plantas en el sur de Denver, Colorado, demuestran que la vegetación surgió nuevamente alrededor de 1.5 millones de años después del impacto (anteriormente se creía que habían tenido que pasar 10 millones de años) y empezó la era de los mamíferos.

El evento K/T marca el límite entre la era Mesozoica y la era Cenozoica, que comprende los periodos Terciario y Cuaternario, de hace 65 millones de años al presente.

Durante el Cretácico se originaron los afroterios, hace 105 millones de años, los ancestros mamíferos placentarios (en todo el sentido de la palabra) más remotos; a estos animales pertenecen el elefante, el manatí, la cebra y el antílope. Los afroterios son los animales africanos más ancestrales, el resto (los carnívoros) llegaron posteriormente de Europa y Asia. Los xenartros, como el armadillo, se originaron también durante el Cretácico hace 95 millones de años en América del Sur, cuando todavía era una gran isla y no se había unido con América Central mediante la formación del istmo de Panamá (hecho que tuvo lugar hace apenas tres millones de años). La palabra *xenartros* quiere decir “articulación extraña”, debido a que las vértebras lumbares cuentan con unas articulaciones adicionales entre las vértebras, que les confieren una gran rigidez. Del mismo modo, vale la

pena mencionar que hace cerca de 85 millones de años aparecieron los animales conocidos como laurasiaterios, originarios de Laurasia, a los cuales pertenecen ciertos carnívoros como los perros, los gatos y los osos; los hipopótamos y las ballenas (muy emparentados entre sí); los cerdos, los caballos, las ovejas, los camellos y los venados. Es importante saber que estos animales, con gran potencial de ser domesticados, aparecieron en Laurasia y no en cualquier parte del globo terráqueo. Los roedores, el conejo, el puercoespín y el castor también surgieron durante el Cretácico, pero poco tiempo después, hace 75 millones de años. Para acercarnos un poco más a nuestra línea evolutiva, mencionaremos que durante este mismo periodo, y hace 70 millones de años, surgió el colugo, mamífero nocturno al que con frecuencia y equivocadamente se le denomina lémur volador, pues no está emparentado con los lémures ni es capaz de volar.

TERCIARIO

Es la primera división de la era Cenozoica. Este periodo abarca desde hace 65 millones de años hasta hace 2.6 millones de años, y recibe su nombre a que anteriormente los últimos 540 millones de años se dividían en cuatro periodos y el terciario ocupaba el tercer lugar. El Terciario se divide a su vez en cinco épocas:

1. El Paleoceno empezó hace 65 millones de años y terminó hace 55 millones de años, y se caracterizó por la separación completa de Pangea; los movimientos sísmicos de la tectónica planetaria separaron finalmente a la Antártida de Australia. Al haber desaparecido los dinosaurios, la vida de los mamíferos empezó a dominar la Tierra. Los principales mamíferos que se diversificaron fueron los marsupiales y los insectívoros. En él, hace 63 millones de años, surgieron los ancestros del orden de los primates (prosimios), animales caracterizados por tener una dentadura 2123 (dos dientes incisivos, un canino o colmillo, dos piezas dentales premolares y tres molares), cara ligeramente aplanada, ojos que miran al frente y nariz que apunta hacia adelante y se observa partida (como la de los perros); el término correcto para esta característica es *strepsirrino*. El ejemplo de este primate ancestral extinto es el *Purgatoriu*, un mamífero primate del tamaño de una rata y parecido a una ardilla. Son también cualidades de los prosimios su forma de vida nocturna y sus cinco dedos, con el pulgar de la mano y el dedo gordo del pie muy desarrollados, prensiles y oponibles al resto de los dedos en todas las extremidades; además, se aprecian uñas en lugar de garras; el ejemplar actual está representado por el lémur y el aye-aye. Hace 58 millones de años apareció otro de nuestros antepasados, el tarsero, cuya novedad

consistía en ser haplorrino, es decir, con la nariz completa, como la nuestra, y no partida.

2. El Eoceno empezó hace 55 millones de años y terminó hace 34 millones de años. Durante esta época, las cordilleras montañosas del oeste de América del Norte y de América del Sur continuaron levantándose y el continente de Laurasia continuó desgajándose. La India colisionó con el litoral sur de Asia y se levantó el sistema montañoso del Himalaya. Continuó la rápida evolución de los nuevos órdenes de los mamíferos y aparecieron las primeras formas ancestrales de caballos y rinocerontes, entre otros grupos modernos como los de los murciélagos y los roedores parecidos a las ardillas. Hace 40 millones de años, dentro del orden de los primates surgieron los monos del Nuevo Mundo, con visión dicromática, carencia de hueso timpánico (contenido en el hueso temporal del cráneo) y nariz menos proyectada hacia adelante, característica conocida como *platirrina*. Los ejemplos de la actualidad son el mono araña y el capuchino.
3. El Oligoceno comenzó hace 34 millones de años y terminó hace 23 millones de años. En esta época, los restos afroárabes de Gondwana chocaron al norte con Eurasia, contribuyendo al levantamiento de las cadenas montañosas de los Alpes, hacia el oeste, y de la cordillera del Himalaya, hacia el este. Se cerró el extremo oriental del mar de Tetis y así se creó el mar Mediterráneo. En esta época, los mamíferos estaban ya establecidos como la forma de vida dominante en tierra firme. Hace 25 millones de años aparecieron los monos del Viejo Mundo, todos con cola, al igual que los del Nuevo Mundo, pero con las siguientes diferencias: tenían hueso timpánico, las aperturas nasales o narinas se dirigieron hacia abajo, por lo que se les conoce como catarrinos (nariz que cae), y además tenían una visión tricromática, característica adquirida por la duplicación y diferenciación de un solo gen, que permite una visión basada en los tres colores primarios. Todos estos detalles los podemos observar en los actuales macacos. Surgieron nuevas especies en el mar, en el aire y en la tierra. Existieron mamíferos muy grandes que tenían la capacidad de alimentarse de frutas como el mamey o el mango, podían tragar y pasar sus grandes semillas por todos sus sistemas digestivos y evacuarlas posteriormente en sitios lejanos, lo cual les permitía a los árboles frutales diseminar sus semillas a distancias considerables. A los monos en general, tanto a los del Viejo Mundo como a los del Nuevo Mundo, incluido al orangután, se les conoce generalmente como antropoides, porque sus caracteres morfológicos externos son semejantes a los de los seres humanos. El *Aegyptopithecus* es otro primate que se originó hace 34 millones de años, y se piensa que fue un hominoide porque presenta ciertas características de comportamiento social y algunas facultades en el uso de herramientas muy rudimentarias que lo hacen diferente y más especializado que

los antropoides. Los gorilas, los chimpancés y los bonobos (o chimpancés pigmeos) también son homínidos, pero se originaron mucho tiempo después (entre unos 7 a 10 millones de años). Estos animales pertenecen a la clase de los mamíferos, orden de los primates, suborden de los antropoides y superfamilia de los homínidos.

4. En el Mioceno, de hace 23 millones de años hasta hace cinco millones de años, las cordilleras de los Alpes europeos, del Himalaya y del continente Americano (Rocosas y Andes) continuaron elevándose, el clima se volvió más fresco, cambiaron los patrones de circulación en los océanos y se formó un gran casquete de hielo sobre la Antártida. Los cambios climáticos experimentados durante esta época ocasionaron que grandes áreas antes cubiertas por espesos bosques se convirtieran en praderas extensas. Con respecto a la fauna, aparecieron los mastodontes. Se cuenta con un fósil de hace 14 millones de años conocido como *Proconsul africanus*, nombrado así por el paleontólogo inglés Tindall Hopwood en honor a Cónsul, un chimpancé que alrededor de 1930 entretenía a los espectadores del zoológico de Londres con ciertas habilidades como andar en bicicleta y fumar pipa. Lo mencionamos porque es un representante del orden de los primates considerado un ancestro de nuestra especie. Durante esta época, los grandes simios habitaron Asia y el sur de Europa. Los pequeños simios, como el gibón, aparecieron hace 18 millones de años, los grandes simios se originaron hace alrededor de 14 millones de años. La diferencia principal entre los monos y los simios es que los últimos carecen de cola.
5. El Plioceno es la quinta y última época del periodo terciario, e inició hace 5 millones de años y terminó hace 2.6 millones de años. Desde el punto de vista geológico, lo más característico de esta época fue que la colisión de las placas africana e ibérica que inició a finales del Mioceno y que había formado el sistema bético-rifeño cortó la comunicación del mar Mediterráneo con el océano Atlántico (con lo que se produjo la desecación del primero); con la nueva cuenca surgió un clima árido y, posteriormente, durante esta misma época, se volvió a abrir el paso en lo que hoy se conoce como el estrecho de Gibraltar, y el mar Mediterráneo se llenó de nuevo. Con la aproximación de los periodos glaciales del Pleistoceno (que pertenece al siguiente periodo del cuaternario), el clima se volvió más frío y seco. A partir de esta época, entre hace 6 y 7 millones de años, aparecieron nuestros ancestros mejor identificados. Precisamente a ellos se les clasifica dentro de la familia de los homínidos, que a su vez forman parte de la superfamilia de los homínidos, punto que retomaremos más adelante cuando iniciemos la descripción de la evolución de los homínidos, individuos caracterizados por la bipedestación, habilidad manual tosca o rústica y un sistema de organización social ligeramente más complejo.

CUATERNARIO

El periodo Cuaternario es el más moderno de la era Cenozoica; se inició hace 2.6 millones de años y comprende hasta nuestros días. El Cuaternario se divide en dos épocas: Pleistoceno, de 2.6 millones de años a 0.01 millones de años, y Holoceno, de hace 0.01 millones de años a la fecha. La temperatura global del planeta siguió descendiendo hasta la aparición de grandes extensiones de hielo que llegaron a cubrir una cuarta parte de la superficie terrestre. Un sistema glaciar europeo estaba centrado sobre Escandinava; se extendía hacia el sur y hacia el este sobre Alemania y el oeste de Rusia, y hacia el oeste sobre las islas Británicas; otro sistema glaciar cubría la mayor parte de Siberia y otro más abarcaba el norte de América (Canadá y los Estados Unidos hasta Pensilvania). Las regiones ártica y antártica quedaron cubiertas de hielo desde entonces, al igual que los picos de las montañas más altas del mundo actual. En las regiones libres de hielo, la flora y la fauna fueron esencialmente las mismas que en la época del Plioceno, pero el enfriamiento global ocasionado por las glaciaciones llevó a la extinción de algunos grandes mamíferos, como el mastodonte y el dientes de sable o *Smilodon*. Mientras se acumulaban el hielo y la nieve en las latitudes altas, en las más bajas y ecuatoriales aumentaban las lluvias, lo cual permitió que la vida animal y vegetal floreciera en el norte y el este de África, hoy desierto del Sahara. Como se verá más adelante, existen pruebas de que el Sahara estuvo habitado por homínidos durante el pleistoceno tardío.

Posteriormente, el deshielo hizo subir unos 30 m el nivel del mar, inundando grandes superficies de tierra; el retroceso del hielo en el norte de América dio lugar a los Grandes Lagos de Estados Unidos y Canadá.

Un reciente y asombroso descubrimiento fue realizado en África Central, más precisamente en Chad, a 2 500 km del Gran Valle del Rift, al este de África, en una franja de tierra localizada al sur del desierto del Sahara; se encontraron los restos fosilizados de lo que parece ser uno de los primeros homínidos; los fósiles incluyen un cráneo casi completo y varios fragmentos de huesos mandibulares. Según los fósiles de flora y fauna que se encontraron en zonas circundantes se llegó a la conclusión de que tienen entre 6 y 7 millones de años de antigüedad, lo cual los convierte en los miembros más primitivos de la familia de los homínidos, muy cerca de la divergencia entre las líneas evolutivas del chimpancé y del ser humano. El nombre científico que se le dio al descubrimiento fue el de *Sahelanthropus tchadensis*, que hace referencia a Sahel, región de África que bordea el sur del Sahara, donde fueron encontrados los fósiles, y a Chad, que es en donde se encuentra el Sahel. El fósil tiene una cavidad craneana pequeña (entre 320 y 380 cm³) y por esto se clasificó como primitivo. Además, cuenta con otras características, como poseer unos caninos pequeños, y varios aspectos de la base del cráneo y de la cara que son muy similares a las que se observan en los homínidos

más modernos. Por otro lado, un equipo francoafricano de paleontólogos descubrió un fósil denominado *Orrorin tugenensis*, de 6 millones de años de antigüedad, conocido comúnmente como “el hombre del milenio”, porque fue dado a conocer en diciembre de 2000 y, aunque aseguran que se trata de nuestro ancestro más remoto, todavía no existen pruebas fehacientes de que se trate de un homínido debido a que los restos fósiles se encuentran muy fragmentados. Los restos fósiles de los homínidos más paradigmáticos datan de hace 5.8 millones de años; fueron seres que pertenecían a los primates superiores, cuya especie superviviente es la humana. Uno de estos homínidos muy antiguos es el *Ardipithecus ramidus kadabba*, que vivió hace 5.8 millones de años, cuyo nombre se deriva del dialecto afar: *ardi* quiere decir “tierra” o “suelo”, *pithecus* significa “simio” (simio terrestre), *ramid* se traduce como “raíz” y *kadabba* significa “ancestro familiar básico”. Posteriormente apareció un fósil de hace 4.4 millones de años, el *Ardipithecus ramidus ramidus*. Le siguió el *Australopithecus anamensis* de hace cuatro millones de años; *Australopithecus* significa “simio sureño” (*austro* quiere decir “sur” y se refiere a regiones de África en donde han sido encontrados), *anamensis* viene de *anam*, que quiere decir “lago”, ya que fue encontrado cerca del lago Turkana, situado al norte de Kenia, en la frontera con Etiopía (figura 3–14). Luego apareció el *Australopithecus afarensis* (simio sureño de Afar), de hace 3.3 millones de años. Este fósil es mundialmente conocido con el nombre de “Lucy”. El paleontólogo Don Johanson lo descubrió en 1976 y es uno de los fósiles homínidos más completos; su sobrenombre se debe a que en la noche de su descubrimiento, los paleontólogos festejaron brindando con cerveza al son de “*Lucy in the sky with diamonds*”, famosa canción de los Beatles. Posteriormente siguen el *Australopithecus africanus* de hace 3 millones de años, el *Australopithecus aethiopicus* y el *Australopithecus garhi* (*garhi* en el dialecto afar quiere decir “sorpresa”), de hace 2.5 millones de años; este último desarrolló la capacidad de hacer instrumentos de piedra y dio lugar a una nomenclatura diferente y dividida en tres para el periodo Cuaternario: Paleolítico, Mesolítico y Neolítico (edad de piedra antigua, media y nueva). Después, fechado con una antigüedad de dos millones de años, se halló el *Australopithecus boisei* (en honor a Charles Boise, quien financió la expedición que descubrió dicho fósil), y más recientemente, hace 1.8 millones de años, hizo su aparición el *Homo habilis*, aunque existe controversia acerca de si el *habilis* pertenece al género *Homo* o al *Australopithecus*, un homínido capaz de utilizar instrumentos rudimentarios de diferentes tipos y materiales; por ejemplo, podía usar una piedra para romper un hueso y comerse la médula ósea. También existe controversia respecto de otro homínido de esta época (1.75 millones de años), la especie *ergaster*, que significa hombre trabajador, que no se puede diferenciar si pertenece a un *Australopithecus africanus* tardío o a una forma temprana de *Homo erectus*. El mejor ejemplo conocido de *ergaster* es “el niño de Turkana”, descubierto por Richard Leakey y Alan Walker en 1984, cerca

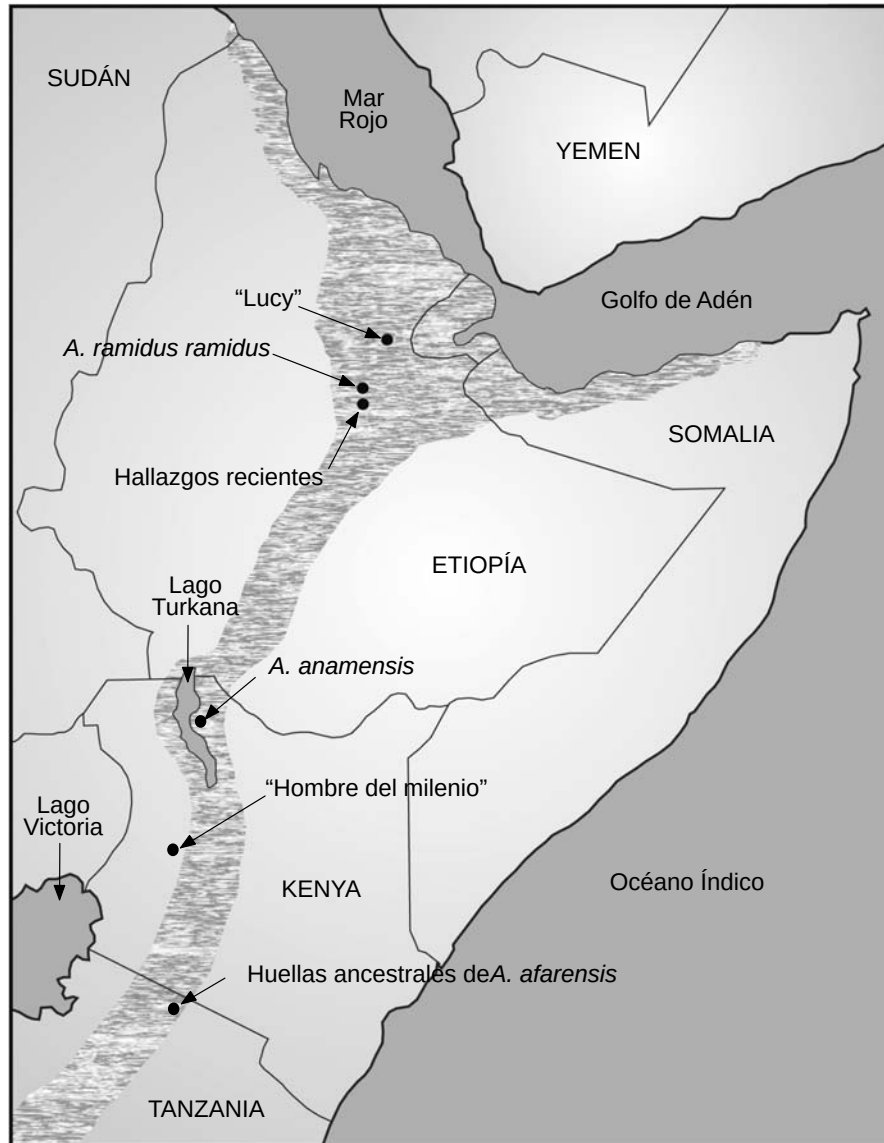


Figura 3-14. Localización del Valle de la Gran Fisura y sitios en donde se han descubierto fósiles de los diferentes homínidos.

del lago Turkana. Al mismo tiempo apareció el último homínido del género australopiteco, el *Australopithecus robustus* (dentadura fuerte con la capacidad de triturar una dieta basada en frutas, vegetales frescos y semillas), que cohabitó

durante unos 300 000 años con el *Homo ergaster* y un poco con el *Homo erectus* que debutó hace un millón de años. El *Homo erectus* fue un homínido que muy probablemente tenía la capacidad de fabricar instrumentos de piedra ligeramente más sofisticados, simétricos y filosos, además se cree que tenía la capacidad de cazar y de caminar grandes distancias. *Erectus* fue probablemente el homínido responsable de poblar diferentes regiones del mundo, siguiendo una serie de migraciones que, como veremos más adelante, duraron varios miles de años. Los primeros nómadas pasaron a través del Medio Oriente en dirección a Europa y

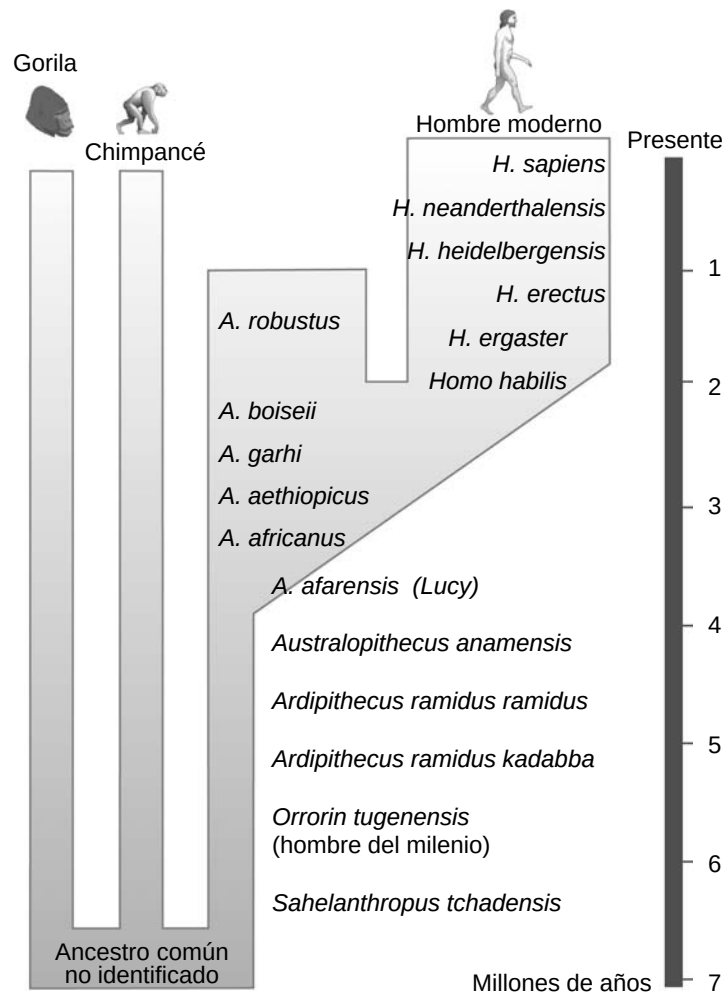


Figura 3-15. Hallazgos fósiles correspondientes a los últimos siete millones de años (fechas aproximadas).

