

Para Dick Lewontin
il miglior fabbro

Índice

Prefacio

Introducción

1. ¿Qué es la evolución?
2. Escrito en las rocas
3. Reliquias: vestigios, embriones y mal diseño
4. La geografía de la vida
5. El motor de la evolución
6. El sexo como motor de la evolución
7. El origen de las especies
8. ¿Y nosotros?
9. A vueltas con la evolución

Glosario

Sugerencias de lectura

Fuentes

Prefacio

20 de diciembre de 2005. Como muchos otros ciudadanos de Estados Unidos, aquel día me levanté embargado por la ansiedad. El juez John Jones III, un juez federal de Harrisburg, en el estado de Pensilvania, iba a emitir sentencia sobre el caso Kitzmiller et al. contra el Distrito Escolar de la región de Dover et al. Aquel juicio se había convertido en un punto de inflexión: la sentencia de Jones iba a decidir cómo aprenderían la evolución los niños y niñas de Estados Unidos.

La crisis educativa y científica había comenzado de forma humilde cuando los administradores del distrito escolar de Dover, en Pensilvania, se reunieron para discutir qué libros de texto debían encargarse para la escuela secundaria de su área. Algunos miembros religiosos del comité escolar, insatisfechos con el texto utilizado hasta entonces por adherirse a la evolución darwinista, sugirieron como alternativa libros que incluían la teoría bíblica del creacionismo. Tras discutir acaloradamente sobre el asunto, el comité decidió exigir a los profesores de biología de Dover High que leyeran la siguiente resolución en sus clases de bachillerato:

Los Currículos Académicos de Pensilvania requieren que los estudiantes aprendan la Teoría de la Evolución de Darwin y que sean examinados sobre un temario oficial del que forma parte la evolución. Dado que la Teoría de Darwin es una teoría, sigue siendo contrastada a medida que se realizan descubrimientos. La Teoría no es un hecho contrastado: existen en ella lagunas no respaldadas por observaciones... El diseño inteligente es una explicación del origen de la vida que difiere de la ofrecida por Darwin. El libro de referencia, Of Pandas and People, se encuentra a disposición de los estudiantes que deseen explorar este punto de vista con la intención de entender mejor en qué consiste el diseño inteligente. Como con todas las teorías, se anima a los estudiantes a mantener una posición abierta.

Esta declaración desató una feroz tormenta en la educación. Dos de los nueve miembros del comité escolar dimitieron, y todos los profesores de biología se negaron a leer la resolución en sus clases, alegando que el «diseño inteligente» no era ciencia sino religión. Como la instrucción religiosa en las escuelas públicas constituye una violación de la Constitución de Estados Unidos, once padres, indignados, llevaron el caso a los tribunales.

El juicio comenzó el 26 de septiembre de 2005 y duró seis semanas. Fue un proceso espectacular que con razón recibió el apelativo de «juicio Scopes del siglo» por referencia al famoso juicio de 1925 en el que un profesor de secundaria, John Scopes, de la ciudad de Dayton, en Tennessee, fue declarado culpable por enseñar que los seres humanos habían evolucionado. La prensa nacional descendió a la soñolienta ciudad de Dover igual que ochenta años antes había descendido a la soñolienta ciudad de Dayton. Al lugar se acercó incluso un tataranieta de Darwin, Matthew Chapman, decidido a recoger datos para un libro sobre el proceso.

Fue una derrota aplastante. La acusación fue astuta y estaba bien preparada; la defensa, mediocre. El único científico dispuesto a testificar para la defensa admitió que su definición de «ciencia» era tan amplia que podía incluir incluso la astrología. Al final, quedó demostrado que *Of Pandas and People* no era más que una chapuza, un libro creacionista en el que simplemente se había sustituido «creación» por «diseño inteligente».

Pese a ello, la sentencia no estaba cantada. El juez Jones había sido designado por George W. Bush, y era una persona religiosa, devota, y un republicano conservador, lo que no conforma precisamente unas credenciales pro darwinistas.

Sin embargo, cinco días antes de Navidad, el juez Jones emitió su veredicto a favor de la evolución. No se anduvo con chiquitas. Dictaminó que la política del comité escolar era de una «sobrecogedora inanidad», que los defensores habían faltado a la verdad cuando dijeron que no los movían motivaciones religiosas, y, lo más importante, que el diseño inteligente era creacionismo reciclado:

Es nuestra opinión, un observador sensato y objetivo, después de recibir el voluminoso sumario de este caso y nuestra exposición, alcanzaría ineludiblemente la conclusión de que el DI es un argumento teológico interesante, pero que no es ciencia... En

resumen, la resolución de advertencia [del comité escolar] presenta la teoría de la evolución como necesitada de un tratamiento especial, presenta de manera equívoca su estatus en la comunidad científica, incita a los estudiantes a dudar de su validez sin justificación científica, presenta a los estudiantes una alternativa religiosa disfrazada de teoría científica, los induce a consultar un texto creacionista [Of Pandas and People] como si fuera una fuente de información científica, e instruye a los estudiantes para que renuncien al método científico en las clases de las escuelas públicas y en su lugar busquen instrucción religiosa en otro sitio.

Jones también rechazó la pretensión de la defensa de que la teoría de la evolución era irremediabilmente errónea:

No cabe duda de que la teoría de la evolución de Darwin es imperfecta. Sin embargo, el hecho de que una teoría científica no pueda explicar todavía todas las observaciones no puede utilizarse como pretexto para colar en las clases de ciencia una hipótesis alternativa no contrastable y basada en la religión con la intención de distorsionar unas proposiciones científicas bien establecidas.

Pero la verdad científica la deciden los científicos, no los jueces. Lo que Jones hizo fue simplemente impedir que una verdad establecida quedase oscurecida por unos oponentes dogmáticos y sesgados. Con todo, su veredicto fue una espléndida victoria para los escolares norteamericanos, para la evolución y, desde luego, para la ciencia.

Pero no era momento de regodeos. Ésta no iba ser la última batalla que habría que librar para evitar que en las escuelas se censure la evolución. A lo largo de más de veinticinco años de docencia y defensa de la biología evolutiva, he aprendido que el creacionismo es como el payaso tentetieso con el que solía jugar de niño: cuando lo golpeas, cae por un momento, pero siempre vuelve a incorporarse. Y aunque el juicio de Dover es una historia americana, el creacionismo no se limita a Estados Unidos. Los creacionistas, que no necesariamente son cristianos, están echando

raíces en otras partes del mundo, sobre todo en el Reino Unido, en Australia y en Turquía. La batalla por la evolución no parece tener fin. Forma parte de una guerra más amplia, una guerra entre la racionalidad y la superstición. Lo que está en juego no es sino la propia ciencia y todos los beneficios que ofrece a la sociedad.

El mantra de los oponentes a la evolución, en Estados Unidos o en cualquier otro lugar, es siempre el mismo: «La teoría de la evolución está en crisis». Lo que se quiere decir es que hay algunas observaciones profundas de la naturaleza que entran en conflicto con el darwinismo. Pero la evolución es mucho más que una teoría, cuanto menos una teoría en crisis. La evolución es un hecho. Y lejos de arrojar dudas sobre el darwinismo, las pruebas realizadas por los científicos durante el último siglo y medio la apoyan totalmente, muestran que la evolución se produjo, y que se produjo en gran medida tal como Darwin había propuesto, a través de la selección natural.

Este libro presenta las principales líneas de evidencia de la evolución. Para quienes se oponen al darwinismo sólo por una cuestión de fe, ninguna cantidad de pruebas servirá para cambiarlos: su creencia no está fundamentada en la razón. Pero los muchos que dudan, o que aceptan la evolución pero no están seguros de cómo defenderla, hallarán en esta obra un resumen sucinto de por qué la ciencia reconoce en la evolución una verdad científica. Lo escribo con la esperanza de que gentes de cualquier parte del mundo puedan compartir mi asombro ante el enorme poder explicativo de la evolución darwinista, y puedan enfrentarse a sus implicaciones sin temor.



Todo libro sobre biología evolutiva es necesariamente una colaboración, pues esta disciplina engloba áreas tan diversas como la paleontología, la biología molecular, la genética de poblaciones y la biogeografía; ninguna persona podrá nunca dominarlas todas. Me siento agradecido por la ayuda y consejos que me han brindado muchos

colegas, quienes con paciencia me han enseñado y corregido mis errores. La lista incluye a Richard Abbott, Spencer Barrett, Andrew Berry, Deborah Charlesworth, Peter Crane, Mick Ellison, Rob Fleischer, Peter Grant, Matthew Harris, Jim Hopson, David Jablonski, Farish Jenkins, Emily Kay, Philip Kitcher, Rich Lenski, Mark Norell, Steve Pinker, Trevor Price, Donald Prothero, Steve Pruett-Jones, Bob Richards, Callum Ross, Doug Schemske, Paul Sereno, Neil Shubin, Janice Spofford, Douglas Theobald, Jason Weir, Steve Yanoviak y Anne Yoder. Mis disculpas a aquellos cuyo nombre haya omitido sin darme cuenta y exculpo a todos, salvo a mí mismo, de los errores que hayan quedado. Estoy especialmente agradecido a Matthew Cobb, Naomi Fein, Hopi Hoekstra, Latha Menon y Brit Smith, que leyeron y criticaron el manuscrito completo. El libro se hubiera resentido notablemente sin el duro trabajo y visión artística de la ilustradora Kalliopi Monoyios. Por último, deseo expresar mi agradecimiento a mi agente, John Brockman, quien se mostró de acuerdo en que la gente tiene que conocer las pruebas de la evolución, y a mi editora en Viking Press, Wendy Wolf, por su ayuda y apoyo.

Introducción

Darwin importa porque la evolución importa. La evolución importa porque la ciencia importa. La ciencia importa porque es la historia preeminente de nuestra época, una saga épica sobre quiénes somos, de dónde venimos y adónde vamos.

Michael Shermer

De todas las maravillas que la ciencia ha revelado sobre el universo en que vivimos, nada ha causado mayor fascinación ni mayor furia que la evolución. Quizá sea porque ninguna galaxia majestuosa, ningún fugaz neutrino tiene implicaciones tan personales. El conocimiento de la evolución tiene la virtud de transformarnos de una manera muy profunda. Nos enseña el lugar que ocupamos en el espléndido y extraordinario espectáculo de la vida. Nos une a todos los seres que habitan hoy en la Tierra y a los innumerables seres que se extinguieron hace mucho tiempo. La evolución nos ofrece un relato cierto de nuestros orígenes que sustituye a los mitos que durante miles de años colmaron nuestra curiosidad. A algunas personas esto les resulta profundamente perturbador; a otras, inefablemente excitante.

Charles Darwin, que naturalmente pertenecía al segundo grupo, expresó la belleza de la evolución en el famoso párrafo final del libro con el que comenzó todo esto, *El origen de las especies* (1859):

Hay grandeza en esta concepción de que la vida, con sus diferentes fuerzas, ha sido alentada en un corto número de formas o en una sola, y que, mientras este planeta ha ido girando según la constante ley de la gravitación, se han desarrollado y se están desarrollando, a partir de un principio tan sencillo, las formas más bellas y portentosas.

Pero hay más razones para el asombro, pues el *proceso* de la evolución, la selección natural, que es el mecanismo que llevó a la primera molécula desnuda con capacidad para replicarse hasta la diversidad de millones de formas fósiles y vivas, es de una simplicidad y belleza prodigiosas. Sólo quienes entienden cómo funciona pueden experimentar el asombro y la admiración que produce saber que un proceso tan simple produjo caracteres tan diversos como la flor de la orquídea, el ala del murciélago o la cola del pavo real. El propio Darwin, embargado de paternalismo Victoriano, describe esta sensación en *El origen*:

Cuando no contemplemos ya un ser orgánico como un salvaje contempla a un barco, como algo completamente fuera de su comprensión; cuando miremos todas las producciones de la naturaleza como seres que han tenido una larga historia; cuando contemplemos todas las complicadas conformaciones e instintos como el resumen de muchas disposiciones útiles todas a su poseedor, del mismo modo que una gran invención mecánica es el resumen del trabajo, la experiencia, la razón y hasta de los errores de numerosos obreros; cuando contemplemos así cada ser orgánico, ¡cuánto más interesante —hablo por experiencia— se hará el estudio de la Historia Natural!

Se ha dicho de la evolución que es la mejor idea que nadie haya tenido nunca. Pero, siendo como es hermosa, es mucho más que una idea. Es una idea verdadera. Y aunque no sea original de Darwin, la gran cantidad de pruebas empíricas que logró acumular convencieron a la mayoría de los científicos, y a muchas personas cultas, de que la vida había evolucionado. Hicieron falta diez años desde la publicación de *El origen de las especies* en 1859. Sin embargo, durante muchos años después los científicos todavía se mostraban escépticos acerca de la innovación fundamental de Darwin: la teoría de la selección natural. Si realmente hubo algún tiempo en que el darwinismo fue «sólo una teoría», o estuvo «en crisis», fue durante la segunda mitad del siglo XIX, cuando las pruebas de los mecanismos de la evolución no eran claras, y los medios que la permitían (la genética) era todavía una cuestión oscura. Todo ello quedó aclarado por fin durante las primeras décadas del siglo XX, y desde

entonces las pruebas a favor de la evolución y de la selección natural no han hecho más que crecer, aplastando toda oposición al darwinismo. Aunque los científicos han descubierto muchos fenómenos que Darwin ni siquiera había imaginado, por ejemplo cómo discernir parentescos evolutivos a partir de secuencias de ADN, en buena medida la teoría presentada en *El origen de las especies* conserva su validez. En la actualidad, los científicos están tan convencidos del darwinismo como de la existencia de los átomos o de que los microorganismos son causa de enfermedades infecciosas.

Entonces, ¿por qué necesitamos un libro que aporte pruebas a favor de una teoría que ya hace mucho tiempo forma parte del cuerpo de conocimiento de la ciencia? Nadie escribe libros para explicar las pruebas a favor de la existencia de los átomos o de la teoría microbiana de la enfermedad. ¿Qué hace tan distinta la teoría de la evolución?

Nada, y todo. Es cierto que la evolución está tan sólidamente establecida como cualquier otro hecho científico (o sea que, como veremos, no es «sólo una teoría»), y que no es necesario convencer a los científicos. Pero fuera de los círculos científicos no ocurre lo mismo. Para muchos, la evolución erosiona su sentido de identidad. Si la evolución ofrece alguna lección, ésta es, al parecer, que no sólo estamos emparentados con otros organismos sino que, como ellos, también somos el resultado de fuerzas evolutivas ciegas e impersonales. Si los humanos somos tan sólo uno de los muchos productos de la selección natural, quizá no seamos tan especiales. Es fácil entender que esto no les guste a muchas personas que piensan que nuestro origen es distinto al del resto de las especies, que somos el objeto especial de una intención divina. ¿Tiene nuestra existencia algún propósito o significado que nos distinga del resto de organismos? También creen algunos que la evolución corroe la moralidad. Si no somos más que bestias, ¿por qué no *comportarnos* como bestias? ¿Qué puede mantenernos morales si sólo somos monos con el cerebro grande? Ninguna otra teoría científica produce tal *angustia*, tal resistencia psicológica.

Es evidente que esta resistencia nace sobre todo, aunque no completamente, de la religión. Muchas religiones no sólo juzgan a los humanos especiales, sino que niegan la evolución al afirmar que somos, como otras especies, el producto de un

acto instantáneo de creación por parte de una deidad. Aunque muchas personas religiosas han hallado la manera de dar cabida a la evolución junto a sus creencias espirituales, esta reconciliación no es posible cuando se cree en la verdad literal de una creación especial. Por eso la oposición a la evolución es tan fuerte en Estados Unidos y Turquía, donde las creencias fundamentalistas están muy extendidas.

Las estadísticas demuestran de forma descarnada nuestra resistencia a aceptar el simple hecho científico de la evolución. Pese a la evidencia incontestable a favor de la verdad de la evolución, año tras año las encuestas manifiestan en los norteamericanos una deprimente suspicacia hacia esta rama de la biología. Una encuesta reciente pedía a los adultos de 32 países que respondieran a la proposición «Los seres humanos, tal como los conocemos, se desarrollaron a partir de especies anteriores de animales», diciendo si la consideraban verdadera, falsa o si no estaban seguros. Esta afirmación es sencillamente cierta: como veremos, las pruebas genéticas y fósiles demuestran que los humanos descienden de una línea de primates que se separó de nuestro antepasado común con el chimpancé hace unos 7 millones de años. Sin embargo, sólo el 40 por 100 de los estadounidenses, es decir, 4 de cada 10 personas, consideran que la afirmación es cierta (un 5 por 100 menos que en 1985). Esta cifra es muy parecida a la proporción de quienes dijeron que era falsa: 39 por 100. El resto, 21 por 100, no estaban seguros.

Estos datos adquieren todavía mayor relevancia cuando los comparamos con estadísticas de otros países occidentales. De las otras 31 naciones incluidas en el estudio, sólo Turquía, donde abunda el fundamentalismo religioso, se sitúa por debajo en su grado de aceptación de la evolución (25 por 100 la aceptan, 75 por 100 la rechazan). Los europeos salen mucho mejor parados, pues más del 80 por 100 de los franceses, escandinavos e islandeses ven la evolución como una teoría cierta. En Japón, el 78 por 100 de los encuestados dijeron estar de acuerdo con que los humanos habían evolucionado. Si Estados Unidos estuviera en la cola de los países que aceptan la existencia de los átomos, todos nos pondríamos a trabajar de inmediato para mejorar la educación en las ciencias físicas.

Pero la evolución recibe un varapalo todavía mayor cuando se trata de decidir no ya si es cierta, sino si debe enseñarse en las escuelas públicas. Casi dos terceras partes de los estadounidenses opinan que si en las clases de ciencia se enseña la

evolución, también debería enseñarse el creacionismo. Sólo el 12 por 100, una de cada ocho personas, cree que la evolución debe enseñarse sin mencionar una alternativa creacionista. Quizá el argumento de «enseñar todos los ángulos» colme el sentimiento americano de justicia, pero para un educador es verdaderamente desalentador. ¿Por qué enseñar una teoría desacreditada basada en la religión, por muy extendida que esté la creencia en ella, junto a una teoría que es tan obviamente cierta? Es como pedir que en las facultades de medicina se enseñe el chamanismo junto a la ciencia médica occidental, o que en las clases de psicología se enseñe la astrología como teoría alternativa de la conducta humana.

Por desgracia, el anti evolucionismo, que a menudo se considera un problema peculiar de Estados Unidos, se está extendiendo por otros países. Es un problema cada vez mayor, por ejemplo, en Alemania y el Reino Unido. En este último, una encuesta de 2006 realizada por la BBC pidió a 20.000 personas que describieran su idea de cómo se había formado y desarrollado la vida. Aunque el 48 por 100 aceptaron la concepción evolutiva, el 19 por 100 optaron por el creacionismo o por el diseño inteligente, y el 13 por 100 dijeron no saber qué contestar. Estas cifras no son muy distintas de las obtenidas en las encuestas de Estados Unidos. Algunas escuelas del Reino Unido presentan el diseño inteligente como alternativa a la evolución, una táctica educativa que es ilegal en Estados Unidos. A medida que el cristianismo evangélico gana terreno en Europa y el fundamentalismo musulmán se extiende por Oriente Medio, el creacionismo se expande con ellos. Mientras escribo, los biólogos turcos resisten como pueden las embestidas de los enérgicos y bien financiados creacionistas de su país. Y, en lo que ya es el colmo de la ironía, el creacionismo se está afianzando en el archipiélago de Galápagos. Allí, en las tierras mismas que simbolizan la evolución, en las islas icónicas que inspiraron a Darwin, una escuela de adventistas del séptimo día dispensa biología creacionista en estado puro a los niños de todas las religiones.

Aparte del conflicto con la religión fundamentalista, buena parte de la confusión y los equívocos que envuelven a la evolución nacen de una simple falta de comprensión del peso y variedad de las pruebas que la apoyan. A algunos sencillamente no les interesa. Pero el problema está más extendido: hay una falta de información. Incluso algunos de mis colegas biólogos parecen no estar al día de

las muchas pruebas a favor de la evolución, y la mayoría de mis estudiantes universitarios, que supuestamente aprendieron la teoría de la evolución en el instituto, no saben casi nada de esta teoría central de la biología cuando llegan a mis cursos. Pese a la amplia cobertura mediática que recibe el creacionismo y su último descendiente, el diseño inteligente, la prensa popular apenas explica las razones que llevan a los científicos a aceptar la evolución. No debe extrañar, pues, que muchas personas caigan presas de la retórica de los creacionistas y de sus deliberadas distorsiones del darwinismo.

Aunque Darwin fue el primero en recopilar pruebas de la teoría, desde entonces la investigación científica no ha cesado de sacar a la luz nuevos ejemplos de la evolución en acción. Hemos podido observar cómo una especie se divide en dos y hemos descubierto muchos más fósiles que ponen de manifiesto los cambios a lo largo del tiempo: de dinosaurios que desarrollan plumas, de peces que desarrollan extremidades o de reptiles que se convierten en mamíferos. En este libro enlazo los diversos hilos de la moderna investigación genética, paleontológica, geológica, molecular, anatómica y de la biología del desarrollo que demuestran el «sello indeleble» de los procesos que originalmente propuso Darwin. Pasaremos revista a lo que es la evolución, y a lo que no es, y veremos cómo se contrasta una teoría que enardece a tantos.

Veremos cómo reconocer la plena importancia de la evolución darwinista, aunque requiere un profundo cambio en la manera de pensar, no conduce de forma ineludible a un nihilismo desesperanzado. Y que tampoco tiene por qué promover el ateísmo, puesto que la religión más ilustrada siempre ha sabido adaptarse a los avances científicos. Entender la evolución sin duda enriquecerá y hará más profunda nuestra valoración del mundo vivo y del lugar que en él ocupamos. La verdad, es decir, que como los leones, las secuoyas y las ranas somos el producto del lento reemplazo de un gen por otro en una secuencia que a cada paso ha conferido una pequeña ventaja reproductora, es sin duda alguna más gratificante que el mito de que de repente fuimos traídos al ser desde la nada. Como de costumbre, Darwin lo dice mejor:

*Cuando considero todos los seres, no como creaciones especiales,
sino como los descendientes directos de un corto número de seres*

que vivieron mucho antes de que se depositase la primera capa del sistema cámbrico, me parece que se ennoblecen.

Capítulo 1

¿Qué es la evolución?



Un aspecto curioso de la teoría de la evolución es que todo el mundo cree entenderla.

JACQUES MONOD

Si algo es cierto de la naturaleza, es el hecho de que plantas y animales parecen estar diseñados de la forma más perfecta y compleja para vivir sus vidas. Las sepias y los peces planos cambian de color y de dibujo para mezclarse con su entorno, haciéndose invisibles a depredadores y presas. Los murciélagos tienen un radar para localizar los insectos por la noche. Los colibríes, que pueden cernirse en el aire y cambiar de posición en un instante, son mucho más ágiles que cualquier helicóptero, y poseen una larga lengua que les permite chupar el néctar guardado en lo más hondo de las flores. Las propias flores que visitan parecen estar diseñadas para utilizar a los colibríes como asistentes en su reproducción sexual. Mientras el colibrí se ocupa de chupar el néctar, la flor pega a su pico granos de polen que el pájaro llevará a la siguiente flor que visite, quizá fecundándola. La naturaleza se parece a una máquina bien engrasada en la que cada especie es una complicada rueda o engranaje.