Asia, lo cual dio origen al *Homo heidelbergensis* y al *neanderthalensis* (hombre de Neanderthal) hace aproximadamente 500 000 años. Finalmente, surgió el *Homo sapiens*, hace 100 000 años, un homínido con un cerebro grande y desarrollado, y un alto potencial de lenguaje y socialización. Vale la pena indicar que el único antecesor seguro del *Homo sapiens* es el *Homo erectus*.

Hemos mencionado hasta ahora el orden de aparición de los homínidos según los registros fósiles, lo cual no quiere decir que exista una línea evolutiva directa entre el *Australopithecus* y el *Homo*; por el contrario, investigaciones recientes demuestran que hay diferencias notorias y más que descendientes del *Australopithecus* son una especie de primos (figura 3–15).

Detallemos ahora cómo sucedieron los últimos eventos relacionados con los homínidos y con la aparición del género *Homo*, perteneciente a la familia de los homínidos.

Del origen del hombre a la distribución y destino de los humanos

La historia tomó caminos distintos para diversos grupos poblacionales debido a circunstancias ambientales y no por diferencias biológicas entre las personas.

Jared Diamond

La palabra *homo* proviene del latín *humus*, que significa “tierra” o “lodo” o, más específicamente, el componente orgánico de ellos; esta similitud lingüística se tomó como apoyo a la historia de la creación narrada en el Viejo Testamento, en el libro del Génesis 2:7: “Entonces Jehová Dios formó al hombre del polvo de la tierra, y sopló en su nariz aliento de vida, y fue el hombre un ser viviente”. Sin embargo, fue el mismo Linneo (el naturalista sueco) quien a mediados del siglo XVIII acuñó el término de *Homo sapiens sapiens* para los seres humanos modernos, como somos y como nos conocemos. En aquel tiempo se pensaba que el resto de los primates eran incapaces de contar con un pensamiento consciente, por eso le aplicó el término *sapiens* (como especie) al *Homo* (nuestro género); ahora sabemos que eso no era así y que tanto el chimpancé como el bonobo, el gorila y el orangután son capaces de pensar y de tomar decisiones racionales, de acuerdo con su nivel.

Recapitulando sobre nuestra clasificación general y la aparición de las características que nos fueron dando forma y función: la especie es *sapiens* (sabios pensantes) desde hace 100 000 años; el género *Homo* se refiere a los humanos verdaderos desde hace dos millones de años; de la familia de los *Homínidos* (compartiendo ciertas características como la bipedestación, habilidad manual e interacción social con los *Australopithecus*) desde hace siete millones de años;



Figura 4-1. Cazadores. Pintura rupestre.

de la superfamilia de los *Hominoides* (junto con el chimpancé, el bonobo y el gorila) desde hace 20 millones de años; del suborden de los *Antropoides* (incluidos el orangután y los monos del nuevo y del Viejo Mundo) desde hace 25 millones de años; del orden de los *Primates* (incluyendo a los primates inferiores como el lémur) desde hace 63 millones de años; de la subclase de los *Euterios* (animales cuyo embrión, provisto de placenta, se desarrolla dentro del útero materno) desde hace 140 millones de años; de la clase de los *Mamíferos* (donde las hembras alimentan a sus crías con la leche de sus glándulas mamarias) desde hace 195 millones de años; de la superclase de los *Gnatostomos* (animales con mandíbula) desde hace 440 millones de años; del subtipo de los *Vertebrados* (seres con cráneo y columna vertebral) desde hace 510 millones de años; del tipo de los *Cordados* (que desarrollan notocordio) desde hace 530 millones de años; del reino *Animal* (individuos que pueden moverse por sí mismos) desde hace 800 millones de años; del súper reino de los *Eucariontes* (células con material genético contenido en un núcleo y orgánulos en el citoplasma) desde hace 2 200 millones de años; y seres vivos desde hace 3 500 millones de años.

La humanidad es un producto de África, somos lo que somos y tenemos la forma que tenemos debido a que el medio ambiente africano se moldeó seleccionando la mayoría de los cambios evolutivos propuestos genéticamente, durante una larga jornada, hacia el ser humano. Estos cambios incluyen la divergencia del chimpancé a partir de un ancestro común, la bipedestación, el crecimiento del cerebro, los movimientos finos y precisos con los dedos de las manos, que permitie-

ron la utilización de herramientas cada vez más complejas, el lenguaje y la emergencia del género y la especie: *Homo sapiens*. Todas estas innovaciones deberían tener un sello que diga: “hecho en África con calidad de exportación”.

BIPEDESTACIÓN

Los primeros simios aparecieron aproximadamente entre hace 20 y 14 millones de años, cuando los bosques de África empezaron a secarse y dieron paso a la sabana. Los cambios climatológicos y en el medio ambiente se convirtieron en una fuerte presión de selección natural que obligó a la diversificación de las especies de simios y a la ocupación de los nuevos nichos ecológicos. Los primeros simios eran muy parecidos a los monos: continuaban caminando sobre las cuatro extremidades y apoyándose sobre las palmas y la plantas; todavía no se desplazaban con los nudillos, como lo hacen en la actualidad. El *Morotopithecus bishopi*, el ancestro más remoto de los simios, se parece mucho a un mono. Sus restos se encontraron en Uganda y datan de hace 20 millones de años. Se le reconoce como a un ancestro común de simios y humanos (hominoide), cuyos fósiles demuestran que contaba con una articulación acromio–humeral (hombro) que le permitía colgarse de las ramas de los árboles, lo cual no pueden realizar los monos. Estos simios podían entonces colgarse (o medio colgarse) de las ramas de los árboles y caminar sobre otras inferiores, gracias al amplio margen de rotación de la articulación del hombro. En otras palabras, ésta era una forma de bipedestación, pero entre las copas de los árboles.

Actualmente, la mayoría de los simios pasan la mayor parte del tiempo caminando sobre el piso en cuatro patas, subiendo a los árboles para alimentarse de frutas y dormir, pero generalmente se mantienen en el suelo. Pueden caminar grandes distancias, como los chimpancés, de la siguiente manera: extienden los brazos al frente, apoyan los nudillos sobre el suelo y tiran el cuerpo hacia delante, luego apoyan sus cortas patas traseras y se empujan. Los monos no lo hacen así, sino que caminan balanceándose en las cuatro patas, sobre las palmas de las manos y las plantas de los pies, más o menos como lo hace un perro.

Los chimpancés se alimentan sobre todo de frutas. Cerca de 70% de su dieta consiste en frutas maduras o casi maduras, el resto y las proteínas las obtienen mediante la cacería, en la que obtienen monos, antílopes recién nacidos o enfermos, cerdos salvajes y otras presas pequeñas. Pero volvamos a nuestros orígenes, a una de las cuatro principales características que nos distinguen: la bipedestación.

A la fecha continúa el debate sobre si la bipedestación es más eficaz que el caminar en cuatro patas. Aunque parece lógico pensar que caminar en dos pies con-

sume una menor cantidad de energía que caminar en cuatro patas y que por la misma razón la bipedestación de los homínidos fue favorecida por la selección natural, algunos científicos han concluido que los humanos no son, necesariamente, unos caminantes más eficientes al compararlos con los cuadrúpedos, pero que en cierta manera pueden caminar erectos con más eficacia que los chimpancés. En otras palabras, los científicos dicen que no tiene sentido, desde el punto de vista evolucionista, que la mayoría de los mamíferos cuadrúpedos tengan que evolucionar hacia la posición erecta como intento para volverse más eficientes, pero que si algún animal ya ha evolucionado a caminar ayudándose con los nudillos (como los simios), entonces cambiar a una posición erecta sería una situación más sensible desde el punto de vista energético. Otros investigadores aseguran que, aunque los humanos modernos caminamos más eficientemente que cualquier cuadrúpedo con el mismo tamaño y peso, no necesariamente tuvo que ser así en el caso de los primeros homínidos, cuyas características anatómicas carecían del refinamiento locomotor con el que contamos ahora, es decir, que su bipedestación quizá se llevó a cabo torpemente. Sugieren que la motivación inicial para cambiar a una posición erecta quizá no fue mejorar la eficiencia energética utilizada para el desplazamiento de uno a otro lugar. Por otro lado, se ha llevado a cabo una gran cantidad de estudios de investigación que tratan de demostrar la verdadera función de la eficiencia locomotora en la aparición y desarrollo de la bipedestación, pero la mayoría carece de fundamentos irrefutables. Al final una cosa es cierta: si los humanos fuéramos maratonistas cotidianos, entonces la eficiencia sería crítica. Pero sin lugar a duda no lo somos, y menos en la actualidad. Seguramente los homínidos empezaron con la bipedestación trasladándose en distancias cortas; si es así, la eficiencia desempeña una función secundaria, no una principal ni determinante como para ser considerada una característica de selección natural.

Los cambios más drásticos que se observan en nuestros ancestros, los homínidos, y en su transición hacia los humanos, se localizan en las caderas. La selección natural escogió, a partir de una instrucción genética, un grupo de huesos y músculos que soportaban el peso de los simios y que se transformaron notoriamente en un sistema de soporte que caracterizó la nueva postura del caminante bípedo o erecto. Los procesos incluyeron la remodelación de la pelvis en una estructura totalmente novedosa y los cambios anatómicos y funcionales de un pequeño grupo de músculos simiescos que se convirtieron en el grupo muscular más grande del cuerpo humano.

El hueso pélvico de los seres humanos tiene forma de vasija, da forma y limita a la cintura; está diseñado para dar soporte al cuerpo en las posiciones erecta y en reposo, y está conformado por los huesos sacro, cóccix e innominado. Por otro lado, estamos familiarizados con los músculos glúteos, el tejido suave sobre el cual nos sentamos y que le da forma, tamaño y consistencia a las nalgas. Tres de

estos músculos se encuentran localizados, de cada lado, en la posición superior (o proximal) de cada muslo: el glúteo máximo o mayor, el glúteo medio y el glúteo mínimo o menor. En los gorilas y los chimpancés, los dos últimos músculos se encargan de la propulsión en la forma cuadrúpeda de locomoción de estos animales (como se detalló anteriormente) y se insertan de la parte superior del fémur hacia la parte superior del hueso iliaco de la pelvis, lo cual les confiere un amplio rango de movimiento. Los humanos no necesitamos estos músculos para impulsarnos dado que no son los que nos impulsan, sino que en nuestro caso son estos músculos los que, adoptando una nueva función, nos brindan estabilidad al momento de caminar en dos extremidades. Para poder entender lo dicho, haremos un ejercicio: todos hemos notado que de un paso a otro, al momento de caminar, nuestro cuerpo queda apoyado en una pierna mientras la otra la dirigimos hacia delante. El segundo durante el cual nos soportamos en una sola pierna nos indica que nuestro contacto con la superficie terrestre es notoriamente tenue, y es este instante de gran inestabilidad que logramos superar gracias a los músculos mencionados. Si no fuera porque los músculos glúteos se insertan a los lados de la cadera, entraríamos en inestabilidad y no podríamos sostenernos en una sola pierna. Este grupo muscular que a los simios les sirve para darles propulsión, a los seres humanos les brinda estabilidad; la migración o cambio de posición anatómica de los glúteos es el resultado de una propuesta genética evolutiva que se dio en un grupo de homínidos hace aproximadamente cuatro o cinco millones de años (quizá hace siete millones de años), y que les brindó la oportunidad de mantener erecto el torso, además de una suave estabilidad en la marcha, características que ofrecieron, en un momento dado, un éxito reproductivo y una mejor adaptación al medio ambiente, por lo cual fueron seleccionadas naturalmente. Las modificaciones musculares y esqueléticas mencionadas llevaron necesariamente a otros cambios en el esqueleto de los homínidos, como la modificación en la columna vertebral (que se hizo más vertical), en la caja torácica y en la articulación de la cabeza con las vértebras superiores.

Volviendo a los huesos pélvicos, hay que mencionar que los chimpancés cuentan con un hueso grande, largo y aplanado, como un remo, localizado en la parte posterior de su cuerpo, algo parecido a la disposición anatómica del hueso omóplato, pero en la parte más baja del torso. Este hueso pélvico (específicamente el hueso ilion) fue víctima de una metamorfosis a lo largo de algunos miles de generaciones de simios y se convirtió entonces en un hueso corto, ancho y curvo, localizado más bien en posición lateral y no posterior (figura 4-2).

En la actualidad, el hueso pélvico de los humanos se localiza de manera circunferencial a lo largo de la cadera y en su interior delimita una especie de copa o vasija que contiene a los órganos pélvicos, como los intestinos y la vejiga, entre otros. En los simios, así como en muchos otros primates, el hueso pélvico se extiende a lo largo (de cada lado) en la parte trasera y baja del torso y sirve para que

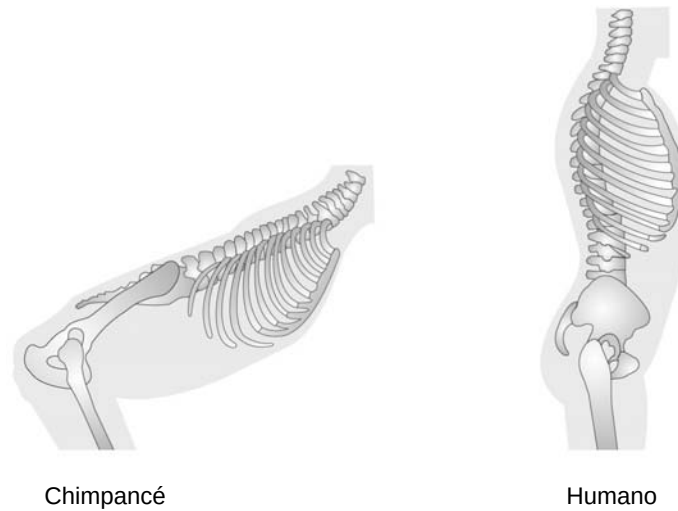


Figura 4-2. Posición de la cadera y del hueso pélvico en el chimpancé y en el humano.

en esa área se insertan los músculos cuya función consiste en extender (para impulsar) las piernas de esos animales. Los humanos no necesitamos una poderosa extensión en los miembros inferiores dado que no nos impulsamos con ellos, sino que caminamos. Entonces, el propósito de nuestra configuración anatómica es dar soporte y estabilidad a la marcha. En detalle, nuestra pelvis está conformada por seis huesos, tres de cada lado, fusionados durante el desarrollo fetal, y son el hueso pubis, el hueso isquion y el hueso ilion, denominados hueso innominado; el hueso ilion es el hueso que se transformó de manera más crítica en el humano y el que ofrece más ayuda para lograr la bipedestación. En lugar de disponerse anatómicamente hacia atrás, como en el gorila y el chimpancé, en los humanos la paleta o parte más plana del hueso ilion se fue desplazando lateralmente en algún momento de la transición del simio al hombre. Con esto último no queremos decir que descendemos de manera directa de los grandes simios tal y como los conocemos en la actualidad, sino que el ancestro que guardamos en común con ellos era más bien de características simiescas. En el chimpancé, el hueso ilion, aplanado como paleta y localizado longitudinalmente en la parte baja de la espalda, le ayuda a levantarse y poder así trepar a los árboles, ayudándose después con los brazos y las piernas. Sólo en los humanos el hueso ilion no es plano, largo y aplanado, sino que más bien es ancho, corto y posicionado lateralmente. Al adquirir esta configuración anatómica proveyó un espacio lo suficientemente apto para que ahí se insertaran los glúteos, mismos que ahora corren o se disponen a lo largo de los lados y parte trasera en lugar de localizarse solamente en la parte posterior, como sucede en el chimpancé y en el gorila. Al mismo tiempo en que

el hueso ilion rotó y se posicionó lateralmente, también se volvió más cóncavo en su parte interna, formando y limitando un espacio cónico adentro del hueso pélvico, que sirve de sustento a los intestinos, la vejiga y el aparato reproductor femenino.

Otras diferencias entre los simios y los humanos que ayudaron a estos últimos a facilitar la bipedestación fueron el acortamiento de los miembros superiores o torácicos (brazo, antebrazo y mano), así como el desplazamiento del dedo gordo del pie, de una posición separada al resto de los cuatro dedos (oposición), a una localización paralela al resto de los dedos del pie, lo cual brindó un mejor alineamiento que se traduce en un mejor soporte y estabilidad a la marcha. Otro cambio muy importante fue la disposición vertical y no horizontal de la columna vertebral con la aparición también de una serie de curvaturas (lordosis lumbar y cervical) que, además de ayudar a mantener el centro de gravedad en su sitio, mantienen en equilibrio la cabeza, a la que se articula por su parte baja o inferior (base del cráneo) y no en dirección a la parte trasera o posterior, como sucede en todos los demás primates. Cuando un paleontólogo descubre un cráneo, la posición del agujero magno, que es el orificio por donde sale la médula espinal de la cavidad craneal en dirección al agujero vertebral, es de gran ayuda para determinar si dicho espécimen corresponde a un simio o a un humano.

Para entender los orígenes de la bipedestación, debemos olvidar que tuvo que darse por una razón en especial y en un solo paso o evento, y recordemos las palabras de Darwin: “la evolución no sigue una meta o fin último”. Como muchas otras características de nuestra anatomía, los componentes y disposiciones tridimensionales de los órganos y los tejidos se van acomodando y conformando en diferentes momentos y por diferentes motivos. La bipedestación se dio cuando ya se contaba con ciertas características anatómicas, después se dieron en conjunto las nuevas habilidades. En otras palabras, la bipedestación no se desarrolló con la intención de acarrear objetos con las manos, ni con la finalidad de poder erguirse en dos pies y observar por encima de los pastizales, tampoco con la idea de introducirse en el agua sin mojarse el torso, entre muchas otras hipótesis que se han propuesto para explicar el origen de la bipedestación. Simplemente ocurrió. El caminar utilizando exclusivamente los miembros posteriores o pélvicos se dio como una variante anatómica y funcional (fenotípica), consecuencia de la variabilidad genética (genotipo) a disposición de la selección natural, y funcionó. Tal como se configuraron nuestros ojos que, aunque nos proveen de una percepción de luz bastante adecuada, son ineficientes en la oscuridad, donde los búhos con mucho nos superan, o como nuestra audición y olfato, que son buenos, pero los de los cánidos son mucho mejores; tampoco contamos con un sistema de radar ultrasónico como el que tienen los murciélagos.

No existen, pues, razones suficientes para asumir que los primeros pasos que dieron los homínidos estaban directamente relacionados con la causa de las me-

jas que se sucedieron posteriormente. La bipedestación en los homínidos se presentó y les permitió trasladarse pequeñas distancias en busca de alimentos y otras actividades para luego regresar a su comunidad; esta característica funcionó bien para mejorar su adaptación al medio ambiente y fue seleccionada de manera natural para sobrevivir durante varios millones de años. No cabe duda de que los homínidos fueron seres exitosos. Ya fuera en el bosque o en la selva tropical, los homínidos desarrollaron la bipedestación, algo que les funcionó muy bien cuando se encontraron en un medio ambiente diferente, más abierto, como el de la sabana africana que se presentó después.

Finalmente, tenemos que aclarar que los primeros homínidos no tuvieron que ser bípedos bien definidos, y que tampoco las primeras especies de primates en presentar la bipedestación tuvieron que ser forzosamente homínidos. El ejemplo de lo anterior está bien demostrado por un fósil de simio llamado *Oreopithecus*, un ser bípedo que no es precursor de los humanos. Fue estudiado por los paleontólogos Meike Köhler y Salvador Moyà-Solà, del Instituto de Paleontología de la Universidad de Barcelona, que afirmaron que el *Oreopithecus* vivió hace siete a nueve millones de años en alguna isla del mar Mediterráneo. Con la reconstrucción que realizaron del pie de esta criatura no queda duda de que era bípedo, aunque la forma del pie no se parece a ningún otro pie de simio o de humano, ni actualmente vivo ni extinto, sino a algo intermedio. Esto es porque el primer dedo del pie lo tiene marcadamente separado del resto de los dedos y tiene algo de actividad prensil; parece que se trata de un pie trípode que estaba diseñado para pararse en él, para dar soporte y para trepar. Por otro lado, la anatomía pélvica del *Oreopithecus* recuerda a aquella que caracteriza a los primeros homínidos. Así, Köhler y Moyà-Solà decidieron que este fósil correspondía a un simio bípedo. Con esto, de ninguna manera quisieron decir que se tratara del tan buscado eslabón perdido entre el simio y el homínido, sino que el *Oreopithecus* no es más que una fuerte prueba de que la genética y la selección natural experimentaron con la bipedestación aun antes de que emergieran los primeros homínidos. Estos autores argumentan también que este simio fósil es un antiguo ejemplo de lo que les pudo haber pasado a muchas criaturas modernas que evolucionaron en aislamiento al habitar en una isla, sin depredadores (así lo demuestra la ausencia de otros animales fosilizados).

El *Oreopithecus* evolucionó la bipedestación como una manera que le facilitó bajar de los árboles y pasearse en dos pies sobre tierra firme. Si la reconstrucción de los hechos por parte de Köhler y Moyà-Solà es correcta, tiene un perfecto sentido. La bipedestación es una estrategia para moverse que trabaja muy bien en un medio ambiente adecuado. No tiene nada de especial ni de “avanzado” si se compara contra el andar en cuatro patas. Esta historia también sugiere que la primera fase evolutiva de los homínidos pudo ser precisamente la bipedestación y que tomó varias formas en ambientes diversos y lugares diferentes, cada una

adaptada a cierto tipo de alimentación y conducta para trasladarse de un lugar a otro.