¿Qué parece implicar todo esto? Un maestro mecánico, naturalmente. Ésta es la conclusión a la que llegó, en su expresión más célebre, el filósofo inglés del siglo XVIII William Paley. Si nos encontráramos un reloj en el suelo, sin duda reconoceríamos en él la obra de un relojero. De igual modo, la existencia de organismos bien adaptados, con sus complejas características, implica sin duda un

diseñador celestial consciente: Dios. Examinemos mejor el argumento de Paley, uno de los más famosos de la historia de la filosofía:

... cuando nos acercamos a examinar el reloj, observamos ... que sus distintas partes están reunidas y colocadas con un propósito, por ejemplo, que estén de tal modo formadas y ajustadas que produzcan movimiento, y que el movimiento esté de tal modo regulado que señale la hora del día; que, si las distintas partes hubiesen recibido una forma distinta de la que tienen, o un tamaño distinto del que tienen, o estuviesen colocadas de cualquier otro modo, o en cualquier otro orden distinto de aquel que presentan, no se produciría ningún movimiento en la máquina, o al menos no respondería al uso que hoy satisface ... Todo indicio de invención, toda manifestación de diseño que existe en el reloj, existen asimismo en las obras de la naturaleza; con la diferencia de que, en el lado de la naturaleza, son mayores y más abundantes, y ello en un grado que supera todo cálculo.

El argumento que Paley propuso de manera tan elocuente era tan razonable como antiguo. Cuando él y sus colegas «teólogos naturales» describían plantas y animales, creían que estaban catalogando la grandeza y el ingenio de Dios.

El propio Darwin planteó en 1859 la cuestión del diseño, sólo para abandonarla a continuación;

¿Cómo se han perfeccionado todas esas exquisitas adaptaciones de una parte de la organización a otra o a las condiciones de vida, o de un ser orgánico a otro ser orgánico? Vemos estas hermosas adaptaciones mutuas del modo más evidente en el pájaro carpintero y en el muérdago, y sólo un poco menos claramente en el más humilde parásito que se adhiere a los pelos de un cuadrúpedo o a las plumas de un ave; en la estructura del coleóptero que bucea en el agua, en la simiente plumosa, a la que transporta la más suave brisa; en una palabra, vemos hermosas adaptaciones dondequiera y en cada una de las partes del mundo orgánico.

Darwin tenía su propia respuesta para el problema del diseño. Naturalista entusiasta que había estudiado para clérigo en la Universidad de Cambridge (donde, irónicamente, ocupó las antiguas estancias de Paley), Darwin conocía bien el poder seductor de argumentos como el de Paley. Cuanto más aprende uno sobre las plantas y los animales, más se maravilla uno de lo bien que su diseño se ajusta a su modo de vida. ¿Qué había más natural que inferir que ese ajuste reflejaba un diseño *consciente*? Pero Darwin fue más allá de lo obvio para sugerir, y apoyar con una copiosa cantidad de observaciones, dos ideas que para siempre despejaron la idea del diseño deliberado. Esas ideas eran la evolución y la selección natural. No fue el primero en pensar en la evolución; muchos otros antes que él, entre ellos su propio abuelo Erasmus Darwin, habían propuesto la idea de que la vida había evolucionado. Pero Darwin fue el primero en utilizar datos de la naturaleza para convencer a la gente de que la evolución era un hecho, y su idea de la selección natural era realmente novedosa. Es testimonio de su genio el hecho de que el concepto de teología natural, aceptado por la mayoría de los occidentales educados antes de 1859, quedase derrotado en apenas unos pocos años por un solo libro de unas 500 páginas. Con *El origen de las especies*, los misterios de la diversidad de la vida quedaron transformados de mitología en auténtica ciencia.

Así pues, ¿qué es el «darwinismo»?¹ Esta teoría simple y profundamente hermosa, la teoría de la evolución por selección natural, se ha entendido tan mal tan a menudo, se ha distorsionado a veces de manera tan maliciosa, que merece la pena dedicar algo de espacio a exponer sus afirmaciones y puntos esenciales. Volveremos sobre éstos más de una vez al considerar las pruebas que los apoyan.

Lo esencial de la moderna teoría de la evolución es fácil de entender. Puede resumirse en una sola (pero larga) frase: La vida en la Tierra ha evolucionado de manera gradual a partir de una especie primitiva (quizá una molécula con capacidad de replicación) que vivió hace más de 3.500 millones de años; luego se fue ramificando a lo largo del tiempo, produciendo muchas especies nuevas y diversas;

¹ La moderna teoría de la evolución todavía se denomina «darwinismo», aunque ha ido mucho más lejos de lo que propuso el propio Darwin (quien nada sabía, por ejemplo, del ADN o de las mutaciones). Este tipo de eponimia es poco habitual en la ciencia: no llamamos «newtonismo» a la física clásica ni «einsteinismo» a la relatividad. Pero Darwin fue tan certero y fue tanto lo que logró con *El origen* que para muchas personas la biología evolutiva es sinónimo de su nombre. A lo largo de este libro utilizaré el término «darwinismo» en varias ocasiones, pero el lector debe tener en cuenta que me refiero a la «teoría evolutiva moderna»

y el mecanismo de la mayor parte (no la totalidad) del cambio evolutivo es la selección natural.

Cuando este enunciado se divide en sus partes, puede verse que en realidad tiene seis componentes: evolución, gradualismo, ascendencia común, selección natural y mecanismos no selectivos de cambio evolutivo. Veamos qué significa cada una de estas partes.

La primera es la idea de la propia *evolución*. Significa, sencillamente, que una especie experimenta cambios genéticos con el tiempo. Es decir, a lo largo de muchas generaciones, una especie puede evolucionar hacia algo distinto, y esas diferencias radican en cambios en el ADN que tienen su origen en mutaciones. Las especies de plantas y animales que vemos en la actualidad no estaban en el pasado, pero descienden de las que vivieron en tiempos pretéritos. Los humanos, por ejemplo, evolucionaron a partir de un organismo con aspecto de simio, pero no idéntico a los simios actuales.

Aunque todas las especies evolucionan, no lo hacen a la misma velocidad. Algunas, como las cacerolas de las Molucas (un artrópodo quelicerado), el ginkgo (un árbol) y el celacanto (un pez) apenas han cambiado de apariencia en millones de años. La teoría de la evolución no predice que las especies hayan de evolucionar de manera constante ni con qué velocidad lo harán cuando lo hagan. Eso depende de las presiones evolutivas a las que estén sometidas. Algunos grupos (como las ballenas y los humanos) han evolucionado con rapidez, mientras que otros, como el celacanto, un «fósil viviente», se ha mantenido obstinadamente parecido era tras era.

La segunda parte de la teoría de la evolución es la idea del *gradualismo*. Son necesarias muchas generaciones para producir un cambio evolutivo sustancial como la evolución de los reptiles a las aves. La evolución de caracteres nuevos, como los dientes y las mandíbulas que distinguen a los mamíferos de los reptiles, no se produce en una o dos generaciones sino, por lo general, a lo largo de cientos o miles de generaciones, incluso millones. Es cierto que algunos cambios son muy rápidos. Las poblaciones de microbios tienen tiempos de generación muy cortos, de hasta veinte minutos, lo que significa que estas especies pueden experimentar una evolución notable en un período corto, lo que explica la deprimente velocidad con la

que bacterias y virus infecciosos desarrollan resistencia a los fármacos. Además, hay muchos ejemplos de evolución a la escala de tiempo de una vida humana. Pero cuando se trata de cambios realmente *grandes*, por lo general nos referimos a cambios que requieren muchos miles de años. El gradualismo no significa, no obstante, que las especies evolucionen a un ritmo constante. Del mismo modo que las especies varían en la velocidad de evolución, cada especie concreta evoluciona rápida o lentamente dependiendo de los cambios en las presiones evolutivas. Cuando la selección natural es fuerte, como ocurre cuando una planta o un animal colonizan un nuevo ambiente, el cambio evolutivo puede ser rápido. Pero una vez que la especie se ha adaptado a su hábitat, la tasa de evolución suele disminuir.

Los dos principios siguientes son dos caras de la misma moneda. Es un hecho notable que siendo muchas las especies existentes, todas —nosotros, los elefantes, el cactus del jardín— comparten algunas características fundamentales. Entre ellas, las vías bioquímicas que utilizamos para producir energía, nuestro código estándar de cuatro letras del ADN, y la forma como ese código es leído y traducido a proteínas. Esto nos dice que todas las especies provienen en último término de un único antepasado común, un antepasado que poseía esos caracteres y los transmitió a sus descendientes. Pero si la evolución fuese sólo el cambio genético dentro de una especie, en la actualidad sólo tendríamos una única especie, un descendiente muy evolucionado de aquella primera especie. Obviamente no es así: tenemos muchas, más de diez millones en la Tierra actual, y un cuarto de millón de especies conocidas en el registro fósil. La vida es diversa. ¿Cómo ha surgido toda esa diversidad a partir de una forma ancestral? La respuesta exige una tercera idea de la evolución: la *escisión* de especies o, con mayor propiedad, la *especiación*.

Fijémonos en la Figura 1, que muestra un fragmento del árbol de la evolución en la que se representan las relaciones entre aves y reptiles. Todos hemos visto diagramas como éste, pero conviene que lo examinemos algo más a fondo para entender qué significa realmente.

¿Qué ocurrió exactamente cuando el nodo X, por ejemplo, se escindió en el linaje que conduce a los modernos reptiles, como los lagartos y las culebras, y el linaje de las aves modernas y sus parientes dinosaurios? El nodo X representa una *única especie ancestral* que se escindió en dos especies descendientes. Una de las

especies descendientes siguió su camino alegremente, y con el tiempo se escindió muchas veces dando lugar a todos los dinosaurios y las aves. La otra especie descendiente hizo lo mismo, pero dio lugar a la mayoría de los reptiles modernos.

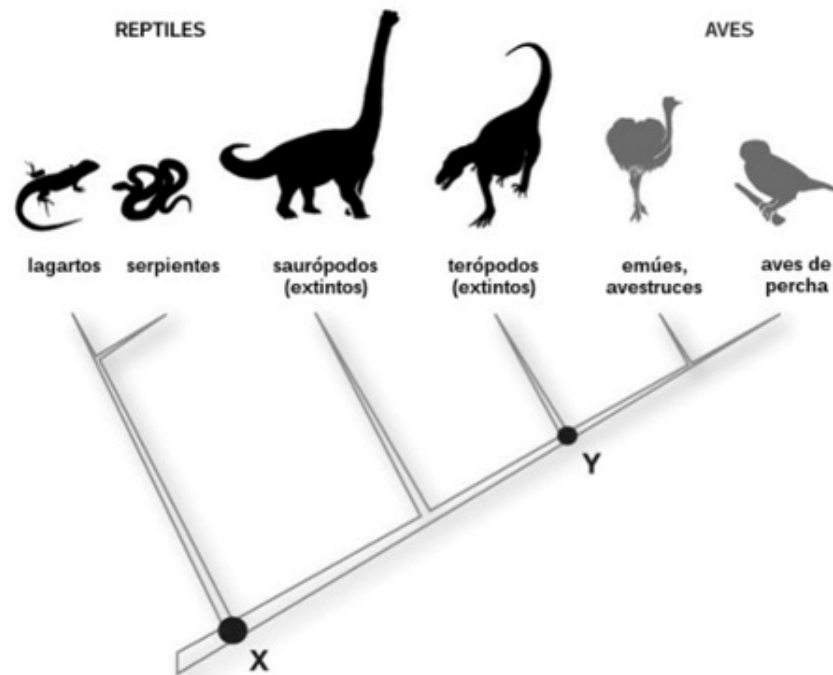


Figura 1. Ejemplo de la descendencia desde un antepasado común en los reptiles. Las especies X e Y fueron los antepasados comunes de las formas que evolucionaron mas tarde. Ilustración de Kalliopi Monoyios.

El antepasado común X suele conocerse como «eslabón perdido» entre los grupos descendientes. Es la conexión genealógica entre las aves y los reptiles modernos, la intersección a la que acabaríamos llegando si siguiéramos sus linajes hacia el pasado. En el mismo diagrama hay otro «eslabón perdido»: el nodo Y, la especie que fue antepasado común de los dinosaurios bípedos carnívoros, como *Tyrannosaurus rex* (todos ellos extintos), y las aves modernas. Pero aunque los antepasados comunes ya no estén con nosotros y sus fósiles sean casi imposibles de encontrar (al fin y al cabo, no son más que un sola especie entre las miles del registro fósil), a veces logramos descubrir fósiles con un alto grado de parentesco, especies con caracteres que demuestran una ascendencia común. Así, en el

siguiente capítulo hablaremos de los «dinosaurios con plumas», que apoyan la existencia del nodo Y.

¿Qué ocurrió cuando los antepasados X se escindieron en dos especies distintas? Como veremos más adelante, la especiación no es más que la evolución de distintos grupos que no pueden reproducirse entre sí, es decir, grupos que no pueden intercambiar genes. Lo que veríamos si pudiéramos presenciar el momento en que este antepasado comenzó a dividirse en dos especies sería simplemente dos poblaciones de una especie de reptil que probablemente habitaban en lugares distintos y comenzaban a desarrollar, por medio de la evolución, caracteres ligeramente distintos. Con el paso de mucho tiempo, estas diferencias irían haciéndose gradualmente mayores. Al final, las dos poblaciones habrían desarrollado las suficientes diferencias genéticas como para impedir que las distintas poblaciones pudieran intercambiar genes. (Esto puede producirse de muchas maneras; por ejemplo, los miembros de las dos especies podrían no querer aparearse entre sí, o, si lo hicieran, podrían producir híbridos estériles.)

Millones de años más tarde, después de otros eventos de escisión, una de las especies descendientes de dinosaurio, el nodo Y, se dividió a su vez en dos nuevas especies, de las cuales una acabaría produciendo todos los dinosaurios bípedos carnívoros y la otra, todas las aves. Este momento crítico de la historia de la evolución, el nacimiento de los antepasados de todas las aves, no debía parecer en nada excepcional en aquel momento. De estar allí, no hubiéramos visto la aparición súbita de animales voladores a partir de los reptiles sino, simplemente, dos poblaciones ligeramente distintas del mismo dinosaurio, con toda probabilidad no más distintos que los miembros de las diversas poblaciones humanas en la actualidad. Todos los cambios importantes se produjeron a lo largo de miles de generaciones, cuando la selección, al actuar sobre un linaje, promovió el vuelo mientras que al actuar sobre el otro linaje promovió los rasgos de los dinosaurios bípedos. Sólo con una mirada retrospectiva podemos identificar la especie Y como el antepasado común de *T. rex* y de las aves. Estos eventos evolutivos fueron lentos, y sólo adquieren importancia cuando ordenamos la secuencia de los descendientes de estas dos corrientes evolutivas divergentes.

Pero las especies no *tienen* por qué escindir-se. Eso, como veremos, depende de si las circunstancias son propicias a la evolución de barreras a la reproducción. La gran mayoría de las especies, más del 99 por 100, se extinguen sin dejar descendientes. Otras, como el ginkgo, viven millones de años sin apenas producir nuevas especies. La especiación no se produce con gran frecuencia, pero cada vez que una especie se divide en dos, dobla el número de oportunidades de especiación en el *futuro*, de manera que el número de especies crece de manera exponencial. Aunque la especiación sea lenta, se produce lo bastante a menudo, y a lo largo de períodos tan dilatados de la historia, que explica de sobra la asombrosa diversidad de plantas y animales de la Tierra.

La especiación fue para Darwin una cuestión de tal importancia que le dedicó el título de su libro más célebre. Y en ese mismo libro ofreció algunas pruebas de la especiación. El único diagrama de todo *El origen* es un árbol evolutivo hipotético parecido al de la Figura 1. Pero lo cierto es que Darwin no llegó a explicar cómo surgen las especies, pues al no disponerse entonces de conocimientos de genética, nunca llegó a entender que explicar las especies significa explicar las barreras genéticas. La verdadera comprensión de cómo se produce la especiación no comenzó hasta la década de 1930. Diré algo más sobre este proceso, que es mi área de estudio, en el capítulo 7.

Es razonable pensar que si la historia de la vida forma un árbol en el que a partir de un tronco común se originan todas las especies, podemos encontrar un origen común a dos ramitas (especies existentes) cualesquiera siguiendo las ramitas hacia el pasado hasta que se unan en la rama que tienen en común. Este nodo, como ya hemos visto, es su antepasado común. Y si la vida comenzó con una sola especie y se escindió en millones de especies descendientes a través de un proceso de ramificación, de ello se sigue que todo par de especies comparte un antepasado común en algún momento del pasado. Las especies estrechamente emparentadas, igual que las personas estrechamente emparentadas, deben tener un antepasado común que vivió hace relativamente poco tiempo, mientras que el antepasado común de las especies que son parientes lejanos, igual que en el caso de los parientes lejanos entre los humanos, debe haber vivido hace mucho más tiempo. Por consiguiente, la idea de *ascendencia común*, que es el cuarto principio del

darwinismo, es la otra cara de la especiación. Significa, sencillamente, que siempre podemos rebobinar la cinta de la vida hasta encontrar el antepasado en el que se une cualquier par de especies descendientes.

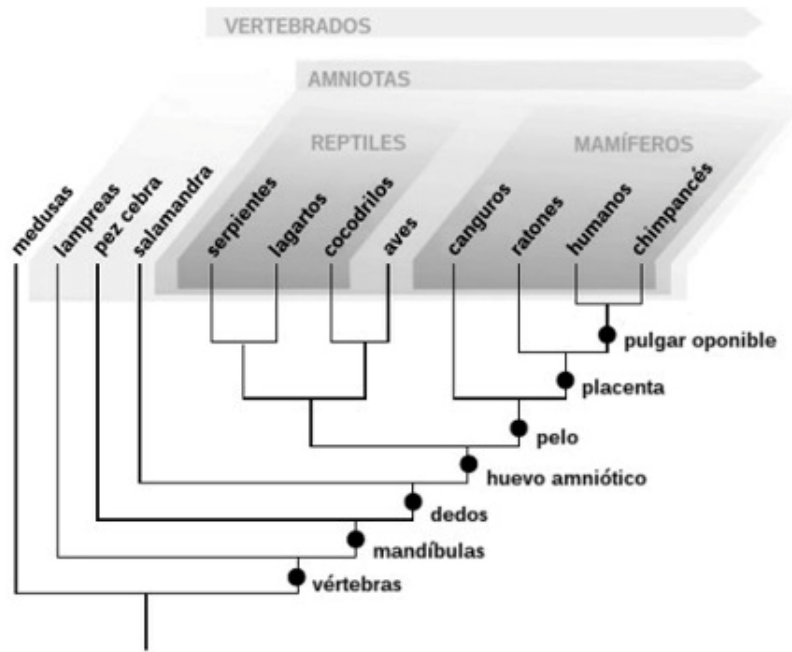


Figura 2. Filogenia (árbol evolutivo) de los vertebrados donde se muestra cómo la evolución produce una agrupación jerárquica de los caracteres, y en consecuencia de las especies que poseen esos caracteres. Los círculos negros indican en qué punto del árbol apareció cada uno de los caracteres. Ilustración de Kalliopi Monoyios.

Echemos un vistazo a un árbol evolutivo, el de los vertebrados (Figura 2). En este árbol he puesto algunos de los caracteres que los biólogos utilizaron para deducir las relaciones evolutivas. Para empezar, todos los peces, anfibios, mamíferos y reptiles poseen columna vertebral (son «vertebrados»), por lo que deben descender de un antepasado común que también tenía vértebras. Pero dentro de los vertebrados, los reptiles y los mamíferos están unidos (y se distinguen de los peces y los anfibios) porque tienen un «huevo amniótico» (el embrión está rodeado de una membrana llena de fluido llamada amnios). Así que los reptiles y los mamíferos deben haber compartido un antepasado común más reciente que también producía huevos de este tipo. Pero este grupo también contiene dos subgrupos, uno con

especies con el cuerpo recubierto de pelo, sangre caliente y que producen leche (es decir, mamíferos), y otro compuesto por especies de sangre fría, con escamas y que producen huevos impermeables (es decir, reptiles). Las especies forman una jerarquía en la que unos pocos grupos grandes, cuyos miembros comparten unos pocos caracteres, aparecen divididos en grupos cada vez más pequeños de individuos que comparten un mayor número de rasgos, y así sucesivamente hasta el nivel de especie, compuesto por individuos que comparten casi todos sus rasgos. En honor a la verdad, los biólogos ya habían reconocido esta jerarquía de la vida mucho antes que Darwin. Al intentar plasmarla en un sistema formal, desarrollaron lo que se denominó clasificación «natural» de las plantas y los animales. Lo más asombroso del caso es que distintos biólogos llegaron a definir grupos casi idénticos. Esto significa que los grupos no son artefactos subjetivos nacidos de la necesidad humana de clasificar, sino que nos dicen algo real y fundamental sobre la naturaleza. Lo que ocurre es que nadie sabía qué era ese algo hasta que Darwin mostró que esa disposición jerárquica era justamente lo que predecía la evolución. Los organismos con antepasados comunes recientes comparten muchos caracteres, mientras que los que comparten antepasados comunes más lejanos son más diferentes. La clasificación «natural» es, en sí misma, una prueba fuerte de la evolución.

¿Por qué? Porque no vemos una ordenación jerárquica cuando intentamos ordenar cosas que no han surgido de un proceso evolutivo de escisión de grupos y descendencia. Fijémonos, por ejemplo, en las cajas de cerillas, que yo solía coleccionar. No sugieren una clasificación natural del mismo modo que lo hacen las especies. Podemos, por ejemplo, ordenarlas jerárquicamente por el tamaño, luego por el país dentro del tamaño, por el color dentro del país, y así sucesivamente. Pero podríamos comenzar por el tipo de producto anunciado, y ordenar después por el color y luego por la fecha. Hay muchas maneras de ordenarlos, y cada coleccionista lo hará de una forma distinta. No existe un sistema de ordenación con el que estén de acuerdo todos, y ello se debe a que, en lugar de evolucionar —es decir, que cada caja dé origen a otra que sea ligeramente distinta—, cada diseño fue creado a partir de cero por el capricho humano.

Las cajas de cerillas se parecen a los tipos de organismos que cabría esperar a partir de una explicación creacionista de la vida. En este caso, los organismos carecerían de ascendencia común; serían simplemente el resultado caprichoso de formas diseñadas *de novo* para ajustarse a sus entornos naturales. No cabría esperar que se ordenaran de acuerdo con una jerarquía anidada de formas que fuera reconocida por todos los biólogos.²

Hasta hace unos treinta años, los biólogos utilizaban rasgos visibles como la anatomía y los modos de reproducción para reconstruir la ascendencia de las especies vivas. Este método se basaba en la suposición razonable de que los organismos que poseen caracteres parecidos también poseen genes parecidos, y que los genes parecidos implican un parentesco cercano. Pero ahora disponemos de una poderosa herramienta independiente para reconstruir la ascendencia: podemos mirar directamente los genes. Secuenciando el ADN de diversas especies y midiendo su grado de semejanza podemos reconstruir sus relaciones evolutivas. El método se basa en la suposición, perfectamente razonable, de que las especies que poseen el ADN más parecido están más estrechamente emparentadas, es decir, tienen antepasados comunes más recientes. Estos métodos moleculares no han producido grandes cambios respecto a los árboles de la vida anteriores a la era del ADN. Dicho de otro modo, los caracteres visibles de los organismos y sus secuencias de ADN nos dan, por lo general, la misma información sobre las relaciones evolutivas.

La idea de la ascendencia común conduce de manera natural a realizar predicciones de peso, y contrastables empíricamente, sobre la evolución. Si vemos que las aves y los reptiles se agrupan sobre la base de sus caracteres visibles y sus secuencias de ADN, podemos predecir que tarde o temprano deberíamos encontrar en el registro fósil antepasados comunes de las aves y los reptiles. Algunas de estas predicciones se han satisfecho, proporcionándonos pruebas empíricas sólidas de la evolución. Conoceremos algunos de estos antepasados comunes en el siguiente capítulo.

² A diferencia de las cajas de cerillas, los lenguajes humanos *sí* que se ordenan de acuerdo con una jerarquía anidada en la que algunos (como el inglés y el alemán) se parecen mucho más entre sí que a otros (como el chino). De hecho, es posible construir un árbol evolutivo de los lenguajes basado en la semejanza de palabras y gramática. La razón de que los lenguajes puedan ordenarse de este modo es que experimentaron su propia forma de evolución, cambiando de manera paulatina con el tiempo y divergiendo a medida que los grupos humanos se desplazaban a nuevas regiones y perdían el contacto entre sí. Como las especies, los lenguajes tienen especiación y ascendencia común. Fue el propio Darwin quien primero observó esta semejanza.