EL LADO OSCURO DE LA BIPEDESTACIÓN

Cualquier persona que piense que los seis o siete millones de años de evolución humana han creado un diseño óptimo, un humano anatómicamente perfecto, ciertamente está equivocada y nunca se ha visto ni contemplado detenidamente. Se puede decir que, por cada beneficio obtenido mediante la selección natural, que ha moldeado nuestro novedoso diseño corporal, tenemos que padecer ciertos efectos secundarios, producto de las innovaciones. Somos organismos relativamente novedosos con problemas y dilemas, anatómicos y conductuales. Veamos: conforme los homínidos desarrollaron la bipedestación, fueron perdiendo fuerza y potencia, por ejemplo, para trepar a los árboles. Otro ejemplo consiste en los problemas que, en un momento dado, tienen que librar las mujeres embarazadas. La selección natural escogió una forma novedosa en la pelvis de los humanos, la genética acomodó ciertos grupos musculares para que se desarrollaran nuevas funciones pero, al mismo tiempo, se redujo y se hizo más estrecho el canal del parto en relación con el tamaño del cráneo del feto maduro; así, el cráneo del bebé por nacer tiene que comprimirse y hasta torcerse levemente en relación con el eje principal del resto de su cuerpo para poder pasar a través del canal del parto al momento del nacimiento. En ocasiones llega a ser tan difícil que los obstetras se ven en la necesidad de ampliar el orificio de salida con una intervención quirúrgica llamada episiotomía, llegando a veces a utilizar un equipo de instrumentación conocido como fórceps; en otras circunstancias se presenta una complicación denominada desproporción cefalopélvica, en la que definitivamente (medido por rayos X), no es posible, porque no cabe, que la cabeza del producto a término (así se le denomina a un bebé antes de nacer) pueda pasar a través de la pelvis de la futura madre y, entonces se tiene que realizar una cirugía denominada cesárea, en la cual se incide en el abdomen de la progenitora para poder extraer al niño.

¿Por qué será que las mujeres necesitan apoyo físico y emocional durante el parto? La pregunta viene al caso debido a la observación de que la gran mayoría de las hembras de la clase de los mamíferos, y en especial de la subclase de los placentarios, tienen a su o sus crías en un ambiente solitario. Aun en las especies de animales más sociables, como los monos y otros simios, la hembra sale del grupo hacia la periferia para atender su parto sin ayuda. Diversos estudios han demostrado que en cuanto una hembra del orden de los primates empieza con contracciones uterinas para desarrollar un trabajo de parto, su respuesta conductual y emocional es dirigirse a la soledad. En contraste, la respuesta humana tí-

pica a las contracciones uterinas consiste en buscar compañía y apoyo. ¿En qué momento de nuestra larga historia evolutiva la respuesta conductual a las contracciones uterinas cambió, de buscar la soledad a buscar la compañía? La respuesta se remonta a varios millones de años atrás.

Muchas mujeres saben, por experiencia, que empujar el feto a través del canal de parto no es una tarea fácil. Es el precio que se paga por haber adquirido un cerebro grande y poseer una inteligencia superior. Se sabe que el tamaño de la abertura de la pelvis por donde debe de pasar el feto está limitado por nuestra locomoción bípeda. Pero hasta ahora comienza a comprenderse que los complejos movimientos y giros que las crías realizan al pasar por el canal del parto han representado un problema para los humanos y sus antepasados durante al menos 100 000 años. En otras palabras, el tamaño del cerebro de los humanos ha crecido tanto como lo permite el desarrollo de la pelvis femenina sin que llegue a interferir con el mecanismo de la bipedestación. La anatomía y no sólo nuestra naturaleza social han conducido a las madres humanas a pedir ayuda durante el parto. En efecto, la costumbre de buscar asistencia quizá apareció con los primeros miembros de nuestro género, *Homo*, hace dos millones de años, cuando el cerebro incrementó notablemente su tamaño, y posiblemente se remonte a unos siete millones de años de antigüedad, cuando nuestros primeros antepasados, *Australopithecus*, iniciaron la marcha bípeda.

Nuestro pariente más cercano es el chimpancé, con el que compartimos 98% de la información genética. En la actualidad, la cabeza de una cría de chimpancé representa aproximadamente 98% del diámetro del canal de parto de la madre. Esta situación es similar a la que presentan los humanos. A pesar de este paso tan estrecho, el nacimiento de las crías de chimpancé procede con mayor simplicidad que en el caso humano y, a diferencia de la forma retorcida del canal del parto humano, el de las chimpancés mantiene la misma forma desde la entrada hasta la salida. En las chimpancés, el diámetro mayor del canal se halla orientado en sentido anteroposterior y el feto a término de una chimpancé penetra en el canal introduciendo la cabeza, con la parte más ancha y posterior de su cráneo apoyada en la parte más espaciosa de la pelvis, cerca del cóccix. Esto significa que la cría de chimpancé sale del canal del parto con la cara mirando hacia delante; en otras palabras, con la cara en la misma dirección que la madre: frente a frente. El nacer de cara a la madre ofrece grandes ventajas. Las chimpancés dan a luz sentadas sobre las patas posteriores o apoyándose en las cuatro patas. Cuando la cría está saliendo del canal de parto, la madre puede agacharse y guiar su salida y, ya que está viendo de frente a su cría, puede aproximarla a su pecho siguiendo la curvatura natural (en flexión) de la columna vertebral e incluso puede limpiarle las secreciones de la boca y la nariz para que pueda respirar. En cambio, las modificaciones evolutivas de la pelvis humana imposibilitan a la parturienta para poder asistir a sus crías cuando están naciendo.

Para entender el proceso del parto desde el punto de vista de la madre, pensemos en una mujer a punto de dar a luz. El feto a término se encuentra en la mayoría de las ocasiones cabeza abajo, y cuando su cabeza entra en el canal de parto está mirando a un lado. Sin embargo, a mitad del canal debe girar la cara para mirar hacia atrás, apoyando el occipucio en los huesos del pubis. En este momento, los hombros están orientados de un lado a otro. Cuando el recién nacido es expulsado continúa con la cara orientada hacia atrás, pero girando ligeramente la cabeza hacia un lado. Esta rotación ayuda a girar los hombros para que puedan acomodarse al espacio que hay entre el pubis y el cóccix. Así pues, el trayecto que el feto debe recorrer a través de un canal de forma variable (y no homogénea como en el chimpancé) hace que el parto humano sea difícil y peligroso para muchas de las madres e hijos.

Si las crías humanas salieran de cara, el parto sería más sencillo para la madre. En cambio, las modificaciones evolutivas de la pelvis humana que nos permiten caminar de forma bípeda obligan a la mayoría de las crías humanas a salir con la nuca apoyada en el pubis y mirando (o de cara) hacia la espalda de la madre. Por este motivo, es muy difícil que la parturienta se siente, acueste o agache para asistir a sus crías cuando están naciendo.

Esta situación hace prácticamente imposible que la madre pueda ayudar a respirar a los recién nacidos, quitar el cordón umbilical del cuello e incluso acercar al bebé al pecho. Si la madre tratase de acelerar el nacimiento sujetando al recién nacido y guiando su salida, se correría el riesgo de doblar la espalda de la cría en dirección contraria a la curva natural de la columna vertebral. Colocar la espalda de un recién nacido en ese ángulo podría provocar daños en su columna vertebral, sus nervios y sus músculos.

En los humanos contemporáneos, la solución a estas dificultades es la búsqueda de asistencia durante el parto. La asistencia ayuda a la madre a realizar todo aquello que las chimpancés hacen por sí mismas. Las ventajas que ofrecen hasta las formas más simples de ayuda durante el parto han reducido la mortalidad de las madres y de las crías a lo largo de la historia.

Los antropólogos que han estudiado el nacimiento en culturas de todo el mundo señalan que, en los humanos, el parto rara vez es fácil y pocas veces se produce sin asistencia. El parto asistido es una costumbre universal. Teniendo esto en cuenta, se piensa que la asistencia al dar a luz no es exclusiva de los humanos contemporáneos, sino que hunde sus raíces en nuestros antepasados. De acuerdo con investigaciones recientes, la asistencia durante el parto pudo haber surgido hace unos siete millones de años, cuando la aparición de la bipedestación en el *Australopithecus* redujo el tamaño y cambió la forma de la pelvis y del canal de parto; cinco millones de años después, o sea hace dos millones de años, el problema se agravó cuando el tamaño del cerebro se incrementó notablemente para dar origen al género *Homo*. Con el incremento en el volumen del cerebro se adquirió

también el sentido de responsabilidad y la conciencia para buscar ayuda en el momento del parto y asegurar la supervivencia de las crías.

Así pues, la bipedestación no es perfecta. Otros defectos y molestias que confiere la bipedestación son los dolores de espalda que se presentan por el debilitamiento y formación de hernias en los discos intervertebrales, mismos que se encuentran formados por tejido fibroso y cartilaginoso que con el tiempo, y dependiendo del peso y actividad del individuo, pueden dañarse. También las hernias inguinales, los dolores de cadera y de rodillas, y las varices (insuficiencia venosa) son manifestaciones de una postura erecta.

TAMAÑO CEREBRAL

Ya antes mencionamos que el género *Australopithecus* es un antecesor del género *Homo*, pero tenemos que recalcar que es un antecesor en cuanto a tiempo de aparición, según los registros fósiles, lo cual no quiere decir que descendamos en línea directa de él. Algunas hipótesis recientes indican que más bien fueron primos que compartieron con nosotros un ancestro común hasta ahora desconocido, por supuesto, un primate africano que a la fecha no se ha identificado. El *Australopithecus* se originó hace cuatro millones de años y el *Homo* hace 2.2 millones de años. Vamos a establecer algunas características anatómicas analizadas en los fósiles que nos ayudarán a establecer las diferencias entre ambos, así como las relaciones que tienen con otros simios. La bipedestación es una característica clásica del *Australopithecus* y del *Homo*, pero no del simio; el tamaño del cráneo del simio es pequeño, mediano el del *Australopithecus* y grande el del *Homo*; el oído interno, sitio importante para el sentido del equilibrio, especialmente si pensamos en la bipedestación, es muy similar en el simio y en el *Australopithecus* pero diferente en el *Homo*, en donde el laberinto posterior (oído interno relacionado con el equilibrio) es más grande que el del simio y que el del *Australopithecus*. En otras palabras, la bipedestación hace iguales al *Australopithecus* y al *Homo*, pero el tamaño del cerebro y la configuración del sistema del equilibrio en el oído interno los hace diferentes, lo cual apoya la hipótesis de que, si bien comparten un ancestro común, el *Homo* no es descendiente directo del *Australopithecus*. Incluso puede ser que el *Homo* sea otra proposición genética reciente con gran adaptabilidad al medio ambiente, que en algún momento de la prehistoria coexistió con el *Australopithecus*.

La característica principal del género *Homo* es el tamaño del cráneo en relación con el resto del cuerpo, lo cual implica que tiene un cerebro más grande con una corteza cerebral, o mejor dicho una neocorteza cerebral, más desarrollada. Con respecto a la neocorteza cerebral, hay que aclarar que el cerebro de cada ver-

tebrado tiene tres zonas o partes: la primera es el cerebro posterior, la segunda es el cerebro medio y la tercera es el cerebro anterior. El cerebro posterior controla las funciones más básicas, o aquellas necesarias para mantenernos vivos, como por ejemplo la regulación de la temperatura corporal, la tensión arterial y la frecuencia respiratoria. En el cerebro medio se llevan a cabo las funciones “toscas”, reacciones viscerales conductuales, por ejemplo, el “actuar sin pensar”; también aquí se refugian nuestros miedos ancestrales y las respuestas conductuales automáticas que manifestamos cuando enfrentamos situaciones de estrés, y es un sitio importante en cuanto al temperamento se refiere. El cerebro anterior es complejo y coordina las conductas complicadas y los procesos mentales superiores. El cerebro anterior es el que más difiere entre los mamíferos y los demás vertebrados, mientras que el cerebro posterior es el que menos difiere; sin embargo, todos los vertebrados tienen las tres regiones cerebrales. También tienen una neocorteza cerebral, la cual es una subdivisión del cerebro anterior, así que, después de todo, no es “tan nueva” y tampoco es exclusiva de los mamíferos.

Es importante reconocer el hecho de que un área cerebral determinada puede variar enormemente de tamaño entre especies diferentes y permitir que algunos animales hagan cosas que otros no. Por ejemplo, la rana cuenta con una región en el cerebro medio muy desarrollada que se denomina *tectum*, lo cual le permite definir el curso que seguirá un insecto volador para poder anticipar el trayecto del mismo y poder atraparlo con la lengua. ¿Cuántos intentos fallidos realizamos los seres humanos antes de poder atrapar un mosquito? Diferentes especies animales han sido sometidas a diferentes presiones evolutivas, por lo que sus cerebros reflejan historias únicas. La neocorteza cerebral de los mamíferos está mucho más desarrollada que su equivalente en otras especies y, aun dentro de la misma clase de los mamíferos, su tamaño puede variar, siendo más grande y especializada en los primates que, por ejemplo, en los roedores; y en el *Homo* se encuentra mucho más desarrollada que en el chimpancé.

Se ha establecido que el dueño de un cráneo con una capacidad contenedora de más de 600 cm³ se considera parte del género *Homo*. El homínido conocido como *Australopithecus afarensis* cuenta con 385 cm³ y el *Australopithecus africanus* presenta 415 cm³, mientras que el *Homo habilis*, quien es el primer representante de nuestro género, tiene 600 cm³ de capacidad craneal; el *Homo erectus* tiene una capacidad de 900 cm³ y el *Homo sapiens* de 1355 cm³, que en este último caso equivale a cerca de 100 000 millones de neuronas (figura 4-3). ¿Cuál ha sido el límite para el crecimiento del cráneo? Eso lo ha determinado el grado de desarrollo de la pelvis femenina, pues el cráneo puede ser tan grande como sea posible, siempre que logre pasar por el canal de parto en el hueso pélvico de la mujer, sin que llegue a interferir con la mecánica de la bipedestación.

Entonces, su tamaño cerebral es característico del *Homo*. Analicemos otras comparaciones: si se extiende la corteza cerebral de una rata veremos que mide

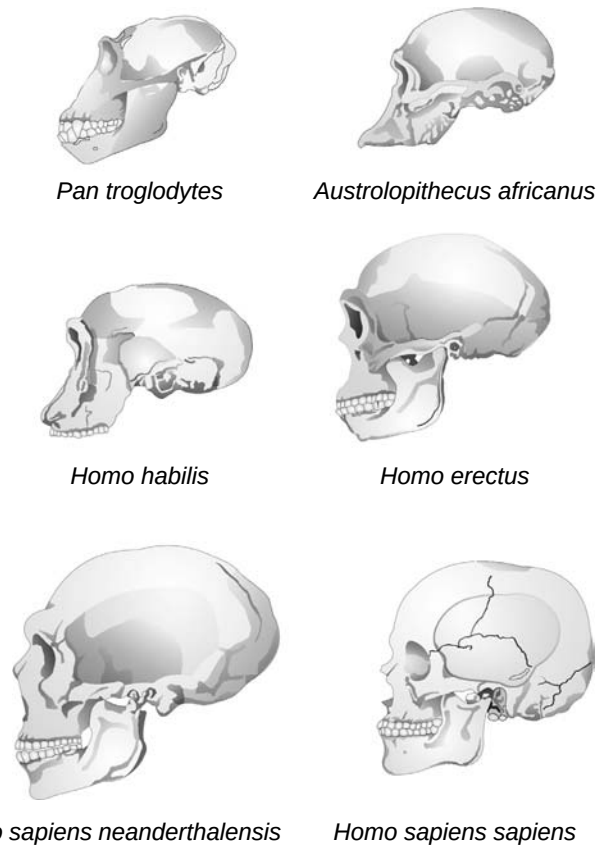


Figura 4-3. Perfiles de los cráneos más representativos que hacen evidente el incremento en el tamaño cerebral.

4 cm²; haciendo lo mismo con la corteza cerebral de un chimpancé encontraremos que mide 500 cm²; la corteza cerebral de un homínido mide 700 cm² y en la corteza cerebral del *Homo sapiens* observaremos 2 200 cm². Podríamos decir ahora que la rata tiene un cerebro pequeño porque es un animal pequeño, por lo tanto tenemos que agregar un factor de corrección para que la comparación sea proporcional al tamaño corporal y entonces veremos que, si la rata tuviera el tamaño de un humano adulto, su corteza cerebral contaría apenas con 180 cm². ¿Qué es lo que determina el tamaño de un cerebro? La respuesta es simple: el número de células que lo integran, que, como mencionamos anteriormente, en el caso del *Homo sapiens* son alrededor de 100 000 millones. Dicho número iguala el número de estrellas con las que cuenta la Vía Láctea. Cuantas más neuronas tenga un cerebro, más grande será. Nuestro cerebro tiene un gran número de neu-

ronas, resultado de una propuesta genética que se dio alrededor de hace 100 000 años. Los seres humanos, al igual que otras especies animales, tenemos el gen ASPM1, sólo que nuestra versión cuenta con el mayor número de repeticiones en una secuencia de nucleótidos. El gen ASPM1 regula el número de veces en que se dividen las células madre neuronales en las vesículas del cerebro embrionario, de manera que, mientras más tiempo se exprese dicho gen (determinado por las características de la información genética en la secuencia de nucleótidos), más células neuronales se desarrollarán y por lo tanto más grande será el cerebro. Dicha mutación (genotipo) tuvo que hacerse cada vez más frecuente en un pequeño número de individuos que se encontraban aislados de otros homínidos, transmitiéndose de manera autosómica recesiva (como lo hacen habitualmente este tipo de propuestas genéticas), hasta que llegó a ser tan común en los miembros de dicha población que se empezó a expresar (fenotipo); podemos concluir, entonces, que todos los seres humanos descendemos de esta pequeña población en aislamiento que se encontraba en alguna región de África.

Un mayor número de neuronas lleva consigo un mayor número de conexiones entre ellas, también llamadas sinapsis, lo cual trae como resultado una corteza cerebral más desarrollada, al grado de que para poderla saturar de conocimientos de una manera adecuada las crías del *Homo* deben permanecer con su familia durante más tiempo que cualquier otra especie. Se necesitan varios años para que la corteza cerebral de un ser humano adquiera el entendimiento, la sabiduría, la experiencia y la inteligencia necesarias para desarrollarse y sublevarse e independizarse de sus progenitores. Por esta razón, el desarrollo físico de las crías y la aparición de la pubertad son muy lentos y se llevan a cabo después de varios años. Así pues, el beneficio que le ofrece al género *Homo* permanecer varios años con sus padres, a diferencia de todos los demás mamíferos y primates que desde la niñez dan un salto abrupto a la madurez, tiene que ver con el grado de aprendizaje que los humanos jóvenes deben adquirir para poder asimilar las reglas y los procedimientos de su cultura, que es muy compleja. Está comprobado que los niños aprenden mejor de los adultos porque existe una diferencia significativa en el tamaño del cuerpo de ambos, así se establece mejor una relación maestro-alumno. Cuando termina el periodo de aprendizaje, el cuerpo “siente que ya transcurrió el tiempo suficiente como para saber lo que debe saber”, y viene el estirón de la adolescencia. Solo que hoy tenemos que aprender muchas cosas más que hace 100 000 años, de manera que ahora la adolescencia llega antes de saber todo lo que tenemos que saber.

Un cerebro grande, con miles de millones de neuronas que integran billones de billones de conexiones entre ellas, permitió que el *Homo sapiens* explotara al máximo otras características anatómicas, en especial su habilidad manual, y empezara a desarrollar herramientas sofisticadas; permitió también que desarrollara un lenguaje complejo, primero gesticulado y después articulado, y que se volviera

ra altamente social. Para alimentar un cerebro tan grande que requiere enormes cantidades de energía, el *Homo sapiens* se volvió menos estricto con su dieta e inició la ingesta de grandes cantidades de proteínas de cualquier origen (vegetal y animal), y empezó a convertirse en recolector y cazador.

Pero en qué gran predicamento se encontraron los científicos cuando se dieron cuenta de que la capacidad del cráneo observada en el hombre de Neanderthal rebasaba a la del *Homo sapiens* en la nada despreciable cifra de por lo menos 150 cm³. Así es, el cráneo del *Homo neanderthalensis* tiene una capacidad de 1 512 cm³ y el del *Homo sapiens* de 1 355 cm³. Veamos entonces qué es eso, algo más importante que el tamaño cerebral, que nos permitió rebasar al hombre de Neanderthal. La función que desempeñan algunas áreas cerebrales en los mamíferos y en los primates, incluidos los seres humanos, han sido bien estudiadas: en el lóbulo frontal se trabajan los pensamientos, la planeación y las reacciones a las emociones (el pensar antes de actuar); en el lóbulo parietal se localizan las sensaciones al dolor, presión, tacto, temperatura y sabor, y se ocupa de las matemáticas, la lógica y el pensamiento abstracto; el lóbulo temporal se dedica a manejar lo relacionado con la audición, la memoria y ciertas emociones; el lóbulo occipital se aplica principalmente en el procesamiento de la información visual; y el sistema límbico elabora la conducta emocional y sexual, y ayuda al procesamiento de la memoria. Pero ninguno funciona de manera independiente. Un invento clave en la evolución de los mamíferos fue la neocorteza cerebral, ya que no sólo le permitió al cerebro un potencial mayor para el procesamiento de datos, sino que abrió el camino a una nueva especialización evolutiva: la aparición de subsistemas funcionales particulares. Así es, los cambios en el tamaño cerebral de los mamíferos no corresponden simplemente al incremento en la masa encefálica, sino también al desarrollo de un patrón “en mosaico” donde ciertas partes del cerebro actúan en concierto con otras; se desarrollan circuitos de interacción entre varias partes del cerebro, y la función tan importante de coordinar y armonizar toda esa información le corresponde a la corteza cerebral.

La clave, y lo más importante de nuestra evolución cerebral, se refiere a la anatomía microscópica de nuestro cerebro, la cual incluye las interconexiones entre las diferentes regiones corticales, la arquitectura de los circuitos locales (su “cableado”) y el acomodo o arreglo de las neuronas en la corteza cerebral. Por ejemplo, las dimensiones en que se dan forma las columnas verticales de las neuronas de una región del lóbulo temporal, conocida como *planum temporale* (localizado en el área de Wernicke y que se ve implicada en la comunicación gesticular y en el lenguaje con la palabra articulada, así como en el talento musical), difieren de manera importante entre el ser humano y el chimpancé. El arreglo o acomodo de las neuronas que se da como resultado del proceso evolutivo y que dispone o determina el número y conectividad entre las neuronas que se formaron durante el desarrollo en áreas especializadas de los cerebros de nuestras ancestros ha sido

el patrón más claro y específico para dar origen a nuestras capacidades, que seguramente difirieron de las del hombre de Neanderthal. Podemos concluir entonces que nuestras diferencias cerebrales con el *H. neanderthalensis* no eran sólo de cantidad, sino también de calidad.