El quinto aspecto esencial de la teoría de la evolución es el que Darwin consideraba su mayor logro intelectual: la idea de la *selección natural*. En realidad, la idea no fue exclusiva de Darwin; un naturalista coetáneo, Alfred Russel Wallace, concibió el mismo mecanismo más o menos al mismo tiempo, en lo que constituye uno de los más célebres casos de descubrimiento simultáneo de la historia de la ciencia. Sin embargo, Darwin se lleva la parte del león del crédito porque en *El origen de las especies* desgranó la idea de la selección natural con todo detalle, aportó pruebas y observaciones en su favor, y exploró sus muchas consecuencias.

Pero la selección natural fue también la parte de la teoría evolutiva que más revolucionaria se consideró en tiempos de Darwin, y la que todavía hoy inquieta a más personas. La selección es revolucionaria y es inquietante por el mismo motivo: explica el diseño aparente de la naturaleza mediante un proceso puramente materialista que no requiere de fuerzas naturales de creación o que guíen el proceso.

La idea de la selección natural no es difícil de entender. Si los individuos de una especie difieren genéticamente unos de otros, y si algunas de esas diferencias afectan a la capacidad de un individuo para sobrevivir y reproducirse en su medio, entonces, en la siguiente generación, los genes «buenos» que favorecen la supervivencia y la reproducción tendrán un número de copias relativamente mayor que los genes «no tan buenos». Con el tiempo, y a medida que aparezcan nuevas mutaciones que se extiendan por la población, y a medida que se eliminen los genes deletéreos, la población se irá ajustando cada vez mejor a su entorno. Al final, este proceso producirá organismos bien adaptados a sus hábitats y a su modo de vida.

He aquí un ejemplo sencillo. El mamut lanudo habitó las frías regiones septentrionales de Eurasia y América del Norte, donde estaba adaptado al clima porque disponía de un grueso abrigo de pelo (algo que sabemos gracias a que se han hallado ejemplares enteros congelados en la tundra).³ Este mamut probablemente descendía de unos antepasados que, como los elefantes actuales, tenían poco pelo. Algunas mutaciones en la especie ancestral hicieron que algunos mamuts tuvieran más pelo, igual que algunos humanos son más peludos que otros.

³ Los mamuts lanudos se extinguieron hace unos diez mil años, probablemente a causa de la presión de la caza por nuestros antepasados. Al menos un ejemplar se conservó tan bien por congelación que en 1951 proporcionó carne para una cena del Club de Exploradores de Nueva York.

Cuando el clima se fue enfriando, o cuando la especie se fue expandiendo hacia regiones más septentrionales, los individuos hirsutos resultaron estar mejor preparados para tolerar las bajas temperaturas de su nuevo entorno, dejando más descendientes que sus compañeros calvos. Este proceso enriqueció la población en genes de hirsutez. En cada generación, el mamut debía ser por término medio algo más peludo que antes. Si se deja actuar este proceso durante miles de generaciones, el mamut sin pelo acaba siendo desplazado por el mamut lanudo. Si otros caracteres afectan también la resistencia al frío (por ejemplo, el tamaño corporal, la cantidad de grasa, etc.), también esos caracteres irán cambiando al mismo tiempo.

El proceso de la selección natural es de una sorprendente simplicidad. Sólo precisa que unos pocos individuos de una especie varíen genéticamente en su capacidad para sobrevivir y reproducirse en su entorno. Si se cumplen estas condiciones, la selección natural, y por ende la evolución, son inevitables. Como veremos, este requisito se cumple en todas las especies en que se ha buscado. Y como son muchos los caracteres que pueden afectar a la adaptación de un individuo a su entorno (su «eficacia biológica» o *fitness*), con el tiempo suficiente la selección natural irá esculpiendo un animal o una planta hasta algo que tendrá toda la apariencia de haber sido diseñado.

Es importante comprender que existe una diferencia real entre lo que uno esperaría encontrar si los organismos estuvieran diseñados de manera consciente o si, por el contrario, son el resultado de un proceso de selección natural. La selección natural no es un maestro ingeniero, sino más bien un chapucero. No produce la perfección absoluta que alcanzaría un diseñador que compone algo desde el principio, sino que hace lo que puede con lo que tiene a mano. Las mutaciones para un diseño perfecto no suelen aparecer, bien porque son raras, bien porque aquellas que producirían el diseño perfecto no son biológicamente posibles. Quizá el rinoceronte africano, con sus dos cuernos en línea, esté mejor preparado para defenderse y entrenarse con sus hermanos que el rinoceronte indio, engalanado con un solo cuerno (en realidad no son cuernos verdaderos sino pelos compactados). Pero es posible que, sencillamente, entre los rinocerontes indios no se haya producido ninguna mutación que produzca dos cuernos. Aun así, es mejor un cuerno que ninguno. El rinoceronte

indio está mejor dotado que sus antepasados sin cuerno, aunque los accidentes de la historia genética hayan conducido a un «diseño» que no es perfecto. Del mismo modo, cada caso de planta o animal que es atacado por parásitos o enfermedades representa un fracaso en su adaptación. Y lo mismo puede decirse de todos los casos de extinción, que representan por encima del 99 por 100 de las especies que han vivido a lo largo de la historia de la Tierra. (Una observación, por cierto, que plantea una seria dificultad para las teorías del diseño inteligente [DI]. No parece muy inteligente diseñar millones de especies destinadas a extinguirse y ser reemplazadas por otras especies parecidas, que en su mayoría también acaban por extinguirse. Los defensores del DI nunca han abordado esta dificultad.)

La selección natural, además, tiene que trabajar sobre el diseño del organismo como un todo, lo que a menudo obliga a compromisos entre distintas adaptaciones. Las hembras de las tortugas marinas cavan sus nidos en la playa con sus aletas en un proceso dificultoso, lento y torpe que expone sus huevos a la depredación. Disponer de unas aletas con forma de pala las ayudaría a cavar más rápido y mejor, pero no nadarían tan bien como lo hacen ahora. Un diseñador meticuloso habría proporcionado a las tortugas un par adicional de extremidades, con apéndices retráctiles en forma de pala, pero las tortugas, como todos los reptiles, están limitadas a un plan corporal que reduce el número de extremidades a cuatro.

Los organismos no sólo se encuentran a merced de la suerte en la lotería de las mutaciones, sino que además están limitados por su historia evolutiva y del desarrollo. Las mutaciones son cambios en caracteres que ya existen; casi nunca crean caracteres totalmente nuevos. Esto significa que la evolución es como un arquitecto que no puede diseñar un edificio desde cero, sino que tiene que construir cada nueva estructura adaptando un edificio existente, y asegurándose de que éste se mantiene habitable durante todo el proceso de transformación. Esto comporta compromisos. Los hombres, por ejemplo, estarían mejor si los testículos se formaran directamente en el exterior del cuerpo, donde las temperaturas más bajas son mejores para el desarrollo de los espermatozoides.⁴ Sin embargo, los testículos

⁴ Es probable que los mamíferos ancestrales retuvieran los testículos en el abdomen de adultos (algunos mamíferos, como el ornitorrinco y el elefante, todavía lo hacen), lo que nos lleva a preguntarnos por qué la evolución favoreció el descenso de los testículos hacia una posición externa, más expuesta a lesiones. Aún no conocemos la respuesta, pero una de las claves es que las enzimas implicadas en la formación de los espermatozoides no funcionan tan bien a la temperatura del interior del cuerpo (por eso los médicos aconsejan a los hombres que quieren ser padres que

comienzan su desarrollo en el interior del abdomen. Cuando el feto tiene seis o siete meses, migran hacia el escroto a través de dos conductos llamados canales inguinales, y quedan de este modo alejados del dañino calor del interior del cuerpo. Estos canales dejan en la pared del cuerpo algunos puntos débiles que hacen que los hombres sean propensos a las hernias inguinales. Estas hernias no son nada bueno: pueden obstruir el intestino y, antes de los actuales tratamientos quirúrgicos, podían provocar la muerte. Ningún diseñador inteligente hubiera establecido tan tortuoso viaje testicular. Si lo tenemos es porque nuestro programa de desarrollo de los testículos es una herencia de los antepasados que tenemos en común con los peces, cuyas gónadas se desarrollaban en el interior del abdomen y allí se quedaban. Comenzamos nuestro desarrollo con testículos internos como en los peces, y el descenso testicular evolucionó más tarde como una solución chapucera.

Así que la selección natural no produce la perfección, sólo mejora lo que ya se tenía. Produce organismos *más adaptados*, no los *mejor adaptados*. Y aunque la selección ofrece la apariencia de diseño, ese diseño con frecuencia es imperfecto. Lo irónico del caso es que es precisamente en esas imperfecciones, como veremos en el capítulo 3, donde encontramos las mejores pruebas de la evolución.

Esto nos lleva al último de los seis aspectos principales de la teoría de la evolución: *además de la selección natural, hay otros procesos que pueden causar cambios evolutivos*. De éstos, el más importante es que se produzcan simples cambios al azar en las proporciones de genes debido a que distintas familias tienen distinto número de descendientes. Este proceso conlleva cambios evolutivos que, al ser aleatorios, no tienen nada que ver con la adaptación. La influencia de este proceso sobre los cambios evolutivos más importantes es, con toda probabilidad, de menor transcendencia, porque no tiene el poder de modelar que tiene la selección natural, que sigue siendo el único proceso conocido que produce adaptación. No obstante, como veremos en el capítulo 5, la deriva genética puede desempeñar un papel

eviten los baños calientes antes del sexo). Es posible que a medida que evolucionaba la euritermia (sangre caliente) en los mamíferos, en algunos grupos los testículos se vieran forzados a descender para mantenerse a una temperatura más fresca. Pero tal vez los testículos externos evolucionaron por otras razones, y las enzimas implicadas en la formación del esperma simplemente han perdido la capacidad de funcionar a temperaturas más altas

importante en la evolución de poblaciones pequeñas y probablemente explique algunas características no adaptativas del ADN.

Éstas son, pues, las seis partes de la teoría de la evolución.⁵ Algunas partes están íntimamente conectadas. Por ejemplo, si la especiación es cierta, la descendencia desde un antepasado común también debe serlo. Pero otras partes son independientes entre sí. Por ejemplo, podría producirse evolución sin que necesariamente tuviera que ser de forma gradual. Algunos «mutacionistas» de principios del siglo XX creían que una especie podía producir de manera instantánea otra especie radicalmente distinta por medio de una sola y monstruosa mutación. El renombrado zoólogo Richard Goldschmidt, por ejemplo, argumentó en cierta ocasión que el primer organismo reconocible como ave podía haber nacido de la eclosión de un huevo puesto por un organismo inequívocamente reptiliano. Las proposiciones como ésta pueden ponerse a prueba. El mutacionismo predice que deberían surgir grupos nuevos a partir de grupos antiguos de forma instantánea, sin transiciones en el registro fósil. Pero los fósiles nos dicen que no es así como funciona la evolución. En cualquier caso, pruebas como ésta ponen de manifiesto que se puede contrastar unas partes del darwinismo con independencia de otras.

Por otra parte, pudiera ser que la evolución fuese cierta pero la selección natural no fuese su causa. Muchos biólogos, por ejemplo, creyeron en otro tiempo que la evolución avanzaba impelida por una fuerza mística y teleológica, un «impulso interior» que poseían las especies y que las llevaba a cambiar con arreglo a ciertas direcciones prescritas. Se argüía que este tipo de impulso había impelido la evolución de los enormes colmillos de los tigres de dientes de sable, haciéndolos cada vez más grandes, con independencia de su utilidad, hasta el punto en que el animal ya no podía cerrar la boca y la especie se extinguió por inanición. Hoy sabemos que no hay ningún indicio de la existencia de fuerzas teleológicas; los tigres de dientes de sable no murieron de inanición, sino que vivieron felizmente durante millones de años con sus enormes colmillos antes de extinguirse por otras

⁵ Quienes se oponen a la evolución a menudo sostienen que la teoría de la evolución debería explicar también el origen de la vida, y que el darwinismo fracasa porque todavía no sabemos responder a esta pregunta. Esta objeción es desacertada. La teoría de la evolución se ocupa sólo de lo que ocurre después del origen de la vida (definida aquí como organismos o moléculas con capacidad de reproducirse a sí mismos). El origen de la vida no es competencia de la biología evolutiva, sino de la abiogénesis, una disciplina científica que engloba química, geología y biología molecular. Como esta disciplina todavía está en pañales y todavía ha dado pocas respuestas, he omitido en este libro toda discusión sobre cómo comenzó la vida en la Tierra. Una revisión de las muchas teorías que compiten por explicarlo puede encontrarse en Robert Hazen, *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin*.

razones. El hecho de que la evolución pudiera tener distintas causas es, sin embargo, una de las razones de que los biólogos aceptaran la evolución muchas décadas antes de aceptar la selección natural.