Se ha identificado otro gen involucrado de manera importante en la evolución hacia los humanos, el cual se relaciona directamente con las características anatómicas de los músculos mandibulares. Resulta que una importante característica que nos hace diferentes al resto de los primates consiste en el reducido tamaño de nuestros músculos de la masticación, en especial el músculo temporal. Veamos, existe un gen en los seres humanos que codifica una proteína denominada miosina de cadena pesada 16 o MYH16 (del inglés *myosin heavy chain 16*). Este gen presenta, en los humanos, una mutación que altera la secuencia proteica. La miosina de cadena pesada desempeña una función crucial en la conformación de las fibras contenidas en los músculos, ya que generan una gran fuerza cuando el músculo se contrae. Cuando estas proteínas (miosina de cadena pesada) están alteradas o ausentes, entonces las fibras musculares y los músculos se encuentran reducidos de tamaño. La MYH16 es una miosina especializada que se expresa sólo en un subgrupo de músculos. En el macaco, la MYH16 se produce solamente en el músculo temporal y en otro muy cercano a él, pero no en otros músculos. El gen de la MYH16 se expresa también en el músculo temporal de los humanos, pero la mutación de este gen en el *Homo sapiens* inactiva la función de la proteína, lo que trae como resultado que el músculo temporal de los humanos sea de tan sólo una octava parte del tamaño que tiene el de los macacos (figura 4-4). Esta prueba genotípica y fenotípica indica que la desactivación de la proteína MYH16 está asociada de alguna manera con la reducción del tamaño del músculo tempo-

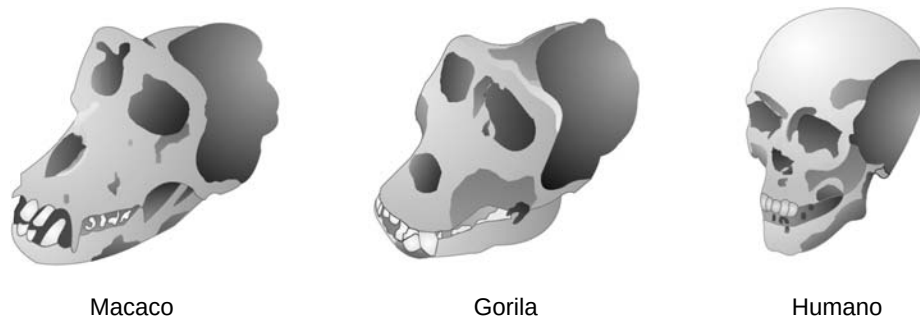


Figura 4-4. Las diferencias genotípicas relacionadas a la proteína MYH16 traen como resultado notables diferencias fenotípicas en cuanto al tamaño del músculo temporal (representado en el área oscura), siendo grande en el macaco y en el gorila y pequeño en el humano.

ral en la evolución del hombre. El resto de los primates expresa una proteína MYH16 completa y, por ende sus músculos temporales son mucho mayores.

Lo anterior tiene la siguiente implicación: que la anatomía muscular ejerce una influencia importante en el crecimiento del hueso (esqueleto); los estudios experimentales han demostrado que el crecimiento en los músculos de la mandíbula tiene un impacto significativo en el tamaño y la forma del esqueleto facial. La reducción en la musculatura mandibular y de la fuerza impuesta a la mandíbula reduce el estrés al cual se someten los huesos de la cara y el cráneo. Lo anterior quizá favoreció que la bóveda craneal se tornara más grande y delgada, de manera que la expansión o crecimiento cerebral se vio favorecida también, hasta cierto punto, por los cambios en la musculatura mandibular. Sin embargo, esto no se puede considerar como un detonante crítico ni único para el crecimiento cerebral.

EL GEN DEL LENGUAJE

En el Instituto Max Planck se descubrió recientemente un gen ligado al lenguaje. Resulta que se observó una familia cuyos miembros tuvieron graves dificultades para hablar, y sus problemas para articular las palabras no eran secundarios a alteraciones musculares ni esqueléticas de la cara o del cuello y tampoco a diferencias auditivas, sino a algunas alteraciones en los circuitos neuronales que son utilizados para que se pueda desarrollar el lenguaje. Estos hallazgos fueron corroborados mediante técnicas de resonancia magnética nuclear y de tomografía computarizada con emisión de positrones, descartando la posibilidad de cualquier otra alteración anatómica en el sistema nervioso central o en el aparato locomotor utilizado para la articulación de los fonemas.

En dicha familia se descubrió una mutación, identificada como FOXP2 y localizada en el brazo corto (q31) del cromosoma número 7. Las personas que nacen con la mutación FOXP2 presentan dificultades para hablar. Ante dicho hallazgo, se compararon las versiones del mismo gen pero en otras especies. Los resultados, como veremos más adelante, fueron reveladores. La proteína FOXP2 (codificada por el mismo gen) es un factor de transcripción, una proteína del “equipo de herramientas genético” que se une a cierta secuencia de DNA y regula, a su vez, la expresión de muchos otros genes. En la mutación de esta familia se observa un cambio en un aminoácido de la proteína FOXP2, el cual bloquea su función. En otras palabras, se codifica para una proteína disfuncional.

Resultó ser que la proteína FOXP2 no es única de los humanos, el gen que la codifica ha sido identificado en una gran cantidad de primates, roedores y hasta en las aves. En su análisis secuencial se ha observado que difiere sólo en cuatro posiciones (de un total de 716) de la del ratón, en tres posiciones de la del orangu-

tán y en dos posiciones de la del gorila y la del chimpancé; todo esto indica que es muy importante su presencia en los animales, ya que se ha conservado durante mucho tiempo y ha sido seleccionada naturalmente a través de la evolución. En algún momento, hace aproximadamente 100 000 o 200 000 años, cuando mucho, durante la evolución de nuestra especie, cierta mutación en el gen FOXP2 nos favoreció enormemente y se difundió a través de toda la descendencia del *Homo sapiens*.

La clave consiste en lo siguiente: las regiones del DNA que no codifican, sino que funcionan como interruptores del gen FOXP2, se encargan de realizar una “sintonía fina” en la expresión del mismo gen, y éste a su vez participa de manera importante en la formación de redes neuronales (interconexiones neuronales) durante el desarrollo embrionario; así se sabe que el gen FOXP2 se expresa en varias regiones cerebrales durante el desarrollo del sistema nervioso central y participa activamente en la manera cómo se van desarrollando y conectando unas zonas cerebrales con otras. Hay que recordar que es muy difícil cambiar una proteína del desarrollo embrionario de manera que sólo se vea afectada una función en la expresión genética sin afectar a muchas otras más; por lo tanto, los cambios que se llevaron a cabo gracias a la evolución en los interruptores que controlan al gen FOXP2 permitieron y dieron lugar a ciertos cambios, en pequeña escala, en regiones muy individuales durante el desarrollo del cerebro humano. Uno de estos pequeños cambios en los interruptores del gen FOXP2 favoreció a los seres humanos, pues permitió que ciertas zonas cerebrales se interconectarán en circuitos interrelacionados (anatomía microscópica) y que resultara felizmente en la posibilidad de manifestar un lenguaje articulado y complejo, que nos permitiera llevar a cabo una comunicación versátil.

Otro detalle anatómico, pero en este caso macroscópico, favorece la articulación de los fonemas en los humanos: la posición de la laringe (órgano de la fonación) en el cuello. La laringe de los humanos se localiza en una posición más baja en el cuello, en relación con el lugar que ocupa la laringe en el cuello del chimpancé (figura 4–5). Lo anterior permite que los sonidos emitidos por las cuerdas vocales (fonemas) sean articulados mediante la interacción de otros componentes anatómicos (labios, dientes, lengua y paladar) para expresar las palabras. La posición alta de la laringe del chimpancé le impide articular palabras, pero obtiene el beneficio de poder respirar y deglutir al mismo tiempo, igual que los humanos recién nacidos cuando son amamantados. Por esta y otras razones, los niños no pueden hablar (articular palabras) sino hasta que tienen uno o dos años, cuando la posición de la laringe baja al cuello; desafortunadamente, también es cuando podemos ahogarnos con los alimentos.

La bipedestación, el crecimiento en el tamaño de nuestros cerebros, la habilidad manual y el lenguaje complejo y articulado son características que fueron apareciendo poco a poco, a lo largo de siete millones de años, durante la confor-

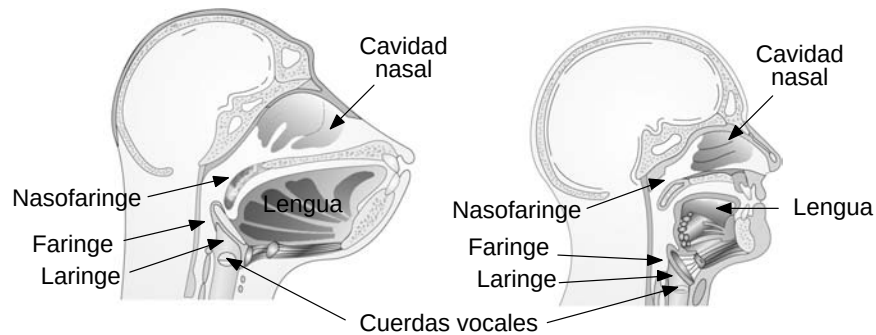


Figura 4-5. Posición de la laringe en el cuello del chimpancé (alta) y en el cuello del humano (baja).

mación anatómica y funcional de los homínidos que vivieron en África. Somos como nos conocemos desde hace 100 000 años y muchos otros detalles anatómicos fueron incorporándose para darnos forma y función, y todos han sido propuestas genéticas dispuestas a la selección natural, tales como la longitud de los miembros torácicos y pélvicos en relación con el tamaño del tronco, la forma del torso, el pulgar largo y el resto de los dedos relativamente cortos, los dientes caninos (colmillos) pequeños, las estructuras masticadoras reducidas, el periodo de gestación prolongado, el vello corporal reducido, el mentón, la columna vertebral en “S” y una topografía cerebral única. ¿Qué otras innovaciones podrán aparecer en un futuro? Es poco probable que se dé un fenómeno evolutivo tan marcado como el observado en nuestros ancestros. La razón es la siguiente: para que aparezcan rasgos anatómicos y funcionales es necesario que la mutación o mutaciones que las originan se vayan acumulando en un grupo poblacional reducido y aislado, situación poco probable en la actualidad, dado que prácticamente no existe en el mundo una población de humanos que reúna dicha característica. Todos, en un momento dado, podemos procrear con individuos del sexo opuesto en cualquier parte de la Tierra.

LA DIFERENCIA DE 2%

Recordemos que nuestro DNA se encuentra conformado por sólo cuatro tipos de moléculas diferentes denominadas nucleótidos: adenina (A), citocina (C), guanina (G) y timina (T); y, que el código genético para cada especie se encuentra constituido por billones de estas letras ordenadas en una secuencia específica. Si, cuando el DNA está siendo copiado o reproducido en un óvulo o en un espermatozoide, ocurre algún error en la secuencia de nucleótidos, entonces tenemos una muta-

ción. Si la mutación persiste de generación en generación, da lugar a una diferencia en el DNA, una de muchas distinciones genéticas que separa a una especie (chimpancés) de otra (bonobos) y de otra (humanos). Como vimos, en los genomas se encuentran o se ven involucrados billones de nucleótidos, así que una pequeña diferencia de 2% se traduce en decenas de millones de diferencias en la secuencia de nucleótidos ACGT. Tomando en cuenta que tanto el ser humano como el chimpancé cuentan con alrededor de entre 20 000 y 30 000 genes puede ser que exista una diferencia de nucleótidos por cada gen. Sin embargo, tan importante es el cómo se dan los cambios en la secuencia de nucleótidos como los lugares en el genoma en los que se presentan. Hay que tener en mente que, para que dichos cambios persistan de generación en generación, deben ofrecer ciertas ventajas evolutivas, de manera que cuando uno examina la diferencia de 2% entre los genomas de los humanos y los chimpancés, resulta que los genes en cuestión adquieren una marcada importancia desde el punto de vista de la evolución de cada especie. Por ejemplo, los chimpancés cuentan con un mayor número de genes relacionados con el sentido del olfato, por lo que tienen un sentido del olfato más agudo y desarrollado que el nuestro. Nosotros hemos sido las víctimas por haberlos perdido durante el proceso evolutivo. Otro ejemplo con respecto a la diferencia de 2% tiene que ver con un buen número de genes relacionados con el sistema inmunitario y la vulnerabilidad para padecer enfermedades infectocontagiosas y parasitarias: los chimpancés resisten el paludismo, pero nosotros no; por otro lado, los humanos lidiamos mejor contra la tuberculosis, mientras que los chimpancés carecen de esta habilidad inmunitaria. Otra importante fracción de esa diferencia genómica de 2% tiene que ver con la reproducción sexual y el conjunto de diferencias anatómicas responsables de la divergencia de las especies, impidiendo la atracción sexual entre ambas.

Las diferencias en el cerebro de cada uno tiene que ver con el gen ASPM1, analizado previamente en cuanto al tamaño del cerebro se refiere. Si examinamos la neurona de un cerebro humano bajo el microscopio, veremos que no es diferente de la neurona de un chimpancé, ni de la de un ratón, una rana o una babosa de mar. Todas las neuronas se ven iguales: en un extremo tienen el cuerpo neuronal con sus extensiones, llamadas dendritas, y en el otro el cable o axón que termina en los botones sinápticos (de sinapsis).

Para sorpresa de muchos, resulta que también son iguales en lo que corresponde a las funciones básicas y fundamentales. Todas las neuronas de los animales llevan a cabo sus funciones con los mismos mecanismos biológicos básicos: canales y bombas de membranas para desplazar el sodio, el potasio, el cloro y el calcio de adentro hacia fuera de las células y viceversa; y disparos de ondas de excitación eléctrica a lo largo de sus axones, conocidas como potenciales de acción; y más aún, todo este funcionamiento se complementa con sustancias químicas muy parecidas, conocidas como neurotransmisores (serotonina, dopamina,

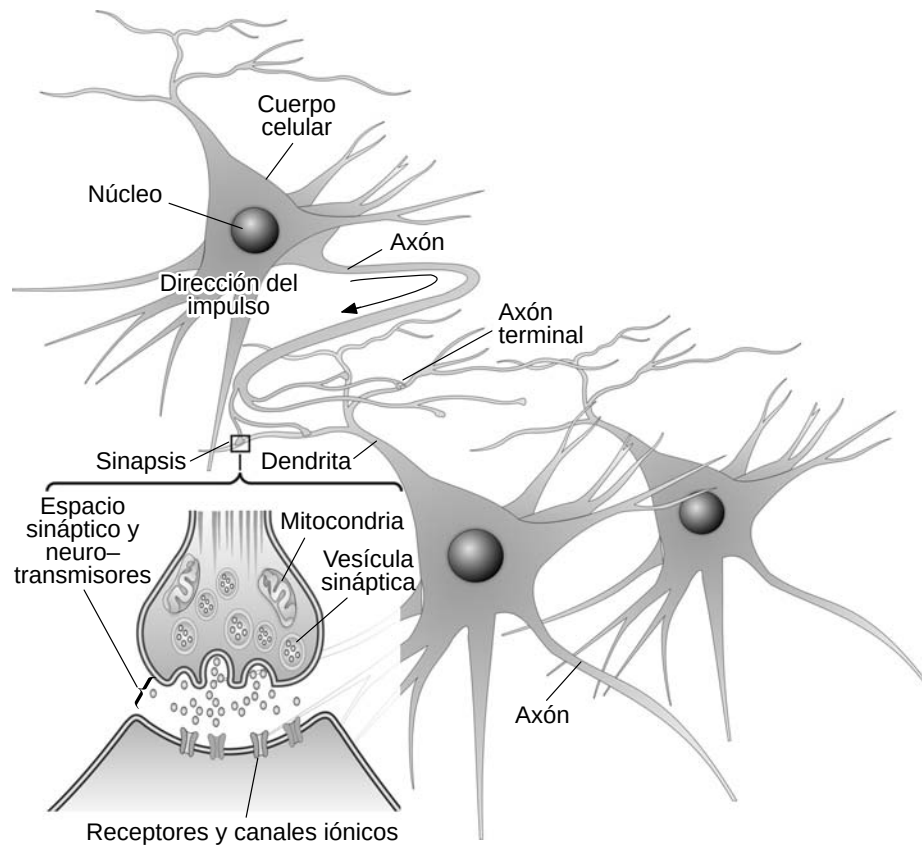


Figura 4-6. Redes neuronales. La configuración microanatómica de las redes neuronales es una de las principales características cerebrales del *Homo sapiens*.

glutamato y otros), y todos los animales cuentan en su cerebro con la misma materia prima para ser contruidos (figura 4-6).

Entonces, ¿en qué consiste la diferencia? La diferencia básica y fundamental estriba en el número de neuronas y en la manera como se conectan e interrelacionan entre ellas. El cerebro humano cuenta con 100 millones de veces más del número de neuronas de una babosa de mar. Recordemos también que en algún momento del desarrollo embrionario, ya sea el correspondiente a un ser humano, un chimpancé, una rata, una rana o una babosa de mar, todo debe iniciar a partir de una sola célula cuyo destino será multiplicarse varias veces hasta formar un cerebro. Primero dará origen a dos células, luego a cuatro, más tarde a ocho y así sucesivamente. Después de una docena de multiplicaciones se completa el cerebro de una babosa de mar y después de veinticinco veces más se completa un cerebro

humano. Si la multiplicación se detiene dos veces antes, obtenemos como resultado un cerebro de la tercera parte del cerebro humano, o sea el cerebro de un chimpancé. Son relativamente pocos los genes que regulan el número de veces en los que se lleva a cabo la división celular en el sistema nervioso antes de que termine su formación. Y son precisamente algunos de esos genes los involucrados en el desarrollo neuronal, los que aparecen en la lista de las diferencias entre los genomas del ser humano y del chimpancé.

En otras palabras, para llegar a ser humanos, no tuvimos que evolucionar genes únicos que codificaran para algunos tipos de neuronas nuevas y diferentes, o bien para otros neurotransmisores en alguna zona específica del cerebro, sino que nuestro potencial cerebral, como especie, se debe a nuestro exponencialmente mayor número de neuronas y a la interacción entre ellas. Nuestra distinción cualitativa neurológica emerge de un mayor número de células. Y los genes tienen mucho que ver tanto del punto de vista cuantitativo como del cualitativo.

Analícemos un poco más a fondo a nuestros parientes más cercanos para entender otros aspectos de nosotros mismos y de nuestras similitudes y diferencias con ellos. Uno es el chimpancé moderno o *Pan troglodytes*. Su nombre deriva de *Pan*, dios griego de la selva con torso de humano pero con piernas, orejas y cuernos de chivo, dios de los pastores y de los rebaños que danzaba y hacía danzar tocando su flauta, de *Pan*; y, *troglodytes*, que quiere decir “hombre de las cavernas” o “cavernícola”. El otro es el bonobo o *Pan paniscus*, diminutivo de *Pan*. Los seres humanos contamos con este par de primates con los cuales estamos íntimamente relacionados, tanto desde el punto de vista del genotipo como del fenotipo. Sin embargo, ciertas otras diferencias entre ellos son contundentes, como el día y la noche. El chimpancé es un animal gruñón, de carácter ambicioso, que se maneja con base en el enojo. El bonobo es más liberal y bonachón. El chimpancé presenta una conducta jerárquica y asesina, pues es violento. Los bonobos son pacifistas por naturaleza y practican apetitos sexuales muy saludables. Es la empatía, la que permite a los bonobos el poder llegar a entender las necesidades de otro bonobo, así como sus deseos, y no sólo se limitan a entenderlos sino que se preocupan y se ayudan para satisfacerlos.

La simpatía y la crueldad descansan en la habilidad de imaginar cómo es que la conducta de uno afecta al prójimo. Es decir, los animales que cuentan con un cerebro muy pequeño, como los tiburones, que hieren a otros, lo hacen sin la más mínima idea de lo que su víctima pueda llegar a sentir. Por otro lado, el cerebro de los simios, quienes cuentan con una tercera parte del tamaño cerebral del cerebro humano, los hace suficientemente complejos para comprender, hasta cierto punto, la crueldad. Así como los niños lanzan piedras contra los patos, los simios, algunas veces les provocan dolor a sus congéneres, simplemente por diversión. El deseo de poder y la brutalidad del chimpancé contrastan con el amor pacifista y erótico del bonobo. Nuestra naturaleza humana consiste en un difícil matrimo-

nio entre ambos. Nuestro lado oscuro es, obviamente, doloroso: se estima que alrededor de 160 millones de personas perdieron la vida durante el transcurso del siglo XX a consecuencia de las guerras, el genocidio y la opresión política; todos, actos debidos a la capacidad humana de llevar a cabo acciones brutales. Quizá seamos capaces de actuar salvajemente debido a nuestra capacidad y habilidad de imaginar lo que las otras personas puedan llegar a sentir. Por otro lado, cuando la misma habilidad se combina con una actitud positiva, nos lleva a realizar esfuerzos sobrehumanos para rescatar a completos extraños (como en el sismo de México del 19 de septiembre de 1985 o los atentados terroristas de Nueva York el 11 de septiembre de 2001), para llorar cuando alguien nos cuenta una triste historia o para juntarnos con otros vecinos y buscar a un niño perdido.

Con ambos aspectos, crueldad y compasión, podemos imaginar que tenemos dos caras que dirigen la mirada en direcciones opuestas. Lo anterior puede llegar a confundirnos tanto que lleguemos a calificarnos como “el orgullo de la creación”, o nos ubiquemos como unos verdaderos y auténticos villanos.