Hasta aquí las proposiciones de la teoría de la evolución. Pero hay una expresión preocupante que se oye con frecuencia: la evolución no es más que una teoría. En un discurso pronunciado ante un grupo evangélico de Texas, Ronald Reagan caracterizó de este modo la evolución durante la campaña presidencial de 1980: «Bueno, es una teoría. Es sólo una teoría científica, y durante los últimos años ha sido desafiada en el mundo de la ciencia, y la comunidad científica ya no cree que sea tan infalible como creía en otro tiempo».

La palabra clave de esta cita es «sólo». *Sólo* una teoría. Lo que implica es que *algo no es del todo correcto* en una teoría, que es una mera especulación, y muy probablemente errónea. De hecho, en su uso habitual, «teoría» tiene la connotación de «conjetura», como en «Mi teoría es que Fred está loco por Sue». Pero en la ciencia la palabra teoría significa algo completamente distinto, algo que transmite mucha más seguridad y rigor que la idea de una simple conjetura.

De acuerdo con el *Oxford English Dictionary*, una teoría *científica* es «el enunciado de lo que se tiene por leyes, principios o causas generales de algo conocido u observado». Así, podemos hablar de la «teoría de la gravitación» como la proposición de que todos los objetos con masa se atraen entre sí de acuerdo con una relación estricta en la que interviene la distancia que los separa. O podemos hablar de la «teoría de la relatividad», que realiza afirmaciones específicas sobre la velocidad de la luz y la curvatura del espacio-tiempo.

Hay dos aspectos que deseo resaltar a este respecto. El primero es que, en ciencia, una teoría es mucho más que una simple especulación sobre la naturaleza de las cosas: es un conjunto de proposiciones bien meditadas con la intención de explicar hechos del mundo real. La «teoría atómica» no es el simple enunciado de que «los átomos existen»; es un enunciado sobre cómo interaccionan los átomos entre sí, cómo forman compuestos y se comportan químicamente. Del mismo modo, la teoría de la evolución va más allá de la simple afirmación de que «hubo evolución»: es un conjunto de principios ampliamente documentados, de los que acabo de explicar los seis más importantes, que explican *cómo* y *por qué* se produce la evolución.

Esto nos lleva al segundo aspecto. Para que una teoría pueda considerarse científica debe ser *contrastable* y debe *realizar predicciones verificables*. Es decir, es necesario que podamos realizar observaciones sobre el mundo real que la apoyen o la refuten. La teoría atómica fue especulativa al principio, pero fue ganando credibilidad a medida que la química fue acumulando datos que apoyaban la existencia de los átomos. Aunque no pudimos ver átomos hasta la invención del microscopio de barrido en 1981 (y al microscopio tienen realmente el aspecto de pequeñas bolas como imaginamos), los científicos hacía mucho tiempo que estaban convencidos de que los átomos eran reales. Asimismo, una buena teoría realiza predicciones sobre lo que deberíamos hallar si miramos más de cerca la naturaleza. Si esas predicciones resultan ser correctas, aumentan nuestra confianza en la corrección de la teoría. La teoría general de la relatividad de Einstein, propuesta en 1916, predijo que la luz se curvaba cuando pasaba cerca de un cuerpo celestial de gran masa. (En rigor, la gravedad de ese cuerpo distorsiona el espacio-tiempo, que distorsiona la trayectoria de los fotones cercanos.) Y, en efecto, Arthur Eddington verificó esta predicción en 1919 cuando demostró, durante un eclipse solar, que la luz procedente de estrellas distantes se curvaba al pasar cerca del sol, desplazando las posiciones aparentes de las estrellas. Fue sólo cuando se verificó esta predicción que la teoría de Einstein comenzó a aceptarse de manera general.

Dado que una teoría sólo se acepta como «verdadera» después de que sus afirmaciones y predicciones hayan sido contrastadas una y otra vez, y confirmadas una y otra vez, no existe ningún momento concreto en que una teoría científica se convierta en un hecho científico. Una teoría se convierte en un hecho (o una «verdad») cuando se han acumulado tantos indicios y observaciones a su favor, y ninguna prueba decisiva la haya refutado, que todas las personas razonables llegan a aceptarla. Esto no significa que una teoría «verdadera» no pueda llegar a ser refutada en el futuro. Todas las verdades científicas son provisionales y están sujetas a modificaciones a la luz de nuevos indicios y observaciones. No se dispara ninguna alarma que anuncie a los científicos que por fin han alcanzado las verdades últimas e inmutables de la naturaleza. Como veremos, es posible que a pesar de las miles de observaciones que apoyan el darwinismo, puedan aparecer nuevos datos que pongan de manifiesto que la teoría es errónea. Lo creo improbable, pero los

científicos, a diferencia de los fanáticos, no pueden permitirse el lujo de ser arrogantes sobre lo que aceptan como verdadero.

Durante el proceso de convertirse en verdades o hechos, las teorías científicas suelen contrastarse con teorías *alternativas*. Después de todo, es frecuente que para un mismo fenómeno existan varias explicaciones. Los científicos intentan realizar observaciones clave o experimentos decisivos que pongan a prueba las explicaciones rivales. Durante muchos años se había creído que la posición de las masas continentales se había mantenido constante durante toda la historia de la vida. Pero en 1912, el geofísico alemán Alfred Wegener concibió la teoría rival de la «deriva continental» que proponía que los continentes se habían movido. La inspiración inicial para su teoría fue la observación de que las formas de los continentes, como América del Sur y África, encajaban como piezas de un rompecabezas. La deriva continental fue ganando apoyo a medida que se fueron descubriendo fósiles y los paleontólogos vieron que la distribución de las especies antiguas sugería que los continentes habían estado unidos en el pasado. Más tarde, se propuso la «tectónica de placas» como mecanismo del movimiento de los continentes, del mismo modo que se propuso la selección natural como mecanismo de la evolución: las placas de la corteza y el manto flotaban sobre un material más líquido en el interior de la Tierra. Y aunque la tectónica de placas fue recibida con escepticismo en la comunidad de geólogos, fue sometida a pruebas rigurosas desde muchos frentes que arrojaron indicios muy convincentes de que era correcta. En la actualidad, gracias a la tecnología de los satélites de posicionamiento global, podemos incluso ver cómo se mueven los continentes a una velocidad de 5 a 10 centímetros por año, más o menos la misma velocidad a la que crecen las uñas. (Por cierto que esto, combinado con la incontestable evidencia de que los continentes estuvieron en otro tiempo unidos, constituye una prueba empírica que refuta la afirmación de los creacionistas de la «tierra joven» en el sentido de que nuestro planeta no tiene más de seis a diez mil años de edad. Si ése fuera el caso, podríamos situarnos en la costa oeste de España y ver recortado en el horizonte el perfil de Nueva York, puesto que Europa y América no se habrían separado ¡ni un kilómetro!)

Cuando Darwin escribió *El origen*, la mayoría de los científicos occidentales, y casi todo el resto del mundo, eran creacionistas. Aunque no siempre aceptaran todos y cada uno de los detalles de la historia del Génesis, la mayoría creían que la vida se había creado más o menos en su forma actual, que había sido diseñada por un creador omnipotente y no había cambiado desde entonces. En *El origen*, Darwin proporcionaba una hipótesis alternativa del desarrollo, la diversificación y el diseño de la vida. Buena parte de aquella obra presentaba observaciones y pruebas empíricas que no sólo apoyaban la evolución, sino que al mismo tiempo refutaban el creacionismo. En tiempos de Darwin, las pruebas a favor de su teoría eran más que sugerentes, pero en modo alguno decisivas. Así pues, podemos decir que la evolución era una teoría (pero una teoría bien respaldada) cuando la propuso Darwin, y que desde 1859 ha adquirido la condición de «hecho científico» con la acumulación de nuevas pruebas. La evolución todavía se llama «teoría», igual que la teoría de la gravitación, pero es una teoría que también es un hecho científico. Así pues, ¿cómo contrastamos la teoría de la evolución frente a la teoría todavía popular de que la vida fue creada y no ha cambiado desde entonces? Son dos los tipos de pruebas empíricas. El primer tipo consiste en utilizar las seis proposiciones del darwinismo para enunciar *predicciones contrastables*. Por predicciones no me refiero a que el darwinismo pueda predecir cómo se desarrollará la evolución en el futuro; lo que predice es lo que deberíamos observar en especies vivas o extintas cuando las estudiamos. He aquí algunas predicciones de la teoría de la evolución:

- *Puesto que disponemos de restos fósiles de organismos extintos, deberíamos poder hallar pruebas de cambios evolutivos en el registro fósil. Las capas más profundas (y antiguas) de rocas deberían contener fósiles de especies más primitivas, y algunos fósiles deberían hacerse más complejos en capas más recientes, hasta encontrar los organismos más parecidos a los actuales en las capas más recientes. Deberíamos poder ver cómo cambian algunas especies con el paso del tiempo, cómo forman linajes que ponen de manifiesto su «descendencia con modificación» (adaptación).*
- *Deberíamos poder hallar algunos casos de especiación en el registro fósil, casos en los que una línea de descendencia se escinde en dos o más. Y*

deberíamos poder descubrir la formación de nuevas especies en la naturaleza.

- *Deberíamos poder hallar ejemplos de especies que vinculan grandes grupos para los que se sospecha una ascendencia común, como las aves y los reptiles, o los peces y los anfibios. Además, estos «eslabones perdidos» (o, en una terminología más rigurosa, «formas de transición») deberían aparecer en capas de rocas de una edad correspondiente al momento en que los grupos supuestamente divergieron.*
- *Deberíamos descubrir que las especies presentan variabilidad genética para muchas características (de otro modo no podría producirse la evolución).*
- *La imperfección es la marca de la evolución, no del diseño consciente. Deberíamos poder descubrir casos de adaptación imperfecta en los que la evolución no haya sido capaz de alcanzar el grado óptimo que hubiera alcanzado un creador.*
- *Deberíamos poder observar la selección natural en acción en la naturaleza.*

Además de estas predicciones, el darwinismo también puede encontrar apoyo en lo que podemos denominar *retrodicciones*: hechos y datos que no necesariamente predice la teoría de la evolución pero que *sólo adquieren sentido a la luz de la teoría de la evolución*. Las retrodicciones son una forma válida de hacer ciencia: algunas de las pruebas empíricas que apoyan la tectónica de placas, por ejemplo, sólo se obtuvieron después de que los científicos aprendieran a leer en las rocas de la corteza oceánica los cambios pasados en la dirección del campo magnético de la Tierra. Algunas de las retrodicciones que apoyan la evolución (frente a la creación especial) son los patrones de distribución de las especies sobre la superficie de la Tierra, las peculiaridades del desarrollo embrionario de los organismos y la existencia de caracteres vestigiales sin función aparente. Éstos son los temas tratados en los capítulos 3 y 4.

La teoría de la evolución realiza, pues, predicciones claras y rotundas. Darwin dedicó veinte años a acumular observaciones e indicios en apoyo de su teoría antes de publicar *El origen*. Eso fue hace más de ciento cincuenta años. ¡Desde entonces se ha acumulado muchísimo conocimiento! Se han encontrado muchos fósiles

nuevos; se han recolectado muchas más especies y se ha cartografiado su distribución; se ha avanzado mucho en el esclarecimiento de las relaciones evolutivas entre distintas especies. Y han surgido ramas enteras de la ciencia que Darwin no podía ni soñar, entre ellas la biología molecular y la sistemática, el estudio de las relaciones de parentesco entre individuos.

Como veremos, toda la evidencia acumulada, tanto la vieja como la nueva, conduce ineludiblemente a la conclusión de la que la evolución es verdadera.

Capítulo 2

Escrito en las rocas



La corteza terrestre es un inmenso museo; pero las colecciones naturales han sido hechas a intervalos de tiempo inmensamente dilatados.

CHARLES DARWIN, *El origen de las especies*

Contenido:

- 1. Cómo se hace el registro*
- 2. Los hechos*
- 3. Grandes patrones*
- 4. La evolución y la especiación en los fósiles*
- 5. «Eslabones perdidos»*
- 6. A la tierra firme: de los peces a los anfibios*
- 7. Al aire: el origen de las aves*
- 8. De vuelta al agua: la evolución de las ballenas*
- 9. Qué dicen los fósiles*

La historia de la vida en la Tierra está escrita en las rocas. Se trata, qué duda cabe, de un libro de historia roto y desvencijado, del que sólo hallamos restos dispersos de lo que fueron sus hojas. Pero ahí está, y hay partes significativas que todavía son legibles. Los paleontólogos han trabajado sin cesar para reconstruir los indicios históricos tangibles de la evolución: el registro fósil.

Cuando admiramos alguno de los fósiles más impresionantes, como los grandes esqueletos de dinosaurios que adornan nuestros museos de historia natural, es fácil

olvidar el enorme esfuerzo que ha representado descubrirlos, excavarlos, prepararlos y describirlos. Con frecuencia han sido necesarias largas, costosas y arriesgadas expediciones a los rincones más remotos e inhóspitos del planeta. Sin ir más lejos, uno de mis colegas de la Universidad de Chicago, Paul Sereno, estudia dinosaurios africanos, y muchos de los fósiles más interesantes que ha descubierto los ha encontrado justo en medio del desierto del Sahara. Él y sus compañeros de trabajo han tenido que habérselas con conflictos políticos, bandidos, enfermedades y, por descontado, con los rigores del propio desierto para descubrir nuevas e interesantes especies como *Afrovenator abakensis* y *Jobaria tiguidensis*, especímenes que han ayudado a reescribir la historia de la evolución de los dinosaurios.

Descubrimientos como éstos requieren una genuina dedicación a la ciencia, muchos años de trabajo meticuloso, persistencia y valentía, además de una saludable dosis de buena suerte. Pero muchos paleontólogos están dispuestos a arriesgar sus vidas por realizar descubrimientos como éstos. Para los biólogos, los fósiles son tan valiosos como las pepitas de oro. Sin ellos, no tendríamos más que un esbozo imperfecto de la evolución. Nos veríamos limitados a estudiar las especies vivas e intentar inferir sus relaciones evolutivas a partir de su parecido de forma, desarrollo y secuencia de ADN. Sabríamos, por ejemplo, que los mamíferos están más emparentados con los reptiles que con los anfibios, pero no sabríamos nada sobre cómo eran sus antepasados comunes. No tendríamos el menor indicio de la existencia de los grandes dinosaurios, algunos tan grandes como camiones, o de nuestros antepasados australopitecinos más antiguos, con un volumen craneano pequeño pero que ya caminaban erectos. Mucho de lo que nos gustaría saber sobre la evolución quedaría envuelto en el misterio. Por suerte, los avances de la física, la geología y la bioquímica, junto con la audacia y la perseverancia de científicos de todo el mundo, nos permiten disfrutar de esta valiosa mirada al pasado.

1. Cómo se hace el registro

Los fósiles se conocen desde los tiempos más antiguos: Aristóteles escribe sobre ellos, y es posible que los fósiles de un dinosaurio con pico, *Protoceratops*, estén detrás del mitológico grifo de los antiguos griegos. Pero el verdadero significado de

los fósiles no se comenzó a valorar hasta mucho más tarde. Aun en pleno siglo XIX se explicaban como productos de fuerzas sobrenaturales, como organismos enterrados por el gran diluvio universal o como restos de especies vivas que habitaban en lugares remotos e inexplorados.

En estos restos petrificados, sin embargo, se esconde la historia de la vida. Pero ¿cómo podemos descifrarla? Para empezar, como es lógico, hay que tener los fósiles, y muchos. Luego hay que ponerlos en el orden correcto, de más antiguo a más reciente. Y luego hay que averiguar exactamente cuándo se formaron. Cada uno de estos requisitos conlleva sus propios desafíos.

Una vez bien enterradas en el sedimento, las partes duras de los fósiles van siendo infiltradas o reemplazadas por minerales disueltos. El resultado es un molde de un organismo vivo que queda comprimido en una roca por la presión de unos sedimentos que no dejan de acumularse encima. El hecho de que las partes blandas de plantas y animales no se fosilicen fácilmente crea de inmediato un sesgo importante en nuestro conocimiento de las especies antiguas. Los huesos y los dientes son abundantes, igual que las conchas y los esqueletos externos de insectos y crustáceos. Pero los gusanos, las medusas, las bacterias y los organismos frágiles como las aves son mucho más escasos, lo mismo que las especies terrestres por comparación con las acuáticas. Durante el primer 80 por 100 de la historia de la vida, todas las especies eran de cuerpo blando, así que para observar las fases más primitivas e interesantes de la evolución disponemos sólo de una ventana empañada, y para ver el origen de la vida, de ninguna.

Una vez formado, un fósil tiene que sobrevivir a los continuos procesos de desplazamiento, plegamiento, calentamiento y aplastamiento de la corteza de la Tierra, que acaban por destruir la mayoría de los fósiles. Luego hay que descubrirlo. La mayoría, enterrados como están a gran profundidad bajo la superficie de la Tierra, nos resultan inaccesibles. Sólo cuando los sedimentos son levantados y quedan expuestos gracias a la erosión por el viento o la lluvia, pueden ser atacados por el martillo del paleontólogo. Además, sólo hay una pequeña ventana de tiempo antes de que estos fósiles parcialmente expuestos acaben también desgastados y borrados por la acción del viento, el agua y otros agentes de la meteorología.

Si se tienen en cuenta todos estos requisitos, está claro que el registro fósil tiene que ser incompleto. Pero ¿en qué medida? El número total de especies que en algún momento han vivido en la Tierra se estima entre 17 millones (lo que probablemente sea una drástica subestima puesto que en la actualidad viven al menos 10 millones de especies) y 4.000 millones. Dado que hemos descubierto alrededor de 250.000 especies distintas de fósiles, podemos estimar que nuestro registro fósil apenas corresponde a entre 0,1 y 1 por 100 de todas las especies, ¡una muestra muy deficiente de la historia de la vida! Deben de haber existido muchas especies sorprendentes que hemos perdido para siempre. Con todo, disponemos de fósiles suficientes para hacernos una buena idea de cómo se produjo la evolución y para discernir cómo los grandes grupos se fueron escindiendo unos de otros.

Irónicamente, quienes primero pusieron orden en el registro fósil no fueron evolucionistas sino geólogos que además eran creacionistas y aceptaban la explicación de la vida que ofrece el libro del Génesis. Estos primeros geólogos se limitaron a ordenar las distintas capas de rocas que iban descubriendo (a menudo durante las excavaciones de canales que acompañaron a la revolución industrial inglesa) con arreglo a unos principios fundamentados de sentido común. Como los fósiles aparecen en rocas sedimentarias que comenzaron como limos en océanos, ríos o lagos (o, más raramente, como dunas de arena o depósitos glaciales), las capas o «estratos» más profundos tenían que haberse depositado antes que los más cercanos a la superficie. Las rocas más jóvenes descansan sobre rocas más antiguas. Pero no en todos los lugares se depositaron todas las capas: no siempre en un mismo lugar había agua para formar sedimentos.

Por consiguiente, para establecer el orden completo de los estratos era necesario correlacionar los hallados en distintas localidades de todo el mundo. Si una capa del mismo tipo de roca y con el mismo tipo de fósiles aparece en dos lugares distintos, es razonable suponer que la capa es de la misma edad en ambas localidades. Por ejemplo, si encontramos cuatro capas de roca en un lugar (que podemos llamar, de la más superficial a la más profunda, ABDE), y luego encontramos tan sólo dos de esas capas en otro lugar, pero con una nueva capa entre las dos, por ejemplo BCD, podemos inferir que este registro incluye al menos cinco capas de roca que, de más recientes a más antiguas, serían ABCDE. Este *principio de superposición* lo ideó

inicialmente en el siglo XVII el polímata danés Nicolaus Steno, quien más adelante se convertiría en arzobispo y fue beatificado por el papa Juan Pablo II en 1988 en lo que seguramente constituye el único caso de un beato que haya realizado una contribución científica importante. Con la ayuda del principio de Steno, el registro geológico se fue ordenando mediante un trabajo minucioso a lo largo de los siglos XVII y XVIII, desde las antiquísimas rocas del Cámbrico hasta las más recientes. Hasta aquí, bien. Pero esto sólo nos dice las edades relativas de las rocas, no sus edades *reales* o absolutas.

Desde aproximadamente 1945 podemos medir las edades reales de algunas rocas usando la radiactividad. Ciertos elementos radiactivos («radioisótopos») quedan incorporados en las rocas ígneas cuando se cristalizan a partir de la roca fundida bajo la superficie de la Tierra. Los radioisótopos se desintegran de manera gradual en otros elementos de acuerdo con una tasa constante, que suele expresarse en forma de una «vida media», es decir, el tiempo necesario para que desaparezca la mitad de un isótopo. Una vez conocida la vida media de un isótopo, en qué cantidad se encontraba en el momento de la formación de la roca (algo que los geólogos pueden determinar con precisión) y cuánto queda en la actualidad, es relativamente sencillo estimar la edad de la roca. Cada isótopo se desintegra con una tasa característica. Las rocas antiguas suelen datarse con uranio-238 (U-238), que se encuentra en un mineral común, el circón. El U-238 tiene una vida media de unos 700 millones de años. El carbono-14, con una vida media de 5.730 años, se utiliza en rocas mucho más recientes, o incluso en artefactos humanos como los manuscritos del mar Muerto. Es frecuente que en un mismo material se encuentren varios radioisótopos, de modo que podemos cotejar las dataciones, y las edades invariablemente concuerdan. Las rocas que contienen fósiles, sin embargo, no son ígneas, sino sedimentarias, y no es posible datarlas de manera directa. Pero podemos obtener las edades de los lechos fosilíferos como el intervalo de edades de las capas de rocas ígneas adyacentes que contengan radioisótopos.

Los oponentes de la evolución a menudo atacan la fiabilidad de estas dataciones aduciendo que las tasas de desintegración radiactiva podrían haber cambiado con el tiempo o con las presiones físicas que hayan experimentado las rocas. Esta objeción suelen plantearla los creacionistas de la «tierra joven», quienes sostienen que

nuestro planeta no tiene más de seis a diez mil años de edad. Pero su objeción es engañosa. Como los distintos radioisótopos de una roca se desintegran de forma distinta, si sus tasas de desintegración cambiaran no nos darían dataciones concordantes. Además, las vidas medias de los isótopos no cambian cuando los científicos los someten a temperaturas y presiones extremas en el laboratorio. Y en aquellos casos en que las fechas radiométricas han podido compararse con fechas del registro histórico, como ocurre con el método del carbono-14, concuerdan de manera invariable. Es la datación radiométrica de los meteoritos lo que nos dice que la Tierra y el sistema solar tienen 4.600 millones de años. (Las rocas más antiguas de la Tierra son algo más jóvenes, de unos 4.300 millones de años en muestras del norte de Canadá, porque las más antiguas han quedado destruidas por movimientos de la corteza terrestre.)