¿Por qué no aceptar que somos ambos? Estos dos aspectos con los que, sin lugar a dudas, cuenta nuestra especie, corresponden a aquellos mencionados para nuestros parientes vivos más cercanos. Como el chimpancé, mostramos el lado violento de la naturaleza humana, pero por otro lado somos criaturas intensamente sociales, que confiamos unos en otros y que necesitamos interactuar con otras personas para tener una vida sana y feliz. Se ha demostrado una y otra vez que nuestro cuerpo y nuestra mente no están diseñados para la vida solitaria. En ausencia de compañía nos mostramos deprimidos y desesperados, además de que nuestra salud se deteriora. Por ejemplo, en un estudio médico reciente, llevado a cabo con voluntarios sanos, se demostró que al exponerlos al virus del resfriado común (*Rhinovirus*), enfermaron más fácilmente aquellas personas que contaban con pocos familiares y amigos cerca de ellos.

Volviendo al tema, ¿qué es más crítico para la supervivencia? ¿La competencia o la cooperación? ¿Somos como los chimpancés o como los bonobos? Bien, pues contamos con una personalidad bipolar. Con tan sólo hacer un recuento de los hechos históricos podemos decir que el *Homo sapiens* es más brutal que el chimpancé y también más empático que los bonobos; somos un simio bipolar. Nuestras sociedades nunca han sido ni completamente pacíficas ni totalmente competitivas. El contraste entre el chimpancé y el bonobo está marcado por la distinción que hacen los psicólogos entre la personalidad que remarca a la jerarquía, que cree en la ley y el orden utilizando medidas extremas para mantener a todos en su lugar, y la personalidad que tiende a atenuar a la jerarquía, que es más flexible y permite la relajación y el juego aun en cuestiones serias. Hay que tomar en cuenta que el punto no es decidir cuál de las dos tendencias es más deseable, porque sólo mediante el empleo de ambas se constituye la sociedad humana tal como la conocemos. Nuestras sociedades se balancean entre ambas actitudes:

contamos con instituciones totalmente jerárquicas, como el sistema de justicia criminal, y también tenemos instituciones más relajadas y flexibles, como los movimientos por los derechos humanos y asociaciones para el cuidado de los más necesitados. De manera individual, cada persona se inclina hacia uno y otro lado, muy probablemente porque somos un resultado híbrido de ambas tendencias. Contar con las dos nos permite construir una imagen de nosotros mismos, que es considerablemente más compleja de lo que se pensaba hace 25 años.

Por último, hay que hacer notar que no toda la agresividad es mala, ya que el hombre ha servido para el progreso, tal como lo muestra a manera de metáfora Stanley Kubrick en la película “2001, odisea en el espacio”, en donde podemos observar que después de una lucha entre homínidos en la que uno golpea al otro con un fémur de cebra, el hueso utilizado como arma es lanzado hacia arriba y, después de unos cuantos milenios, se convierte en una nave espacial. Es cierto, de alguna forma la agresión contribuye al progreso; tomar riesgos y aventurarse con coraje y pasión ha ayudado al ser humano en su avance científico y tecnológico.

MIGRACIÓN Y DESTINO DE LOS HUMANOS

Para este momento se ha de saber, en términos de especies animales, que nuestros parientes vivos más cercanos en la actualidad corresponden a tres especies de grandes simios: el gorila, el chimpancé y el bonobo. Las tres especies se encuentran confinadas en África, junto con una amplia evidencia fósil que indica y señala que los estadios tempranos de la evolución de los humanos se llevaron a cabo en ese continente.

La historia humana, vista como algo separado del resto de los animales, o mejor dicho, como una línea evolutiva bien diferenciada e independiente, empezó en África hace alrededor de siete millones de años. Para ese entonces la población africana de simios se diversificó en varias poblaciones, una de las cuales dio origen al gorila moderno, otra al chimpancé actual y otra más a los humanos. La línea evolutiva del gorila se separó poco tiempo antes de la diversificación entre el ser humano y el chimpancé.

Como describimos también en el capítulo anterior, las pruebas fósiles irrefutables indican que los homínidos presentaron una posición erecta y bipedestación hace aproximadamente cuatro millones de años y luego se incrementó el tamaño corporal y el tamaño cerebral hace unos 2.5 millones de años. También vimos que a estos casi humanos se les conoce como *Australopithecus afarensis*, *Australopithecus africanus*, *Homo habilis* y *Homo erectus* (entre los más representativos) y que, aparentemente, cada uno de ellos evolucionó en esta mencionada secuencia. Aunque el *H. erectus* es uno de nuestros más cercanos antecesores, su capaci-

dad craneal apenas contaba con la mitad de la capacidad de los humanos modernos u *H. sapiens*, y aunque hacían uso de herramientas muy simples y primitivas, desde el punto de vista netamente zoológico eran los *H. erectus* mucho más que un simio, pero les faltaba mucho para llegar a semejarse a un ser humano moderno.

Todo lo que se ha podido recabar para ensamblar la prehistoria de los humanos, desde sus orígenes hace siete millones de años (los paleontólogos mantienen un margen que va de hace cinco a hace nueve millones de años), y durante los cinco o seis millones de años que les siguieron, permaneció confinado al continente africano. Los registros paleontológicos demuestran que el primer ancestro de los humanos que exploró las afueras de África fue, sin lugar a dudas, el *H. erectus*, aseveración basada en los descubrimientos fósiles llevados a cabo en la isla de Java, en el sureste Asiático, del hombre de Java, que en realidad era el mismo *H. erectus*. Se deduce que el hombre de Java llegó a ese lugar hace aproximadamente un millón de años, aunque datos recientes demuestran que probablemente fue hace 1.8 millones de años. Por otro lado, en la actualidad se sabe de manera incuestionable, y con pruebas suficientes, de la permanencia de los humanos en Europa a partir de hace medio millón de años. ¿Qué sería lo que impulsó al *H. erectus* a explorar fuera de los confines de su hábitat natural? A continuación nos situaremos en el momento histórico. Para entonces, las herramientas del *H. erectus* continuaban siendo muy primitivas: apenas unas piedras afiladas mediante el golpeteo de unas con otras. Sólo algunos cientos de miles de años después empezaron a insertar las piedras afiladas a palos de madera, fabricando así las primeras lanzas. Luego, los *Homo* se empezaron a maravillar cuando se dieron cuenta de que el fuego (originado por causas naturales como el calor o los rayos de las tormentas) era realmente seguro, siempre y cuando se le guardara una cierta distancia; incluso se pudieron haber percatado de que el fuego ayudaba a mantener alejados a los depredadores y, por si fuera poco, servía también para calentarse en las temporadas invernales, además de que los trozos de carne, producto de la caza, adquirirían un mejor sabor y se masticaban con mayor facilidad cuando los acercaban al calor de las llamas. Es muy probable que el mismo *Homo erectus* se diera cuenta de que al chocar o golpear una piedra contra otra salieran chispas que podían, situadas a una distancia adecuada, encender un fuego cuando se les acercaba a un manojo de ramas secas. Mencionamos esto del fuego pues consideramos que fue un gran adelanto tecnológico que pudo haber brindado a esas comunidades la suficiente confianza en sí mismas como para salir de sus lugares de origen para explorar nuevos horizontes. ¿Cómo lo hicieron? Lo más probable es que las oleadas migratorias del *H. erectus* no hayan seguido un patrón o dirección específicos, como sucede con las mariposas Monarca y sus migraciones de Canadá a México y viceversa, sino que la expansión del *Homo erectus* siguió un patrón circular, algo parecido a lo que observamos cuando arrojamus una peque-

ña piedra a un depósito con agua y, de manera gradual, las pequeñas olas aparecen desplazándose del centro a la periferia en círculos concéntricos. Así, la expansión de los humanos se dio en todas direcciones a partir de su epicentro, en algún lugar del este de África, llevándose a cabo a lo largo de miles de años. Conforme un grupo de humanos se movía a cierta zona, permanecía ahí por algunos cientos de años. Luego, conforme se agotaban los recursos naturales del lugar que servían de sustento para satisfacer las necesidades básicas de agua y alimento tenían que migrar nuevamente en busca de otro sitio en el cual pudieran establecerse por otro tiempo más. Con el paso de los años, el *Homo erectus* agregó a su dieta algo de proteínas, y su alimentación ya no era sólo vegetariana, sino que comenzó a cazar animales y se convirtió en cazador y recolector. La agricultura se desarrolló mucho tiempo después, durante el Holoceno, hace aproximadamente 10 000 años.

Volvamos a lo que sucedía hace uno o dos millones de años. Otros de los factores que probablemente motivaron al *Homo erectus* para continuar con sus migraciones fueron los cambios climatológicos, la falta de agua y el escape de la amenaza impuesta por algún o algunos depredadores. De manera gradual, los miembros de los diferentes grupos de *Homo erectus* continuaron dispersándose a lo largo y ancho del continente africano; llegaron a las costas del este y del oeste, formaron comunidades en Sudáfrica y se extendieron también al norte de África. Luego llegaron a Europa y Asia. Pudieron alcanzar Asia mediante travesías a lo largo de Asia Menor o Medio Oriente, después de pasar la franja de tierra en donde hoy se encuentra el canal de Suez, muy cerca de El Cairo, capital de Egipto. A Europa lograron llegar a través de la misma ruta, pero dirigiéndose hacia el noroeste a partir del Medio Oriente, o bien a través del mar Mediterráneo. Cabe mencionar que lograrlo de esta manera significaría haber contado con botes para navegar y esto demanda ciertos conocimientos tecnológicos y habilidades que quedaban fuera del alcance de estas primeras especies de *Homo*. Ciertamente, los botes no eran necesarios, ya que en aquel entonces no existía el mar Mediterráneo, pues se vivía en una era glacial, durante la cual el nivel de los océanos era muy bajo, y así los *Homo* lograron caminar con dirección hacia el Norte sin dificultad. Conforme pasó el tiempo y la Tierra se calentó nuevamente, el hielo se derritió y subió nuevamente el nivel de los océanos, se llenó de agua el espacio destinado a formar el mar Mediterráneo, que quedó conformado como tal desde hace 450 000 años. Para entonces, el *Homo erectus* había llegado caminando hasta las regiones más retiradas en dirección al este de Asia.

Con todo y estas migraciones iniciales, las funciones cerebrales del *Homo* de hace un millón de años seguían siendo limitadas. Podía hacer uso del fuego y de ciertas herramientas y objetos, pero la comunicación entre ellos se llevaba a cabo con gemidos, gritos, risas o llantos. De cualquier manera, hay que tomar en cuenta que aun con esos sonidos primitivos, emitidos en diferentes formas o maneras, podían indicar una gran variedad de escenarios. Actualmente, los monos en Áfri-

ca emiten diferentes tipos de sonidos cuando ven a un guepardo, un águila o una serpiente, para alertar a sus congéneres. Algunos primatólogos han grabado dichos sonidos para después reproducirlos ante un grupo de monos y observar las respuestas o reacciones. De esta manera, cuando reproducen el sonido emitido por la presencia de un guepardo, los monos suben a la copa de los árboles; cuando se reproduce el sonido emitido por la vista de un águila la respuesta observada consiste en esconderse entre los arbustos; y, finalmente, con la reproducción del sonido de alerta por una serpiente, los monos adquieren una posición erecta sobre sus pies y observan cuidadosamente sobre el piso, en busca de un posible agresor.

Cualquiera que fuera el motivo para que el *Homo erectus* migrara a tan lejanos lugares, se movieron mucho más lejos de su hábitat que cualquier otro primate de su época. Aunque no se puede afirmar que dichas jornadas no fueron realizadas por otros primates, sí se puede mencionar que, de haberse realizado, no tuvieron éxito. De cualquier manera, hay que aceptar que a lo largo de millones de años, durante los cuales las condiciones geográficas y climatológicas han fluctuado considerablemente, muchos grupos de animales se han movido de un lugar a otro para luego permanecer en su nuevo hábitat. Por ejemplo, el movimiento de las plataformas continentales que se da como consecuencia de los movimientos tectónicos, que gradualmente separaron la masa continental localizada al norte (Norteamérica y Eurasia) de la masa continental localizada al sur (Sudamérica, África, India, Australia y Antártica), hace alrededor de 135 millones de años, seguido por la disociación de la masa continental del sur en los actuales continentes, y de la fusión de la India con Asia 70 millones de años después, significa que mucho de la flora y fauna de cualquier tipo fue separada y desplazada hacia otras regiones del planeta. Lo anterior trajo como resultado la emergencia de especies diferentes en regiones muy distintas a las originales. Los antropoides son una muestra de lo sucedido. Los monos de América del Sur son platirrinos, lo cual quiere decir que sus narinas (aperturas u orificios nasales) son planas o que tienen la nariz aplanada, diferentes de los monos del Viejo Mundo, los de Asia y África, que son catarrinos, con narinas hacia abajo, como las de los seres humanos. De cualquier modo, la separación de las poblaciones por medios geográficos no necesita darse de forma tan dramática como con la separación de las plataformas continentales para poder inducir el origen de una nueva especie, sino que, como Darwin lo dio a conocer, todo lo que se necesita para la aparición de una nueva especie es aislar a la descendencia de sus ancestros, de manera que un grupo de individuos de toda la descendencia carezca de la posibilidad de aparearse con otros miembros de la descendencia de los mismos ancestros.

Volvamos a nuestra historia sobre la migración de los humanos. Los registros fósiles muestran que hace medio millón de años empezaron a surgir diferencias en los cráneos de *Homo erectus*, que se volvieron más grandes y redondos, y menos angulados. Estos cráneos de hace medio millón de años, encontrados en Áfri-

ca y Europa, se observaron lo suficientemente parecidos a los de nosotros (hombre moderno) para clasificarlos en nuestro género y especie: *Homo sapiens*, en lugar de *Homo erectus*. Esta diferencia se estableció realmente de manera arbitraria, ya que lo que sucedió en realidad fue que el *Homo erectus* evolucionó a *Homo sapiens*. De cualquier manera, los primeros *H. sapiens* diferían de nosotros, los *H. sapiens* modernos u *H. sapiens sapiens*, en ciertos detalles esqueléticos: tenían el cerebro significativamente más pequeño que el nuestro, y con lo que respecta a diversos utensilios y artefactos eran también francamente diferentes. Para entonces, África, Europa y Asia se habían poblado de hombres. En lo que respecta al continente americano y a Australia, así como las islas de la Polinesia, permanecían vírgenes.

Poco tiempo después, hace medio millón de años, las poblaciones humanas de África, Europa y Asia empezaron a diferenciarse ligeramente unas de otras, mediante pequeños detalles anatómicos del esqueleto óseo. Por ejemplo, la población de Europa y del oeste de Asia empezó a ser representada especialmente por varios esqueletos, en su conjunto denominados como los neanderthales y, a menudo, clasificados como otra especie conocida como *Homo neanderthalensis*, mismos que, a pesar de haber sido esquematizados como una especie de hombre bruto y salvaje que sólo habitaba en las cuevas, contaban con un cerebro ligeramente mayor que el nuestro. Además, fueron los primeros humanos en dejar fuertes pruebas sobre el cuidado de los enfermos y el entierro (culto) a sus muertos. A juzgar por los restos de huesos de animales fosilizados en las cuevas donde se han encontrado indicios de los neanderthales, se puede decir que sus habilidades y destrezas para la caza no eran muy avanzadas ni impresionantes, sino que más bien hacían presas a diversas especies de animales pequeños y relativamente fáciles de atrapar, como algunas aves y mamíferos pequeños. Tampoco hay pruebas de que fueran destacados pescadores.

Los escasos restos fosilizados de humanos africanos contemporáneos al hombre de Neanderthal son más parecidos a nosotros, los humanos modernos, que a ellos. Sin embargo, aunque aquellos africanos de hace 100 000 años contaban con un esqueleto más moderno que el hombre de Neanderthal (su contemporáneo), los caracterizaba una manufactura de herramientas de piedra igual de toscas que las de los Neanderthal; ambas carecían de formas estandarizadas y ninguno realizaba arte.

Desde el punto de vista tecnológico y cultural, la historia de los humanos empezó a cambiar radicalmente y de manera muy impresionante hace cerca de 50 000 años. El doctor en medicina, biólogo evolucionista y biólogo geográfico Jared Diamond, denominó a este histórico momento como “el gran salto hacia adelante”. Los principales y definitivos signos de este gran salto provienen del este de África y consisten en herramientas de piedra, cuya manufactura se encontraba bien estandarizada, y en artefactos de joyería. Objetos muy parecidos a los

mencionados se han encontrado en el Cercano Oriente y en el sureste de Europa, que datan de hace 40 000 años. También, correspondientes al mismo tiempo, se han encontrado abundantes artefactos relacionados con esqueletos modernos de individuos pertenecientes al hombre Cro-Magnon, en el suroeste de Europa. Después aparecieron abundantes sitios arqueológicos que no dejan duda de que se trataban de humanos modernos, tanto desde el punto de vista biológico como desde el conductual.

También hay pruebas de que el hombre de Cro-Magnon no sólo desarrolló herramientas de piedra, sino también de huesos tallados, por ejemplo en forma de anzuelos y agujas. Además, fue el primero en desarrollar herramientas y armas ingeniosamente construidas y ensambladas por varias partes, como arpones, arcos con flechas y otras precursoras de armas modernas. Contar con este tipo de artefactos les permitió cazar a distancia segura de la presa, pudiendo así enfrentar a animales más grandes y peligrosos, como rinocerontes y elefantes. Por otro lado, inventaron también el hilo y la cuerda, los cuales utilizaron para la confección de redes, permitiéndoles así incluir aves y pescado en su dieta. Mejoraron también sus casas y su vestimenta, gracias a lo cual lograron soportar climas extremos, en especial el frío.

Los productos de los Cro-Magnon mejor conservados y más conocidos son sus artes, como las pinturas en cuevas, o pinturas rupestres, sus artesanías representadas por pequeñas estatuillas y sus instrumentos musicales.

Como podemos darnos cuenta, algo tuvo que suceder, o algo tuvo que cambiar en cuanto a las capacidades de nuestros ancestros, en algún momento entre hace 100 000 y 50 000 años. Varios científicos han mencionado y propuesto dos factores muy importantes para que, según las palabras de Jared Diamond: se diera “el gran salto hacia delante”, y a nuestro parecer no tienen por qué estar separados, puesto que están íntimamente ligados. En primer lugar está un cambio en la organización cerebral, sin la necesidad de llevar implícito un incremento en el tamaño del cerebro; esto es, una forma diferente en la manera como se organizan e interactúan las neuronas, a manera de red, para permitir un lenguaje moderno que permita expresar las ideas de manera clara y precisa. En segundo lugar está el perfeccionamiento anatómico de la laringe y las cuerdas vocales que contiene, así como en todo el aparato locomotor que tiene que ver con la articulación de las palabras. Porque una cosa es emitir un sonido, al provocar, con el aire espirado de los pulmones, la vibración de las cuerdas vocales, o sea, la fonación, y otra muy diferente es lograr que la fonación adquiriera diversas características mediante la articulación de sonidos, hecho conocido como la articulación de la palabra y que se logra gracias a los movimientos finos y precisos que hacen interactuar al paladar, la lengua, los dientes y los labios de múltiples maneras para lograr la articulación de la fonación en palabras. Como los movimientos de dichas estructuras anatómicas no se llevan a cabo de manera automática o independiente, sino que son

coordinados por un complejo sistema anatómico y funcional en el que intervienen huesos, dientes, articulaciones, músculos y nervios, bajo el comando y dirección del sistema nervioso central, decimos que tanto la novedad (o las novedades) que tuvo a bien presentarse en la organización cerebral como las modificaciones periféricas pertinentes en la cara y el cuello (entiéndase como cara no sólo el rostro, sino todo lo que se encuentra en la cabeza y que no forma parte de la bóveda craneana que contiene al cerebro), lograron de manera conjunta que el Cro-Magnon u *Homo sapiens* interactuara de manera muy precisa y nunca antes vista con sus congéneres gracias a la articulación de las palabras, mediante un lenguaje hablado que le facilitó la expresión de sus ideas y emociones.

Ahora la gran pregunta sería: ¿el lenguaje hablado se originó en una sola zona geográfica, en un grupo pequeño de humanos que después fueron capaces de expandirse por el mundo y reemplazar a los existentes? Porque, a saber del lector, por esas épocas nuestros ancestros ya habían salido de África en diversas oleadas migratorias para poblar regiones de Europa y Asia. O bien, continuando con la pregunta, ¿las novedades en la organización cerebral y en el aparato locomotor para lograr la fonación se presentaron de manera paralela y sincrónica en diferentes grupos de humanos que habitaban ya en diversas regiones? Todo parece indicar que “el gran salto hacia delante” ocurrió en África. Además de analizar posteriormente otras pruebas que aciertan la oración previa, la prueba de que los humanos modernos se originaron de manera muy localizada en África y de que después se expandieron y reemplazaron a otros tipos de humanos la podemos encontrar en Europa. Veamos, el hombre de Cro-Magnon llegó a Europa hace 40 000 años, con esqueletos modernos, armas de avanzada y otras novedades culturales. En pocos miles de años ya no había neanderthales, los cuales habitaron ese continente durante cientos de miles de años. La secuencia de los hechos sugiere fuertemente que de alguna manera el Cro-Magnon utilizó su tecnología, muy superior, y su habilidad neurológica y lingüística, hasta la fecha inigualable, para desplazar y reemplazar al neanderthal sin dejar rastros de una posible hibridación entre ambos.

Las otras pruebas a las que me refería con anterioridad son las moleculares. Un par de regiones del genoma humano conservan, a diferencia del resto del DNA, variaciones genéticas reveladoras. Recordemos que en el genoma está escrita la autobiografía de nuestra especie mediante la acumulación de mutaciones que nos han dado forma y función. Una de estas regiones es el DNA mitocondrial, o sea el material genético contenido en el orgánulo celular conocido como mitocondria. El DNA mitocondrial cuenta con la característica de poder transmitir información, de manera íntegra, de la madre al hijo. De manera similar, la otra región del genoma a la que hacemos referencia consiste en que la mayoría de los cromosomas “Y”, mismos que determinan el sexo masculino, viajan intactos, de una a otra generación de padre a hijo. Tanto las mutaciones acumuladas en el

DNA mitocondrial como las que se van concentrando en los cromosomas “Y” (sólo en el hombre y no en la mujer) constituyen sólo dos filamentos en el enorme tapiz de personas que han contribuido a formar un genoma individual. Sin embargo, al comparar el DNA mitocondrial y el de los cromosomas “Y” en gente de poblaciones diferentes, los genetistas pueden formarse una idea general de dónde y cuándo se separaron los diferentes grupos humanos en las grandes migraciones.

Así, cuando unos científicos de la universidad de California, en Berkeley, utilizaron DNA mitocondrial para ubicar el hogar ancestral de la humanidad, y lo compararon con el DNA mitocondrial de las mujeres de todo el mundo, encontraron que aquellas mujeres vivas en la actualidad y de ascendencia africana mostraban el doble de diversidad que sus congéneres. Puesto que, al parecer, las mutaciones ocurren a un ritmo estable, entonces los humanos actuales deben haber vivido en África el doble de tiempo de lo que han habitado en cualquier otro lugar. Hoy en día los científicos calculan que todos los humanos estamos emparentados con una mujer en particular, que vivió hace unos 150 000 años en África, denominada la “Eva mitocondrial”. Desde luego que ella no era la única mujer viva en aquel entonces, pero si los genetistas están en lo correcto, toda la humanidad está ligada a esta Eva mediante una cadena genética de línea materna y continua.

A la Eva mitocondrial pronto se le unió, de manera análoga, un “Adán cromosoma Y”, nuestro padre, también de África. Los estudios cada vez más precisos sobre el DNA han confirmado, una y otra vez, este capítulo inicial de nuestra historia: todas las personas de la Tierra, en sus variadas formas y colores (razas) tienen una filiación ancestral con los cazadores y recolectores africanos. Una vez más se confirma la hipótesis de Charles Darwin: “el origen del hombre moderno debió ser en algún lugar de África”. Regresando a los marcadores de DNA ancestrales, vemos que se presentan con mayor frecuencia entre los bosquimanos del sur de África y los pigmeos de Biaka, asentados en el centro del continente, así como en algunas tribus del este de África.

En resumen, algunos arqueólogos y paleontólogos opinan que los emigrantes que partieron de África, hace 70 000 o 50 000 años, marcaron una revolución en la conducta, la cual incluyó la fabricación de herramientas más complejas, la creación de redes sociales más amplias y las primeras muestras indiscutibles de arte. Quizá algún tipo de mutación neurológica (FOXP2) condujo al desarrollo del lenguaje hablado, convirtiendo a nuestros ancestros en individuos completamente evolucionados, lo cual encaminó a un pequeño grupo en la ruta para poblar el mundo.

Cualesquiera que hayan sido los utensilios y habilidades cognitivas que los emigrantes cargaron consigo, habían dos posibles caminos que llevaban a Asia. Uno conducía al valle del Nilo, a través de la península del Sinaí, y otro llevaba al norte, hacia el levante; pero también había otra ruta atractiva: hace 70 000 años

la Tierra ingresaba en el último periodo glaciario y los niveles del mar descendían mientras las aguas quedaban atrapadas en los glaciares. En su parte más estrecha, la desembocadura del mar Rojo, entre el cuerno de África y Arabia, quizá tuvo sólo unos cuantos kilómetros de anchura. Posiblemente los humanos cruzaron en algunos tipos de embarcaciones primitivas.

“El gran salto hacia delante” coincide con la principal, más grande y bien corroborada migración de los humanos desde que nuestros ancestros ocuparon Eurasia. Esta importante migración consistió en la ocupación, hace 40 000 o 30 000 años, de Australia y Nueva Guinea, que para entonces se encontraban unidas en una misma masa continental. Poco a poco fueron habitando y adaptándose a diferentes nichos ecológicos, desde la selva tropical hasta las grandes alturas de las montañas de Nueva Guinea; desde el clima seco y desértico del centro hasta las regiones húmedas del sureste de Australia.

Durante la Era del Hielo, una gran cantidad de agua de los océanos fue capturada y retenida en los glaciares, lo cual disminuyó considerablemente los niveles del mar alrededor de todo el globo terráqueo, de manera que las de por sí aguas bajas localizadas entre Asia y las islas de Indonesia, tales como Sumatra, Borneo, Java y Bali, terminaron por secarse, dejando a las islas unidas por grandes y secas extensiones de tierra (figura 4-7).

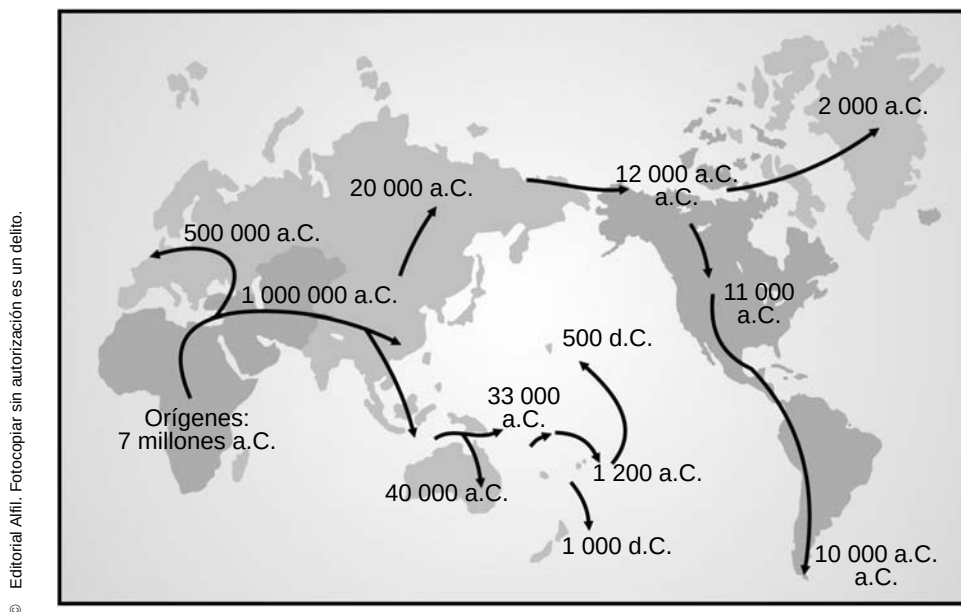


Figura 4-7. Distribución de los humanos alrededor del mundo.

Aunque hasta la fecha el tema de la manera como se habitaron las islas de la Polinesia continúa siendo un tema polémico y controvertido, se piensa que los seres humanos bien caminaron sobre zonas de profundidad muy baja, o casi secas, con la ayuda de canoas primitivas, o bien mediante pescadores extraviados o humanos que por una u otra razón fueron arrastrados por corrientes marinas y lograron sobrevivir. Pero el hecho es que hay pruebas de que las principales islas, así como Australia y Nueva Guinea, fueron habitadas por humanos hace 40 a 30 000 años. También para ese entonces ocurrió la primera exterminación de los grandes animales por parte de los humanos. En la actualidad, contemplamos que el continente africano es el que cuenta con una mayor variedad y cantidad de grandes mamíferos. Sin embargo, Eurasia también cuenta con muchas especies grandes de los mismos animales, como rinocerontes, tigres y elefantes asiáticos; Europa cuenta con alces, osos y leones europeos (claro que sin la magnificencia del Serengueti); y Australia y Nueva Guinea no fueron la excepción. En estas latitudes evolucionó una gran variedad de grandes mamíferos, como el canguro gigante (un marsupial) y reptiles gigantes (lagartos de una tonelada), pero resulta que estos enormes ejemplares australianos desaparecieron con la llegada de los humanos, hace unos 30 000 años. Quizá esta tragedia fue la consecuencia directa de la caza indiscriminada, o indirecta como resultado de las modificaciones del hábitat o nichos ecológicos provocados por los humanos. Como quiera que haya sido, la desaparición de las especies grandes de Australia y Nueva Guinea trajo consigo consecuencias catastróficas para los humanos que continuaron viviendo en esas regiones. Dichas extinciones eliminaron a todos los grandes animales que bien podrían haber sido candidatos para la domesticación. Los humanos de Australia y de Nueva Guinea se quedaron sin animales domésticos.

La colonización de Australia y Nueva Guinea no se presentó hasta que el *Homo* dio “el gran salto hacia delante”, al igual que la ocupación del norte de Eurasia, una de las regiones más frías de la época. Aunque el hombre de Neanderthal se adaptó bien al frío glacial, no logró llegar a regiones más allá del norte de lo que hoy es Alemania. No es de sorprenderse, ya que carecían de agujas para confeccionar ropa abrigadora, así como tampoco contaban con habitaciones donde resguardarse en un medio ambiente más tibio; aparentemente carecían de otro tipo de tecnología esencial para poder vivir en climas con temperaturas tan bajas. Los humanos anatómicamente más modernos, quienes sí poseían la tecnología necesaria, lograron expandirse hasta la región de Siberia hace alrededor de 20 000 años. Dicha expansión bien pudo ser la responsable de la extinción del mamut y del rinoceronte en Eurasia. Es claro, entonces, que para este momento de la prehistoria el mundo había sido poblado por humanos en tres de sus cinco continentes: África, Eurasia y Australia; faltaban por poblarse América y la Antártida; este último fue tocado por los seres humanos hasta el siglo XIX, así que nos concentraremos ahora en América. Con toda seguridad, América fue el

último continente en ser habitado por los humanos (excepto la Antártida), razones ahora obvias: llegar al continente americano, desde el Viejo Mundo, requería navíos para poder cruzar el océano, navíos de los cuales no existen pruebas claras y consistentes sino hasta muchos miles de años después; o, lo que es más factible, que primero se diera la ocupación de Siberia (desocupada hasta hace 20 000 años) y que a partir de ahí cruzaran a América del Norte caminando a través de un puente de tierra firme conocido como Beringia, que hoy corresponde al estrecho de Bering.

La evidencia incuestionable de la presencia de humanos en América se localizó en Alaska y data de hace 12 000 años. A este hecho le siguieron una serie de pruebas que sugieren la actividad humana en el sur de Canadá, Estados Unidos y la frontera de México con Estados Unidos hace 11 000 años, en una serie de asentamientos humanos (varios cientos) conocidos en conjunto como Clovis. El nombre se deriva de uno de estos sitios cercano al pueblo de Clovis en el estado de Nuevo México, en EUA. Relativamente poco tiempo después aparecieron pruebas también incuestionables en las zonas del Amazonas y la Patagonia, lo cual lleva a la conclusión de que estos primeros habitantes de América recorrieron aproximadamente 12 800 km desde el sur de Canadá hasta la Patagonia en tan sólo 1 000 años. No es de sorprenderse si tomamos en consideración que tal expansión pudo haberse logrado recorriendo 12 km por año en dirección al sur y que para un hombre cazador y recolector (propio de la época) es la distancia que podría haber recorrido fácilmente en un día promedio, buscando un animal para cazar y alimentarse.

La población de humanos en América se incrementó rápidamente alcanzando una cifra aproximada de 10 millones de habitantes en 1 000 años. Esto puede ser posible con un grupo de cien habitantes que se reproduzcan con un índice de crecimiento anual de 1.1%.

Vale la pena recordar que durante la Era del Hielo Beringia estaba conformada por un puente de tierra con tundra abierta y que fácilmente pudo ser explorada por humanos provenientes de Siberia, bien adaptados al frío. Con el sobrecalentamiento global que siguió a la Era del Hielo, los glaciares se derritieron y el nivel de los océanos subió nuevamente, dejando a estos primeros habitantes de América aislados completamente del resto de los continentes, principalmente de Eurasia y África.

Como en el caso de Australia y Nueva Guinea, el continente americano originalmente se encontraba habitado por una gran cantidad y variedad de grandes mamíferos. Hace cerca de 15 000 años el oeste americano se parecía mucho al actual Serengeti de África: contaba con elefantes, caballos, leones y otras especies más exóticas, como los camellos. Sin embargo, al igual que lo que sucedió en Australia, todas esas especies de grandes mamíferos se extinguieron. La extinción masiva ocurrida en Australia hace 30 000 años sucedió también en América hace

12 000 años. Para confirmar la extinción de aquellos mamíferos de América existe una gran cantidad de esqueletos que datan de hace 11 000 años.

El descubrimiento de numerosos huesos de mamut entre y en los asentamientos Clovis no debe ser una coincidencia. Revelan la expansión de cazadores expertos en dirección hacia el sur de América. Los humanos encontraron en su camino una gran variedad de animales que nunca, en su larga historia evolutiva, habían visto ni convivido con un humano o algo que se le pareciera (homínido u hominoide), por esta razón eran fáciles de cazar y finalmente fueron exterminados en su totalidad; los llevaron también, como en el caso de Australia, a su extinción. ¿Por qué no sucedió lo mismo en África ni en Eurasia? Porque en estos dos continentes las grandes especies de mamíferos evolucionaron al mismo tiempo que los homínidos, homínidos y homos, y por esta razón aprendieron a guardarse respeto mutuo, pues “crecieron juntos”.

Con la ocupación de América, la mayoría de las áreas habitables de los continentes, las islas continentales y las islas oceánicas del mundo podían darle sustento al hombre. Las islas del mar Mediterráneo se habitaron hace entre 8 500 y 4 000 años, las islas de la Micronesia hace 1 000 años y la isla de Madagascar hace 800 años, por citar algunos otros. El caso es que hace unos 1 000 años las grandes migraciones de nuestros ancestros habían terminado.

Lo que definitivamente vino a diferenciar al *Homo sapiens* del resto de las otras especies de *Homo* fue, sin lugar a dudas, la capacidad de comunicarse mediante un lenguaje articulado, permitiendo la comunicación de conocimientos, sentimientos, emociones, ideas e inquietudes. Después, conforme los diferentes grupos de humanos se fueron asentando en diversas poblaciones, desarrollaron y adoptaron lenguajes de intercomunicación en distintas variedades, lo cual dio pie al surgimiento de diferentes idiomas y dialectos.

Mucho tiempo después vendrían otras jornadas, con características diferentes, como los viajes y las expediciones de los grandes navegantes y exploradores, los de los “descubridores” y conquistadores de tierras lejanas. Personajes como Alejandro el Grande, Marco Polo, Cristóbal Colón, Ponce de León, Cabeza de Vaca, Hernán Cortés, Francisco Pizarro, Bartolomé Díaz, Vasco de Gama, Fernando Magallanes, Henry Hudson, Giovanni de Verrazano, Roald Amundsen, Robert Scott, Edmund Hillary, Tensing Norgay, Yuri Gagarin, John Glenn, Neil Armstrong y Edwin Aldrin, entre muchos otros, compartieron una de las cualidades más marcadas en los seres humanos: nuestra propensión innata a buscar siempre nuevos horizontes, explicaciones a los fenómenos que acontecen a nuestro alrededor, y a investigar fenómenos hasta sus raíces.

En términos generales, es bien sabido que los seres humanos compartimos las mismas características genotípicas y fenotípicas, y contamos con cierta variabilidad que hace de cada uno de nosotros seres únicos e irrepetibles, pero en números somos 99.9% iguales si nos comparamos desde el punto de vista biológico. A

pesar de dicha igualdad, siempre surge una inquietante pregunta: ¿por qué algunos asentamientos humanos se desarrollaron en civilizaciones majestuosas y otros no? ¿Por qué incluso algunas civilizaciones que se desarrollaron de manera importante, luego de cierto tiempo se colapsaron? Para contestar estas interrogantes existen, en esencia, tres puntos de vista: la raza, el medio ambiente favorable y el medio ambiente desfavorable. La raza no parece ser un factor crucial, ya que, como se ha podido demostrar en múltiples ocasiones, son los individuos y no las comunidades los que varían en aquellas cualidades como el ingenio mental. Todo parece indicar que para poder explicar la aparición y desarrollo de las civilizaciones en ciertas partes del mundo, pero no en otras, las condiciones del medio ambiente son de una gran importancia. Pero la manera de abordar este concepto puede verse en dos perspectivas radicalmente opuestas.

La primera propone que un medio ambiente favorable permite a sus habitantes establecerse con una vida sedentaria para desarrollar sociedades estables. Esto pudo presentarse en el valle del Nilo en Egipto; en el área fértil localizada entre los ríos Tigris y Éufrates de la Mesopotamia (del griego “entre ríos”), actual Irak; en los bancos del río Amarillo en China; en Creta, con su vasta variedad de alimentos de origen marino; o en el bosque tropical de la península de Yucatán, entre otros. El *Homo sapiens* simplemente se movió hacia los lugares donde la vida podía ser más fácil y se estableció ahí. A este primer punto de vista lo caracteriza también un lado oscuro: las cosas fáciles nos llevan al letargo y nos hacen flojos. Una comunidad que vive de manera oportunista se puede convertir en menos inventiva y menos progresiva que aquella en la que se tienen que enfrentar retos importantes para poder salir adelante. Ésta es una base fundamental para discutir el segundo punto de vista: la demandante actividad de tener que salir de cacería demostró aportar un mayor beneficio tecnológico al hombre que el continuar con su actividad de andar buscando carroña y otros desperdicios para poder alimentarse. Así pues, es el reto a las circunstancias adversas el que detona el ingenio del hombre. Desde este punto de vista se puede decir que es el enfrentamiento a la adversidad, y no el camino fácil, lo que dio como resultado la emergencia de las civilizaciones.

Pero podríamos pensar también de otra manera: supongamos que el hombre decide habitar en una zona que cuenta con un medio ambiente favorable, es decir, un clima templado que lo mantenga fresco y cómodo, un lugar en donde, además de verse rodeado de una cantidad suficiente de agua dulce, con tierras fértiles, contenga también animales dignos de ser domesticados para luego alimentarse de ellos; siendo así no tendría que preocuparse por dedicar tiempo excesivo a la caza o la recolección, tampoco por ocupar su ingenio en la invención de nuevas armas para cazar a sus presas, sino que con un medio ambiente así de favorable y teniendo resueltas sus necesidades básicas, el *Homo sapiens* bien pudo tener tiempo suficiente para sentarse a pensar, a filosofar, a preguntarse acerca de la

naturaleza y de todo lo que le rodeaba, como objetos, flora, fauna, cosmos y en muchas otras cosas que después contribuyeron a su desarrollo científico y tecnológico. La ciencia es así, polémica y controvertida; hay autores, como Jared Diamond, que piensan que fue la comodidad, el contar con un medio ambiente favorable, lo que activó el impulso filosófico del hombre. Otros, como Charles Pasternak, piensan lo contrario. Este último se inclina a pensar, de manera contundente, que fue la adversidad y los retos difíciles aunados al eterno placer de la búsqueda lo que llevó al hombre al desarrollo y al progreso de las civilizaciones; que es el reto por lo desconocido lo que tiene un atractivo muy especial para el hombre, pues en su naturaleza está la eterna intención de buscar. La búsqueda por los caminos o la manera de sobrellevar la adversidad y de obtener el éxito en donde sus antecesores han fallado. Pasternak está convencido de que el hombre cuenta con un apetito insaciable por la exploración, mismo que lo ha llevado desde los desiertos de África hasta la tundra congelada de Canadá y desde las estepas de Siberia hasta la jungla del Amazonas. Ningún otro primate se ha aventurado a tan largas expediciones, es el ingenio del hombre lo que le ha permitido sobrevivir al calor y al frío extremos, a la carencia de agua y alimentos. Es el ingenio del hombre el que también le ha permitido encontrar la manera de sobrevivir en un sin fin de restricciones impuestas por un medio ambiente adverso; es lo que ha llevado a los inuit a cubrirse con ropa apropiada y a construir iglús para poder habitar regiones en donde las temperaturas alcanzan los -40°C (temperatura en la cual coinciden las escalas de grados centígrados y grados Fahrenheit), y a los bereberes a ajustarse y adaptarse al sofocante calor del Sahara mediante la detección y conservación de cada gota de agua disponible.

Pero reflexionemos, ni los inuit ni los bereberes han fundado civilización alguna, de tal manera que si el medio ambiente es demasiado extremo, el grupo de humanos que lo habite simplemente no logrará trascender, hasta cierto punto, en lo científico, tecnológico ni cultural. Así pues, el balance o el punto de equilibrio entre el reto a vencer y la capacidad de afrontarlo con éxito es muy delicado.

Reiterando, las cualidades que nos distinguen de los chimpancés y de los bonobos están distribuidas de manera equitativa entre todas las personas del mundo. El color de la piel y otros atributos físicos pueden variar entre los diferentes grupos raciales, pero no existe prueba alguna de que las cualidades cerebrales se expresen en mayor o en menor medida entre las diferentes razas. Las oportunidades de encontrar, en cualquier comunidad, a una persona brillante o estúpida, a un líder o a un seguidor, a un artista o a un vándalo, son exactamente las mismas en cualquier parte del mundo.

Con el tiempo, los cultivos y la domesticación de los animales se convirtieron en una forma eficaz de producir alimentos, mucho más efectiva que la caza y la recolección. Esto le brindó a las comunidades una gran estabilidad y capacidad de expansión. Desde entonces, el incremento en la población se ha presentado

en forma exorbitante. Antes de la emergencia de la agricultura, la población mundial se incrementaba, pero muy lentamente. Incluso hace alrededor de 10 000 años se encontraba en franca disminución: el *Homo sapiens*, aunque difícil de creer, se encontraba en peligro de extinción. Sin embargo, sobrevivió, y 5 000 años después, tan sólo en Egipto habitaban cerca de un millón de personas.

La agricultura requiere un suministro suficiente de agua dulce, de manera que los asentamientos humanos se establecieron a lo largo de los bancos de los ríos, tal como en muchos lugares de la actualidad. En otros sitios, como en Creta, el agua de la lluvia era suficiente para mantener los cultivos en condiciones adecuadas. Lo mismo sucedió en la selva tropical de Centroamérica; en América del Sur quizá vivieron en las regiones montañosas de la cordillera de los Andes, donde el agua del deshielo favorecía el crecimiento de los cultivos.

Ahora, es curioso que la transformación en la manera de conseguir los alimentos, o sea el cambio de la caza y recolección a la agricultura y domesticación de animales, se presentara de manera simultánea tanto en el Viejo Mundo como en el Nuevo Mundo. Para poder explicar este sincrónico acontecimiento que sucedió hace aproximadamente 10 000 años se postularon diversas hipótesis, entre las cuales sobresalen los cambios climáticos globales, aunque la más aceptada es la de la extinción, debido a la caza indiscriminada, de los grandes mamíferos. De pronto, y después de 90 000 años, el *Homo sapiens* se encontró ante la urgente necesidad de encontrar una forma alternativa para alimentarse y sobrevivir. Desde este punto de vista, fue la adversidad y el reto que esto significaba lo que llevó al desarrollo de la agricultura y la ganadería, actividades que exentaron al *Homo sapiens* de ser la causa de su propia extinción.

LAS PRIMERAS CIVILIZACIONES

El hombre moderno llegó al Medio Oriente después de una relativamente corta migración, a partir de su origen, desde algún lugar del este de África, hace unos 100 000 años, justo después de su aparición como especie; para entonces, pequeñas comunidades comprendidas por algunas docenas de individuos se asentaron a lo largo y ancho de dicha región durante miles de años. Luego, se tiene registro arqueológico fechado para el año 9 000 a.C. (para ser exactos, en el año 8 350 a.C., con el método de radiocarbono) de lo que se piensa fue la primera ciudad o casi ciudad, conocida como Jericó, situada al norte del mar Muerto, en Cisjordania, y al este, muy cerca, de Jerusalén. Consiste en un gran número de casas redondas de ladrillo de barro, rodeadas por un foso y una muralla de tres metros de ancho, lo cual sugiere que las batallas, desde entonces, eran comunes. Existe otro par de ciudades que datan del año 7 000 a.C.: Jarmo, en el actual Irak, y Catal

Höyük, en el sur de la actual Turquía; estas ciudades tempranas daban soporte a su población con la agricultura, la horticultura, la ganadería, industria textil y un poco de cerámica.

A continuación hay un breve resumen de siete de las civilizaciones más representativas de la época para luego regresar al análisis sobre los factores que determinaron el desarrollo científico y tecnológico de algunas civilizaciones y el colapso de otras menos afortunadas. Las siete civilizaciones primarias han sido calificadas así dadas las extensas pruebas arqueológicas.

Mesopotamia

Ur y Uruk son también ciudades muy antiguas, construidas hace 7 000 años a la orilla del río Éufrates, cerca de lo que es hoy Basora, en el sur de Irak, y formaban parte del reino de los sumerios. Para el año 3 200 a.C., Uruk contaba con tres templos, un palacio y un *hall*, además de otras edificaciones concentradas en un espacio bien delimitado, conocido como Eanna. Su población, la cual alcanzaba los 10 000 habitantes tres siglos antes, creció a 50 000 habitantes para el año 3 800 a.C. En la misma región de Mesopotamia se desarrollaron otras ciudades como Babilonia (río arriba, también sobre el Éufrates), y Lagash y Umma, que se construyeron cerca del río Tigris, hacia el este. Todas estas ciudades y otras más finalmente sucumbieron ante los persas bajo el comando de Ciro el Grande alrededor del año 1 540 a.C. Las ciudades como Ur y las otras que indicaban la extensión de la civilización de los sumerios fueron abandonadas de manera subsiguiente. En la actualidad, muchos de los hallazgos arqueológicos correspondientes a estas tempranas civilizaciones pueden contemplarse en las exposiciones museográficas del museo Pérgamo en la ciudad de Berlín, capital de Alemania. Ahí, los visitantes pueden darse cuenta de la extravagante forma de vida que llevaban, por ejemplo, los habitantes de las ciudades circundantes de Asia Menor. Los sumerios fueron los primeros en convertir a la medicina, a la arquitectura y a la ingeniería en disciplinas profesionales, en estandarizar una tabla de pesos y medidas, en desarrollar uno de los más antiguos sistemas de lenguaje escrito y también en establecer los fundamentos de las matemáticas y de la astronomía. Los sumerios determinaron el mes lunar en 29 días, 12 horas y 44 minutos, lo cual significa que estaban dentro del 0.002% de su valor real actual. También supieron, 1 000 años antes que Pitágoras, que la suma de los cuadrados de los dos lados cortos de un triángulo recto igualaba al cuadrado del lado más largo.

Los sumerios también fueron de los primeros en cultivar la tierra con fines recreativos y no sólo para la producción de alimentos. Los jardines colgantes de Babilonia, una de las siete maravillas del mundo antiguo, son un testigo de las habilidades e innovadoras ideas para acarrear el agua hacia arriba, a una serie de

terrazas por encima de las cercanías del río Éufrates. Nuestro conocimiento sobre los jardines de Babilonia proviene de los textos griegos que fueron escritos algunos siglos más tarde, por lo cual el sitio preciso de su localización no ha podido ser identificado. Incluso es posible que tan mencionados jardines no estuviesen localizados en Babilonia, sino en Níniveh, a unos 320 km al norte, sobre los bancos del Tigris (muy cerca del actual Mosul), una de las más antiguas civilizaciones que emergió hace 6 000 años y ejemplifica cómo cierto número de comunidades, interactuando entre sí, pueden desarrollar un sistema cultural y una forma de vida que les dé soporte durante un periodo prolongado.

Egipto

Dos áreas distintas empezaron a desarrollarse durante el quinto y el cuarto milenio antes de Cristo: una muy cerca del delta del río Nilo (conocida también como el bajo Egipto), y otra 640 kilómetros al sur (alto Egipto), alrededor del año 3 100 a.C. El rey Menes, quien se encargó de unificar al Alto y al Bajo Egipto, estableció su capital cerca del delta, justo al sur de lo que hoy es El Cairo, y la denominó Memphis. Aquí se construyeron las primeras pirámides como cámaras mortuorias para los faraones y sus familias, acompañados con sus pertenencias favoritas, oro y otros metales preciosos, y también con alimentos para garantizar un viaje seguro a la otra vida.

Las tres pirámides de Giza (lugar situado al sur de lo que hoy es El Cairo) fueron construidas hace 4 500 años y recientemente se sugirió que la forma que las caracteriza fue un reflejo de las formaciones rocosas naturales localizadas a unos 480 km al sur, en el Sahara, cerca del oasis Kharga. Hay que recordar que hace 5 000 años toda esta región correspondía a la sabana y no al desierto de la actualidad. Sin embargo, otros historiadores se mantienen en la creencia de que la forma de las pirámides simboliza el ascenso de los faraones hacia el cielo.

Las investigaciones paleontológicas en huesos de animales encontrados en esta región demuestran que sus habitantes comían alimentos de alta calidad, como pescados, carnes rojas y levaduras; con estas últimas fabricaban pan y cerveza. Por lo general, los egipcios de aquel entonces eran saludables, aunque algunos restos óseos muestran ciertas deformaciones, producto, quizá, de haber sido sometidos a esfuerzos físicos intensos.

En el área intelectual fueron siempre innovadores, introdujeron la numeración escrita hace 3 500 años y trabajaron muy bien la piedra, algunos metales y hasta el vidrio, con el cual fabricaron las primeras lentes; también hicieron trabajos con vidrio soplado y además establecieron diversas tradiciones culturales, como la enseñanza, la literatura, el arte, la música, la astronomía y la medicina, las cuales supieron mantener a pesar de las invasiones que más tarde sufrieron. Sus aporta-

ciones científicas fueron tan impresionantes que Alejandría se convirtió en el centro cultural más importante del Mediterráneo. El faro de Alejandría y la gran pirámide de Giza son otras de las siete maravillas del mundo antiguo.

India

El valle fértil del río Indo consiste en un área que se extiende cerca de 1 000 km desde Lahore, en el noreste, hasta Karachi, en el suroeste (ambos sitios localizados en el actual Pakistán), hogar de un gran desarrollo de la agricultura desde el año 8 000 a.C.; ahí se cultivaron trigo y cebada, y se domesticaron ovejas y cabras. Para el año 5 500 a.C. sus habitantes, reconocidos como los fundadores de la cultura índica, fueron capaces de construir edificaciones cerradas para guardar los granos que cultivaban; se familiarizaron también con el uso del cobre y del marfil, y construyeron edificios públicos y adecuados sistemas de drenaje. Sus habitantes desarrollaron también un sistema de pesos y medidas, además de adornarse con objetos de bronce. Comercializaron con una gran cantidad de comunidades circundantes, incluso llegaron a comerciar con los habitantes de Mesopotamia. Es muy claro que esta civilización índica se desarrolló de manera independiente a las de Mesopotamia, Egipto y Creta. Sin embargo, tal como sucedió con los sumerios, la cultura índica no logró perdurar y declinó para el año 1 050 a.C.

China

Esta civilización se desarrolló de forma independiente, sobre todo por cuestiones geográficas, a partir de diversos asentamientos humanos o comunidades agrícolas que poco a poco se fueron transformando en ciudades-estado a lo largo del río Amarillo. En general, al norte domesticaron caballos, ganado vacuno y ovejas, mientras que al sur cultivaron arroz y domesticaron gallinas, otras aves de corral, cerdos y perros. Con todo este apoyo se desarrolló una de las culturas más sofisticadas de la época. Perfeccionaron el uso de la rueda, el bronce, el jade, el marfil y la seda. Practicaron con gran entusiasmo la música y la astronomía.

Mucho tiempo después, en la Edad Media, cuando la mayoría de las civilizaciones europeas se encontraban en una especie de letargo científico y tecnológico, en China florecían la cultura y la tecnología.

Estos acontecimientos demuestran que, por un lado, la falta de desplazamientos humanos no paraliza el desarrollo de innovaciones ideológicas y, por otro, que el aislamiento de influencias externas también puede precipitar la caída de un imperio.

Creta

La cultura minoica data del año 3 000 a.C., lo cual la convierte en la más antigua de Europa, y es una de las culturas más tempranas de la Edad de Bronce. Los minoicos desarrollaron un estilo arquitectónico muy particular, ya que construyeron palacios y no pirámides. Sus cultivos crecían gracias a la importante precipitación pluvial; del mar obtenían una gran variedad de alimentos. En conjunto con los egipcios concentraron en Alejandría una gran variedad de conocimientos científicos y tecnológicos muy importantes, tanto, que Galeno, el médico del emperador Marco Aurelio, frecuentaba la biblioteca de Alejandría con la finalidad de enriquecer sus conocimientos.

América Central

Quizá la cultura más antigua de América Central sea la olmeca, que habitó en la costa este de México, cerca de lo que hoy es Veracruz, hace 3 000 años. Lo más característico de esta cultura son las cabezas olmecas esculpidas en rocas que llegan a pesar hasta 30 toneladas. Los olmecas fueron expertos en el manejo de diversas herramientas y fueron también buenos ingenieros.

Por otro lado, Teotihuacan fue el asentamiento humano más grande de toda América, así como uno de los más antiguos. Estaba localizada a unos 40 km al norte de la ciudad de México y quizá albergó a cerca de 200 000 habitantes. Igual que en las otras ciudades que se desarrollaron en América Central, como los toltecas en el norte, los olmecas en la costa del este y los mayas en la península de Yucatán, la vida en estos lugares se centraba en las edificaciones ceremoniales caracterizadas por un grupo de pirámides y un campo para desarrollar el juego de pelota, favorito de todas estas civilizaciones. El comercio entre estas ciudades era intenso y su cultura y costumbres muy similares. Las pirámides de todos estos centros ceremoniales, más pequeñas que las de Egipto, eran más bien basamentos truncados que no terminaban en un vértice, sino que encima les construían un templo. Teotihuacan sobrevivió cerca de 1 000 años, antes de que fuera invadida por los toltecas cerca del año 750 d.C.; posteriormente sus ruinas fueron redescubiertas por los aztecas en el siglo XV, apenas unos 100 años antes de la llegada de los españoles. Para entonces, los aztecas eran los más poderosos de todas las civilizaciones de América Central e incorporaron mucho de lo que encontraron en Teotihuacan en su propia capital, localizada en la isla de un lago, algo más al sur, denominada Tenochtitlan.

Otra refinada cultura, la de los zapotecos, se desarrolló en una región correspondiente a lo que hoy es el estado de Oaxaca. Alcanzó su punto óptimo entre los años 300 y 400 d.C., después de los cuales empezó a decaer. La posterior lle-

gada de los mixtecos a esta área no logró prevenir su deterioro y la sociedad zapoteca continuó en franco deterioro para el momento en el que invadieron los españoles en el siglo XVI.

Una de las culturas más avanzadas en América Central fue la maya, que se desarrolló en las áreas de Yucatán, Belice, Guatemala y Honduras. Alcanzaron sus mayores logros entre los siglos IV y VIII d.C., con una población que llegó a los 16 millones de habitantes. De manera similar a lo que ocurrió con la cultura zapoteca, la cultura maya declinó al momento de la llegada de los españoles. Los mayas fueron grandes maestros de las observaciones astronómicas, y su calendario llegó a ser más preciso que el juliano de Julio César. Construyeron templos, palacios, pirámides, juegos de pelota y plazas. Adornaron sus edificios con inscripciones que hablan acerca de sus costumbres. Trabajaron muy bien el cobre y el oro y fabricaron papel, con el cual hicieron libros. De hecho, de todas las civilizaciones que se desarrollaron en el continente americano, sólo los mayas (aparentemente) produjeron una escritura, gracias a la cual se sabe más de ellos que de cualquier otra cultura colapsada antes de la llegada de los conquistadores españoles, en el siglo XVI.

América del Sur

La civilización de los incas, con su capital Cuzco, localizada a 3 350 m sobre el nivel del mar, tuvo muy poco contacto (si no es que ninguno) con las civilizaciones de América Central. Se desarrolló de una manera muy diferente a como se desarrollaron los mayas o los aztecas. De hecho, lo único que comparten los incas y los aztecas es que ambos imperios se encontraban en su apogeo cuando sufrieron la conquista de los españoles. Los incas fueron muy hábiles para trabajar textiles altamente decorativos, así como objetos de oro y plata. Lograron establecerse como el imperio más grande de América del Sur y, para el año 1528, sus dominios se extendían desde el norte de Ecuador, pasando a través de todo Perú, hasta el sur Bolivia, llegando a abarcar la región del norte de Argentina y Chile. A lo largo de este vasto territorio fueron capaces de construir una serie de caminos que permitían mantener la comunicación entre varias comunidades. Por cierto, estos caminos fueron recorridos siempre a pie o sobre llamas, pero nunca en carruajes, ya que, al igual que el resto de las culturas de América, no usaron la rueda; curiosamente, sólo la utilizaron en la manufactura de juguetes. Desarrollaron también sistemas de acueductos y de irrigación muy adecuados, llegaron incluso a construir ingeniosos sistemas para almacenar el agua de las lluvias. Las edificaciones de Machu Picchu, que incluyen un palacio y un templo en honor al Sol, son ejemplo de su gran habilidad arquitectónica.

Mucho se ha escrito sobre las hazañas y aventuras de Francisco Pizarro, el conquistador del imperio de los incas, quien en su desesperado afán por encontrar

oro abandonó su estancia en Panamá. Ahora sabemos que Pizarro no actuó solo, sino que intencionalmente mandó a un ejército en avanzada que debilitó a su futuro adversario Atahualpa y sus hombres. El ejército al que me refiero no es el que conocemos, con fuertes hombres armados y caballos, sino al ejército microscópico que llegó a Perú mucho tiempo antes que ellos: el virus de la viruela y del sarampión, que, como en el caso de Hernán Cortés y los aztecas, acabaron con la mayoría de la población antes de que los conquistadores llegaran a las capitales de los imperios correspondientes.

SUERTE PARA UNOS Y DESGRACIA PARA OTROS

Volvamos al origen de la agricultura. Durante la mayor parte del tiempo, desde que los ancestros de los humanos (los homínidos) se separaron en una línea evolutiva diferente de la de los grandes simios, hace aproximadamente siete millones de años, todos obtenían sus proteínas de origen animal a partir de cadáveres (carroña), de la ingesta de insectos, como las termitas (al igual que en la actualidad lo hacen chimpancés y bonobos), y luego a partir de sus presas, como en el caso de los humanos cazadores. Ambos, homínidos y humanos, practicaron la recolección. Así fue desde entonces, hasta que hace apenas 10 000 años algunos grupos de humanos se volvieron a lo que se ha denominado la producción de los alimentos: esto es, la domesticación de animales y el cuidado de las plantas para después alimentarse del resultado de su empeño. Actualmente, la mayoría de los humanos consumen los alimentos que producen ellos mismos u otras personas. Este cambio en el patrón de la alimentación no fue súbito sino gradual; tampoco se dio de manera sincrónica en todos los grupos humanos: algunos de ellos se desintegraron y muchos otros murieron, pero el resultado fue que se dio fin a millones de años caracterizados por llevar un estilo de vida basada en la caza y la recolección.

Diferentes grupos de humanos empezaron la producción de alimentos en diferentes momentos de la prehistoria, aunque algunos, como los aborígenes australianos, nunca la adquirieron por completo. Algunos otros, como los chinos, la desarrollaron de manera totalmente independiente, mientras que otros, como los egipcios, la adoptaron gracias a la influencia de asentamientos humanos vecinos.

Como quiera que hubiera sido, la producción de alimentos se convirtió en un prerequisite indispensable para el desarrollo de las civilizaciones. Ahora sabemos que la producción de alimentos no puede ser igual en todas las regiones de la Tierra, sino que las variaciones geográficas y climatológicas influyen de manera determinante para establecer diferencias en el índice de producción alimenticia, lo cual se traduce en ventajas y desventajas para un grupo de civilizaciones

que para entonces ignoraban estos hechos. Ahora, de entre todas las especies de plantas y animales silvestres, sólo una pequeña minoría ha servido como alimento para los humanos desde que eran cazadores y recolectores, debido que no podían ser digeridos (gracias a la celulosa), eran venenosos (como la mariposa Monarca y una gran variedad de hongos), tenían bajo contenido nutricional (como el aguamala o medusa) y eran difíciles de preparar (como las nueces demasiado pequeñas), cultivar y cuidar (como la mayoría de los insectos), o bien, de cazar (como los rinocerontes); igualmente eran duros de domesticar (como la cebrá y el elefante). La mayoría de la biomasa que existe sobre nuestro planeta se encuentra en forma de troncos y hojas imposibles de masticar y digerir para los seres humanos. Finalmente terminamos alimentándonos de una pequeña proporción de todo lo que conforma a los reinos vegetal y animal.

En lo que respecta a las sociedades humanas, el contar con animales domésticos permitió alimentar a más personas gracias al ordeño de leche con la cual podían nutrirse directamente o mediante sus productos derivados como el yogur, la mantequilla y el queso. Así pues, los animales domésticos se convirtieron en la principal fuente de proteínas de origen animal al reemplazar a la cacería. Entre estos animales están principalmente el cerdo, la vaca, la oveja, la cabra, el pollo, el ganso y el pato. Con la leche, los huevos y otros productos derivados de la domesticación y cuidado de dichos animales, que no llevaban implícito el sacrificio, podían obtenerse más calorías a lo largo de la vida del animal que sólo criarlos para después sacrificarlos y comer su carne.

Otra gran ventaja que proporcionaron los grandes mamíferos, además de poderse alimentar de ellos, fue que podían ser utilizados como ayuda en la producción de alimentos provenientes de la agricultura, ya que eran y siguen siendo de gran utilidad para el arado de los campos de cultivo y como fuente de fertilizantes derivados de sus excretas.

Todas estas innovaciones derivadas, ya sea de manera directa o mediante la interacción de la agricultura y la ganadería, les permitieron a las comunidades del pasado contar con alimentos para poblaciones cada vez más numerosas, mucho más de lo que se podría haber logrado con los grupos más avezados de cazadores y recolectores. Los grupos de humanos optaron, con sobrada razón, por un estilo de vida sedentaria, que a su vez brindó un reforzamiento positivo para la producción de alimentos, pues más gente podía dedicarse a esos menesteres. El resultado final contribuyó a un incremento en la densidad de población y a un decremento en el intervalo de nacimiento entre un hijo y otro. Previamente, una madre dedicada a la caza y a la recolección podía cargar sólo a un hijo junto con algunas escasas pertenencias. Era imposible llevar consigo a otro recién nacido o lactante menor a menos que el primero ya pudiera caminar lo suficientemente rápido como para seguir y permanecer con la tribu nómada, sin quedarse rezagado. Se calcula que el espacio de tiempo comprendido entre un hijo y otro, para entonces,

era de cuatro años (por lo menos), y que el control de la natalidad no podía ser otro sino alguna de las siguientes posibilidades: amenorrea por la lactancia, abstinencia sexual y, aunque no precisamente como control de natalidad pero sí como métodos para reducir el número de hijos, aborto, infanticidio e incluso abandono de crías. En contraste, los humanos que se convirtieron al sedentarismo podían tener tantos hijos como pudieran alimentar mediante la agricultura y la ganadería de la comunidad. De esta manera, el intervalo comprendido entre un hijo y otro pudo reducirse fácilmente a dos años, la mitad del tiempo referido para los grupos nómadas y obviamente con la posibilidad de tener y mantener a por lo menos el doble de hijos.

Una más de las grandes innovaciones desarrolladas por las primeras poblaciones de humanos sedentarios fue la capacidad de almacenar grandes cantidades de alimentos en lugares protegidos del sol y la lluvia. Los cazadores y recolectores no podían más que acarrear cantidades regulares de alimentos recolectados en algún tipo de bolsas, mismos que resultaban insuficientes para un gran grupo. En cambio, el hecho de contar con la capacidad de almacenamiento permitió que algunos individuos pudieran desempeñarse en otras funciones sociales, ya que los productores de alimentos eran tan eficientes que sus cosechas rebasaban las necesidades alimenticias y así todo el sobrante podía ser almacenado para un futuro próximo.

De manera independiente a los agricultores y ganaderos, fueron los reyes, burocratas y guerreros los primeros en especializarse en diferentes actividades sociales y cívicas; de esta manera fue estableciéndose poco a poco y lentamente una organización política dentro de las pequeñas tribus. Lo anterior no lo pudieron hacer los cazadores y recolectores dado que tenían que invertir mucho tiempo y cooperación igualitaria en la adquisición de sus alimentos; por el contrario, una vez que pudieron almacenarse los frutos de las cosechas, y una vez que se utilizaron los productos de los animales vivos para la obtención de nutrimentos, la élite política empezó a tomar el control de la producción de alimentos realizada por otras personas. Escaparon de la necesidad de producir sus propios alimentos y ese pequeño grupo de políticos empezaron a dedicarse sólo a sus actividades. Con el tiempo, las sociedades se volvieron cada vez más complejas y mucho tiempo después aparecieron imperios en algunas partes del mundo.

No hay que perder de vista que la agricultura y la ganadería sirvieron no sólo para la alimentación de un grupo poblacional sino que también diversos productos derivados de las mismas pudieron ser utilizados para ropa, calzado, manufactura de diversos utensilios y construcción de viviendas. Además, algunos animales empezaron a utilizarse como medios de transporte, con el caballo, el camello, el elefante y el burro. En este momento, vale la pena recordar, que no todos los asentamientos humanos distribuidos por el mundo contaron con los mismos recursos naturales en un momento dado, sino que, como se mencionó en el capítulo

anterior, los animales Afroterios se localizaron en África y los Laurasiaterios en Eurasia; los últimos tuvieron mayor trascendencia, pues competían al caballo, al camello y a otros de particular importancia para la domesticación, mientras que en otras regiones del mundo dichos animales no existían; tal es el caso de Australia y la mayor parte de América, y estaban ausentes no sólo por razones evolutivas, sino porque en algunas regiones ya se habían exterminado previamente. Así como los canguros y la nuez de macadamia son típicos de Australia, el frijol, el maíz, la calabacita y el guajolote eran típicos de América Central, donde no se conocía una gran variedad de cereales, los cerdos, los caballos, las vacas ni los pollos, entre otros.

Ahora podemos ir anticipando los factores que según Jared Diamond fueron dando forma a las distintas civilizaciones que poblaron el mundo: geografía; clima; especies susceptibles de ser domesticadas; producción, almacenamiento y distribución de alimentos; sociedades grandes, sedentarias y estratificadas; desarrollo de tecnología, como herramientas de supervivencia, transporte y armas. Todo en conjunto fue proporcionando, desde entonces, ciertas ventajas de unas sociedades sobre otras.

Desafortunadamente no todo fue felicidad. Cuando el hombre era cazador y recolector, el promedio de vida se encontraba entre los 30 y 40 años; la gente moría por esfuerzos físicos excesivos, fracturas, caídas, o en el caso de las mujeres, por complicaciones debidas al parto; las personas fallecían por causas naturales propias del envejecimiento o como víctimas de algún depredador; también era común la desnutrición, pero en general los nómadas eran bastante sanos. Dado que no permanecían largas temporadas en un solo lugar, y también debido a que los grupos poblacionales eran reducidos, las enfermedades infecciosas y contagiosas eran raras y, si en un momento dado surgía una epidemia, se limitaba rápidamente gracias a la baja densidad de población. Con la agricultura y la ganadería, en conjunto con el incremento en la población, los padecimientos infectocontagiosos llegaron para quedarse y para amenazarnos hasta nuestros días. Los primeros grupos de humanos que domesticaron aves, como la gallina, el pato y el ganso, y cerdos se infectaron con los virus de la influenza o gripe; miles de humanos murieron, con toda seguridad, por complicaciones de esa infección; y lo mismo le ocurrió al ganado vacuno con la viruela y a los cerdos con la cisticercosis. El incremento en la densidad de población y los muy bajos o nulos conocimientos sobre higiene favorecieron para entonces la rápida propagación de las enfermedades provenientes de los animales domesticados. Seguramente muchos murieron víctimas de esos padecimientos. Los que lograron sobrevivir fue gracias a la adecuada respuesta de su sistema inmunitario, los cuales lograron transmitir a su vez las características inmunitarias favorables a sus hijos, nietos y demás descendencia, de tal manera que de los primeros humanos que entraron en contacto con esos gérmenes, algunos generaron anticuerpos y resistencias, lo cual les permitió con-

tinuar conviviendo entre sí y con los animales domésticos responsables del contagio inicial. Cuando estas personas inmunizadas entraron en contacto con otras que no lo estaban los resultados fueron catastróficos para las segundas, ya que en ellas se desarrollaron las grandes epidemias que provocaron la muerte de cerca de 99% de la población no expuesta.

Como podemos ir anticipando, los gérmenes adquiridos a partir de los animales domésticos tuvieron una función decisiva en la conquista de los europeos sobre los nativos americanos.

En resumen, la domesticación significó algo mucho más allá que alimentar a una población cada vez más numerosa. El resultado de poder almacenar alimentos y utilizar a los animales con fines diferentes de la alimentación (arado, transporte y otros) consistió en el desarrollo de una sociedad más organizada, socialmente estratificada, económicamente más compleja y con el poder de innovar tecnología. Así, la disposición de la domesticación explica por qué fue en Eurasia donde se desarrollaron los imperios, la literatura, la cultura y las armas poderosas, mientras que en los otros continentes no fue así. Lo desafortunado del caso fue que mucha tecnología, animales como los caballos o camellos e incluso los mismos gérmenes fueron utilizados con fines bélicos para conquistar a otros pueblos que no contaron con la misma suerte. Está bien asentado en los libros escritos durante la conquista de América que los europeos distribuían entre los nativos americanos las ropas de individuos que habían muerto a causa de la peste o la viruela, quedando este hecho para la historia como una de las primeras guerras en las que fueron utilizadas armas biológicas.

Volviendo a nuestras preguntas iniciales de dónde y cuándo empezó la producción de alimentos mediante la agricultura y la ganadería en diferentes partes del globo terráqueo, podemos decir que fueron cinco los lugares en donde se inició, independientemente de los cultivos indígenas y la domesticación de animales nativos, y antes de la llegada de cualquier otro espécimen extraño: suroeste de Asia (también llamado Cercano Oriente o Creciente Fértil), China, Mesoamérica, región de los Andes sudamericanos y quizá la región amazónica de Brasil. El “cuándo” es variable, por ejemplo, en el Cercano Oriente fue hace 8 500 años, en China hace 7 500 años y en Mesoamérica, los Andes y la Amazonia hace 3 500 años. Ahora, no en todos esos lugares se cultivaron las mismas plantas ni tampoco se domesticaron los mismos animales; por ejemplo, en el Cercano Oriente se cultivaron aceitunas, chícharos y trigo, y se domesticaron ovejas y cabras; en China se cultivaron arroz y sorgo, y se domesticaron cerdos y gusanos de seda; en Mesoamérica se cultivaron frijol, maíz y calabacita, y se domesticó al guajolote; y en los Andes y la región del Amazonas se cultivaron papa y camote, y se domesticaron llamas y conejillos de Indias (figura 4–8).

Existen otras tres zonas importantes que iniciaron también la producción de alimentos: el oeste de Europa, Egipto y el Valle del Indo. A diferencia de las pre-

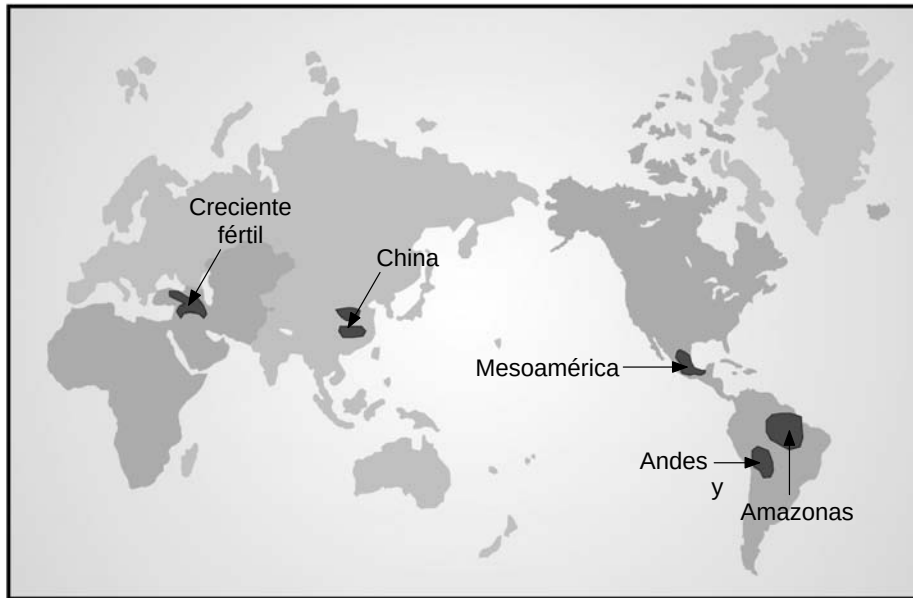


Figura 4–8. Principales centros en donde se inició con la producción de alimentos.

vias, éstas lo hicieron de manera sincrónica hace unos 6 000 años. Sin embargo, y contrario a las cinco primeras, lo hicieron incorporando a su producción ciertas plantas y animales no nativos, como la amapola, la avena, la chufa, la berenjena, el ajonjolí, el plátano de Oriente (falso plátano), la vaca, el gato y el burro.

A partir de este punto, con asentamientos humanos bien establecidos desarrollándose en civilizaciones cada vez más complejas, el destino fue muy diferente para todos. Las condiciones climatológicas y geográficas de Eurasia le permitieron repuntar en lo científico, lo tecnológico y lo cultural; éste fue el lugar que contó con el mayor número de plantas y animales domesticables, y que sumado a las condiciones ambientales favorables logró desarrollar grandes cultivos con vastas cosechas y granjas que le permitieron contar con una reserva alimenticia abundante. Con la preocupación por el alimento resuelta, los habitantes de Eurasia tuvieron tiempo para pensar. Muchos quedaron libres del arduo trabajo del campo y del cuidado de las bestias y pudieron sentarse a filosofar. Sócrates, Platón, Aristóteles y Confucio son algunos ejemplos. En otros sitios no se corrió con la misma suerte. Hasta hace relativamente poco tiempo, los aborígenes australianos seguían viviendo exactamente igual que como quizá lo hacían hace 5 000 años. Lo mismo se puede decir de algunas comunidades de África y Nueva Guinea. Los mayas de América Central gozaron de ser una de las civilizaciones más avanzadas de su época; sin embargo, se colapsaron debido a varias hipótesis:

unos científicos dicen que fueron los cambios climatológicos con largas épocas de sequía lo que los hizo emigrar de sus comunidades; otros abogan, basándose en estudios paleontológicos, que los mayas abusaron de su medio ambiente y destruyeron la ecología de sus alrededores que durante un buen tiempo fue la principal fuente de sustento, y erosionaron las colinas circundantes; unos más apuestan que la ruina la causó el sobrado interés de sus gobernantes y sacerdotes de desviar recursos para apoyar al ejército, o sea que le dieron más importancia a las guerras y al dominio de sus enemigos que a los cuidados de sus comunidades; pero quizá su ruina fue el resultado de la mezcla de varios de los factores mencionados.

Con más tiempo para pensar, los euroasiáticos desarrollaron herramientas y armas, medios de transporte, como carros, carretas, coches de caballos o diligencias (los carros más antiguos conocidos corresponden a la época del antiguo Egipto), y barcos de remos y de vela. Hay que mencionar que cerca del año 2 600 a.C. los fenicios le vendían barcos fabricados de cedro blanco del Líbano a Egipto. Uno de los barcos fenicios más conocidos era el gauloi, que medía entre 20 y 30 m de largo (eslora) y 7 de ancho (manga), tenía la popa en forma de cola de pescado y la proa en forma de cabeza de caballo, y utilizaban remeros esclavos; estos barcos aprovechaban la fuerza del viento por medio de velas rectangulares y, dado el diseño de su casco, tenían una gran capacidad de carga, situación aprovechada para comerciar a través del mar Mediterráneo. La disposición geográfica de Eurasia y su relación con el mar Mediterráneo también fue un factor que favoreció a este continente en su desarrollo científico y tecnológico, ya que contar con un eje mayor dispuesto a lo largo de los paralelos 20° N y 60° N les permitió llevar a cabo el comercio y el intercambio de ideas entre civilizaciones. No fue igual para América, ya que el eje mayor (desde el punto de vista geográfico) se encuentra localizado en sentido norte-sur, con grandes extensiones de tierra desértica en el medio, sin un mar en el centro que permitiera el transporte de cuantiosas y pesadas cargas, y con unas cordilleras y selvas prácticamente impenetrables, como las de los Andes y la Amazonia.

Todo se resume a la evolución y a la geografía. Las diferencias que fueron estableciéndose entre las civilizaciones del mundo surgieron por la variedad geográfica y por la diversidad de la flora y la fauna de determinadas regiones, a disposición de sus habitantes.

Por otro lado, hay que reconocer que existieron zonas en el mundo que no pudieron ser conquistadas por los euroasiáticos. En específico las regiones tropicales. La razón: no pudieron acostumbrarse a las largas temporadas de lluvias que contrastaban con el clima al que ellos estaban habituados. Tampoco lograron salir bien librados de algunas infecciones como el dengue, el mal de Chagas (tripanosomiasis brasileña o americana), el mal del sueño (tripanosomiasis africana, transmitida por la picadura de la mosca tsé-tsé) y el paludismo. Los humanos que

mucho tiempo atrás habitaron en las regiones tropicales aprendieron a vivir con la amenaza de enfermedades e infecciones tomando medidas preventivas, producto de su larga experiencia, como el establecimiento de sus comunidades lejos de los ríos (evitando los lugares infestados de mosquitos), la reducción de habitantes en sus aldeas (así se elimina la posibilidad de una epidemia de grandes proporciones), la manutención de un pequeño fuego para que su humo alejara a los insectos y otra serie de medidas que los europeos ignoraban.

EPÍLOGO

Hace algunos años nació en mí una marcada inquietud por saber acerca de nuestro origen. Tuve el deseo de conocer más a fondo de dónde venimos. Para entonces tenía una vaga idea del tiempo que debió haber transcurrido desde el origen de la vida hasta la aparición de nuestra especie y, por otro lado, no tenía noción de qué factores fueron los que nos dieron forma y función. Sentí que, por lo general, no son temas del dominio público, por varias razones. Así que me di al trabajo de investigar al respecto, en la literatura científica. Después de consultar varias revistas, libros, museos y documentales empecé a formar una idea de cómo se dieron las cosas para que el hombre apareciera sobre la Tierra. No encontré algún libro que sintetizara la mayoría de los aspectos, desde la teoría de la evolución hasta el origen del hombre pasando por los aspectos genéticos, moleculares y ambientales, ni que incluyera un repaso sobre lo sucedido en el ámbito de la historia natural. Así surgió este proyecto, al tratar de sintetizar en un solo volumen lo que sucedió para dar lugar a los humanos. Mi deseo fue ofrecer al lector un libro donde pueda encontrar respuestas a algunas de las preguntas más difíciles, las que tratan precisamente sobre nuestros ancestros. Al mismo tiempo me percaté de que al entender nuestro pasado biológico y social se entiende mejor el presente; pero lo mejor de todo es que nos sirve de experiencia para proyectarnos a un futuro más alentador. Finalmente decidí escribir la recopilación para compartirla con el lector. Espero, sinceramente, que este libro sirva para orientar al interesado en estos temas y que no sea aquí donde se detenga su investigación, sino que continúe en busca de lo más cercano a la verdad y al conocimiento científico.

Referencias

Introducción

1. **Garlick MA:** *The expanding universe*. Londres, Dorling Kindersley, 2002.
2. **Goldsmith D, Tyson NG:** *Origins, fourteen billion years of cosmic evolution*. Nueva York, W. W. Norton, 2004.
3. **Ward PD, Brownlee D:** *Rare earth, why complex life is uncommon in the universe*. Nueva York, Copernicus, 2000.
4. **Powell JL:** *Mysteries of terra firma, the age and evolution of the earth*. Nueva York, The Free Press, 2001.
5. **Fortey R:** *Earth, an intimate history*. Nueva York, Alfred A. Knopf, 2004.
6. **Charlesworth B, Charlesworth D:** *Evolution, a very short introduction*. Nueva York, Oxford, 2003.
7. **Marks J:** *What it means to be 98% chimpanzee, apes, people, and their origins*. Berkley Los Ángeles, University of California Press, 2003.
8. **Mills CL:** *The theory of evolution, what it is, where it came from and why it works*. Nueva Jersey, Wiley, 2004.
9. **Kuhn TS:** Artículo en: Microsoft Corporation, *Encarta*, Biblioteca de Consulta, 2003.

De la teoría de la evolución

10. **Eldredge N:** *Darwin, discovering the tree of life*. Nueva York, W. W. Norton, 2005.
11. **Wilson EO:** *From so simple a beginning, the four great books of Charles Darwin*. Nueva York, W. W. Norton, 2006.
12. **Jones S:** *Darwin's ghost, the origin of species updated*. Nueva York, Random House, 2000.
13. **Mills CL:** *The theory of evolution, what it is, where it came from and why it works*. Nueva Jersey, Wiley, 2004.

14. **Keynes R:** *Darwin, his daughter & human evolution*. Nueva York, Riverhead Books, 2001.
15. **Weiner J:** *Tiempo, amor, memoria, en busca de los orígenes del comportamiento*. Barcelona, Galaxia Gutenberg, Círculo de Lectores, 2001.
16. **Eldredge N:** *The pattern of evolution*. Nueva York, W. H. Freeman, 2000.
17. **Eldredge N:** *The triumph of evolution and the failure of creationism*. Nueva York, W. H. Freeman, 2000.
18. **Zimmer C:** *Evolution, the triumph of an idea*. Nueva York, Harper Collins, 2001.
19. **Watson JD:** *DNA, the secret of life*. Nueva York, Alfred A. Knopf, 2003.

De la esencia de la evolución

20. **Keller E:** *The century of the gene*. Cambridge, Harvard University Press, 2000.
21. **Ridley M:** *Genome, the autobiography of a species in 23 chapters*. Nueva York, Harper Collins, 1999.
22. **Caporale LH:** *Darwin in the genome, molecular strategies in biological evolution*. Nueva York, McGraw-Hill, 2002.
23. **Kirschner MW, Gerhart JC:** *The plausibility of life, resolving Darwin's dilemma*. London, Yale University Press, 2005.
24. **Schwartz JH:** *Sudden origins, fossils, genes, and the emergence of species*. Nueva York, John Wiley and Sons, 1999.
25. **Wallace A:** *Animal body plans, a study in evolutionary developmental biology*. Nueva York, Cambridge University Press, 2000.
26. **Carroll SB, Grenier J., Weatherbee SD:** *From DNA to diversity, molecular genetics and the evolution of animal design*. Nueva York, Blackwell, 2005.
27. **Carroll SB:** *Endless forms most beautiful, the new science of evo devo*. Nueva York, W. W. Norton, 2005.
28. **Niehoff D:** *The language of life, how cells communicate in health and disease*. Washington, Joseph Henry Press, 2005.
29. **Jablonka E, Lamb MJ:** *Evolution in four dimensions, genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life*. Cambridge, The MIT Press, 2005.

De la historia natural

30. **Smith JM, Szathmáry E:** *The origins of life, from the birth of life to the origin of language*. Nueva York, Oxford University Press, 1999.
31. **Adams F:** *Origins of existence, how life emerged in the universe*. Nueva York, The Free Press, 2002.
32. **Wills C, Bada J:** *The spark of life, Darwin and the primeval soup*. Cambridge, Perseus, 2000.
33. **Margulis L, Dolan MF:** *Early life, evolution on the precambrian earth*. Boston, Jones and Bartlett, 2002.
34. **Margulis L, Sagan D:** *What is life?* Berkley Los Ángeles, University of California Press, 1995.
35. **Margulis L, Sagan D:** *Acquiring genomes, a theory of the origins of species*. Nueva York, Basic Books, 2002.

36. **Capra T:** *The web of life, a new scientific understanding of living systems*. Nueva York, Anchor Books, 1996.
37. **De Duve C:** *Life evolving, molecules, mind, and meaning*. Nueva York, Oxford University Press, 2002.
38. **Fortey R:** *Life, a natural history of the first four billion years of life on earth*. Nueva York, Vintage, 1997.
39. **Dawkins R:** *The ancestor's tale, a pilgrimage to the dawn of evolution*. Nueva York, Houghton Mifflin, 2004.

Del origen del hombre a la distribución y destino de los humanos

40. **Stringer C, Andrews P:** *The complete world of human evolution*. Nueva York, Thames & Hudson, 2005.
41. **Gibbons A:** *The first human, the race to discover our earliest ancestors*. Nueva York, Doubleday, 2006.
42. **Stanford C:** *Upright, the evolutionary key to becoming human*. Boston, Houghton Mifflin, 2003.
43. **Trevathan WR, Smith EO, McKenna JJ:** *Evolutionary medicine*. Nueva York, Oxford University Press, 1999.
44. **Ridley M:** *Nature via nurture, genes, experience, & what makes us human*. Nueva York, Harper Collins, 2003.
45. **Marcus G:** *The birth of the mind, how a tiny number of genes creates the complexities of human thought*. Nueva York, Basic Books, 2004.
46. **LeDoux J:** *Synaptic self, how our brains become who we are*. Nueva York, Viking, 2002.
47. **De Waal F:** *Our inner ape, a leading primatologist explain why we are who we are*. Nueva York, Riverhead, 2005.
48. **Berger LR:** *In the footsteps of Eve, the mystery of human origins*. Washington, National Geographic Adventure Press, 2000.
49. **Pasternak C:** *Quest, the essence of humanity*. Chichester, Wiley, 2004.
50. **Diamond J:** *Guns, germs, and steel, the fates of human societies*. Nueva York, W. W. Norton, 1999.
51. **Diamond J:** *Collapse, how societies choose to fail or succeed*. Nueva York, Penguin, 2005.