Hay aún otras maneras de contrastar la exactitud de la datación radiométrica. Una de ellas consiste en utilizar la biología, como hizo John Wells, de la Universidad de Cornell, en un ingenioso estudio de unos corales fósiles. La datación con radioisótopos había mostrado que estos corales habían vivido durante el período Devónico, hace unos 380 millones de años. Pero Wells logró también hallar la edad de estos corales con sólo mirarlos detenidamente. Lo que hizo fue aprovechar el hecho de que, con el tiempo, la fricción producida por las mareas va frenando gradualmente la rotación de la Tierra. Cada día, una revolución de la Tierra es un poquito más larga que el día anterior. Nada que podamos notar; para ser precisos, la longitud de un día se incrementa en aproximadamente dos segundos cada 100.000 años. Como la duración de un año (el tiempo que tarda la Tierra en dar la vuelta al Sol) no cambia con el tiempo, esto significa que el número de días por año debe disminuir con el tiempo. A partir de la tasa de frenado, Wells calculó que cuando sus corales estaban vivos (hace 380 millones de años, si la datación radiométrica era correcta) cada año debía de contener unos 396 días, cada uno de ellos de 22 horas de duración. Si hubiera algún modo de que los propios fósiles nos dijeran cuál era la longitud del día cuando vivieron, podríamos comprobar si esa longitud concuerda con las 22 horas que predice la datación radiométrica.

Lo bueno del caso es que los corales pueden decirnos eso, pues a medida que crecen dejan registrado en su cuerpo el número de días del año. Los corales vivos

producen anillos de crecimiento diarios y anuales. En los especímenes fósiles, podemos ver cuántos anillos diarios separan cada anillo anual; dicho de otro modo, cuántos días había en un año cuando vivían aquellos corales. Si conocemos la tasa de frenado producida por las mareas, podemos comparar la edad «mareal» con la edad «radiométrica». Después de contar los anillos en sus corales devónicos, Wells encontró que habían experimentado unos 400 días por año, lo que corresponde a un día de 21,9 horas, una desviación minúscula de la predicción de 22 horas. Esta ingeniosa calibración biológica refuerza nuestra confianza en la exactitud de la datación radiométrica.

2. Los hechos

¿Qué podemos considerar pruebas de la evolución en el registro fósil? Hay varios tipos. En primer lugar, la visión global de la evolución: un examen de la secuencia entera de estratos debería mostrarnos que las primeras formas de vida eran bastante sencillas, y que las formas más complejas fueron apareciendo con el tiempo. Además, los fósiles más recientes deberían ser los más parecidos a las especies vivas en la actualidad.

También deberíamos hallar ejemplos del cambio evolutivo dentro de un mismo linaje, es decir, cambios a lo largo del tiempo en una especie de animal o de planta. Las especies más tardías deberían poseer caracteres que hagan que se parezcan a descendientes de las especies anteriores. Y como la historia de la vida implica la escisión de especies a partir de antepasados comunes, también deberíamos ser capaces de ver esta escisión en el registro fósil, y de encontrar indicios de los antecesores comunes. Por ejemplo, los anatomistas del siglo XIX predijeron, a partir de sus semejanzas corporales, que los mamíferos habían evolucionado de antiguos reptiles. Por lo tanto, deberíamos poder encontrar fósiles de reptiles en una secuencia temporal que los acerque cada vez más a los mamíferos. Naturalmente, como el registro fósil es incompleto, no cabe esperar que podamos documentar *todas y cada una* de las transiciones entre las principales formas de vida. Pero al menos deberíamos encontrar algunas.

En *El origen*, Darwin se lamenta de lo fragmentario del registro fósil. Por aquel entonces carecíamos de series transicionales de fósiles o «eslabones perdidos»

entre formas principales que sirvieran para documentar el cambio evolutivo. Algunos grupos, como las ballenas, aparecían de repente en el registro, sin antepasados conocidos. Pero aun así Darwin disponía de algunos indicios fósiles a favor de la evolución, entre ellos la observación de que las plantas y animales antiguos eran muy distintos de las especies actuales, y que se parecían más a éstas cuanto más recientes fueran las rocas donde se habían descubierto. Observó también que los fósiles de las capas adyacentes eran más parecidos entre sí que los hallados en capas más separadas, lo que implicaba un proceso continuo y gradual de divergencia. Más aún, en un lugar dado, los fósiles de los lechos de roca depositados más recientemente tendían a parecerse a las especies modernas que vivían en la zona, y no a las especies de otras partes del mundo. Por ejemplo, los marsupiales se encontraban en profusión solo en Australia, que es donde viven la mayoría de los marsupiales actuales. Esto sugería que las especies modernas descendían de las fósiles. (Entre los marsupiales fósiles se encuentran algunos de los mamíferos más extraños que hayan vivido nunca, entre ellos un canguro gigante de unos tres metros con el rostro plano, enormes garras y un solo dedo en cada pie.)

Lo que no tenía Darwin eran fósiles suficientes para aportar evidencias incontestables de cambios graduales en especies, o de antepasados comunes. Pero desde entonces los paleontólogos han descubiertos muchísimos fósiles que satisfacen las predicciones mencionadas anteriormente. Hoy podemos demostrar cambios continuos dentro de linajes de animales; disponemos de abundantes indicios de antepasados comunes y formas transicionales (han aparecido, por ejemplo, los antepasados perdidos de las ballenas); y hemos excavado lo bastante hondo como para ver los inicios de la vida compleja.

3. Grandes patrones

Ahora que tenemos todos los estratos en orden y hemos estimado sus edades, podemos leer el registro fósil de abajo arriba. La Figura 3 presenta una línea de tiempo simplificada de la historia de la vida en la que se muestran los principales eventos biológicos y geológicos que se han producido desde la aparición de los

primeros organismos, hace unos 3.500 millones de años.⁶ Este registro ofrece una imagen inequívoca del cambio desde lo más simple a lo más complejo.

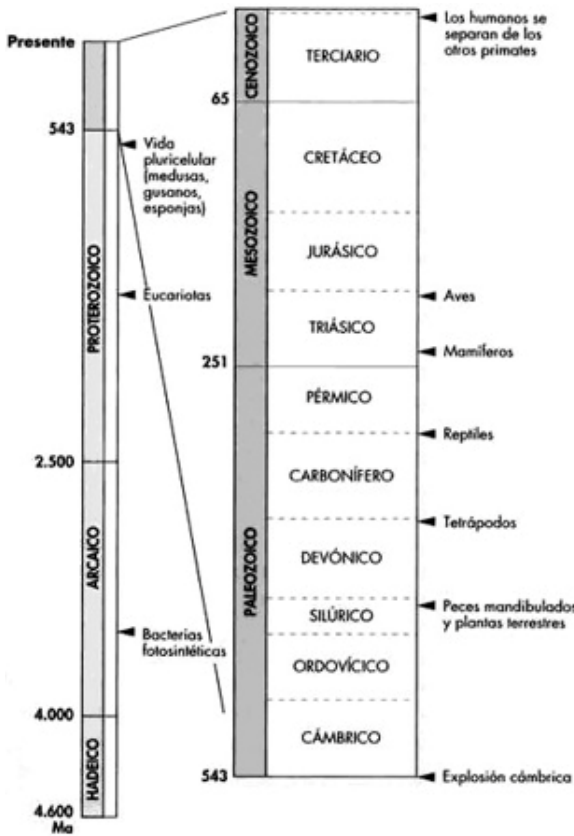


Figura 3. Registro fósil con indicación de la primera aparición de las diversas formas de vida que surgieron desde la formación de la Tierra hace unos 4.600 millones de años (Ma). Nótese que la vida pluricelular se originó y diversificó sólo en el último 15 por 100 de la historia de la vida. Los grupos aparecen en escena de un modo ordenado de acuerdo con su evolución, y muchos aparecen después de transiciones fósiles conocidas desde sus antepasados. Ilustración de Kalliopi Monoyios.

Aunque la figura muestra las «primeras apariciones» de grupos como los reptiles y los mamíferos, no debe interpretarse que las formas modernas aparezcan en el registro fósil de repente, como si salieran de la nada. Bien al contrario, en la mayoría de los grupos vemos una evolución gradual a partir de formas más primitivas (las aves y los mamíferos, por ejemplo, evolucionaron a lo largo de millones de años a partir de antepasados reptilianos). La existencia de transiciones graduales entre grandes grupos, tal como se comenta más adelante, significa que la asignación de una fecha de «primera aparición» es un tanto arbitraria.

⁶ Nótese que durante la primera mitad de la historia de la vida las únicas especies eran bacterias. Los organismos pluricelulares complejos no aparecieron hasta el último 15 por 100 de la historia de la vida. Una línea del tiempo evolutivo a escala real, que permite ver lo reciente que es la aparición de los organismos que nos resultan más familiares, puede verse en <http://andabien.com/html/evolution-timeline.htm>. ¡Hay que desplazar mucho la barra para llegar al presente!

Los primeros organismos, unas simples bacterias fotosintéticas, aparecen en los sedimentos de hace unos 3.500 millones de años, tan sólo unos 1.000 millones de años después de la formación del planeta. Estos organismos unicelulares fueron lo único que ocupó la Tierra durante los 2.000 millones de años siguientes, tras los cuales vemos la aparición de los primeros y sencillos «eucariotas», los organismos con células verdaderas dotadas de núcleo y cromosomas. Más tarde, hace unos 600 millones de años, surge el abanico completo de organismos relativamente simples pero pluricelulares, como los gusanos, las medusas y las esponjas. Estos grupos se diversificaron durante varios millones de años; las plantas y los tetrápodos terrestres (animales de cuatro patas, los primeros de los cuales fueron peces de aletas lobuladas) no aparecieron hasta hace unos 400 millones de años. Naturalmente, muchos de los grupos que aparecieron más tempranamente persistieron: las bacterias fotosintéticas, las esponjas y los gusanos aparecen en el registro fósil más primitivo pero todavía siguen con nosotros.

Unos 50 millones de años más tarde encontramos los primeros anfibios verdaderos, y tras otros 50 millones de años, los reptiles. Los primeros mamíferos no hacen acto de presencia hasta hace unos 250 millones de años (a partir de antepasados reptiles, como se había predicho), y las primeras aves, descendientes también de reptiles, aparecen unos 50 millones de años más tarde. Tras la aparición de los primeros mamíferos, éstos, junto con los insectos y las plantas terrestres, se van diversificando cada vez más, y a medida que nos acercamos a las rocas más superficiales, los fósiles se parecen cada vez más a las especies vivas. Los humanos son unos recién llegados a este escenario: nuestro linaje se separa del de otros primates hace tan sólo unos 7 millones de años, apenas una finísima rebanada del tiempo entero de la evolución. Se ha propuesto toda una serie de imaginativas analogías para resaltar lo ultimísimo de nuestra llegada, y merece la pena hacerlo una vez más. Si el recorrido entero de la evolución se comprimiera en un solo año, las primeras bacterias habrían aparecido a finales de marzo, pero no veríamos los primeros antepasados de los humanos hasta las seis de la mañana del 31 de diciembre. La edad dorada de Grecia, alrededor del 500 a. C., se produciría a tan sólo treinta segundos de la medianoche.

Aunque el registro fósil de las plantas es más escaso, pues carecen de partes duras que se fosilicen fácilmente, su patrón evolutivo es muy parecido. Las más antiguas son musgos y algas, seguidas de la aparición de los helechos, y éstos de las coníferas, los árboles de hoja caduca y, por último, las plantas con flor.

Así que la aparición de las especies a lo largo del tiempo, tal como se puede ver en los fósiles, está muy lejos de ser aleatoria. Los organismos simples evolucionaron antes que los complejos, los antepasados que se habían predicho, antes que sus descendientes. Los fósiles más recientes son los más parecidos a las especies vivas. Y disponemos de fósiles transicionales que conectan los principales grupos. Ninguna teoría de la creación especial, *ninguna* teoría que no sea la evolución, puede explicar estos patrones.

4. La evolución y la especiación en los fósiles

Para poner de manifiesto el cambio evolutivo gradual dentro de un mismo linaje se necesita una buena secuencia de sedimentos, con preferencia que se hayan depositado con rapidez (de manera que cada período de tiempo venga representado por un lecho grueso de sedimentos y sea más fácil observar los cambios), y en la que no falten capas (la falta de una capa en medio de una secuencia hace que una transición evolutiva suave parezca un «salto» brusco).

Los animales marinos de pequeño tamaño, como los del plancton, son ideales para este propósito. Son extraordinariamente abundantes, muchos tienen partes duras y, lo mejor de todo, caen directamente al fondo del océano al morir, donde se acumulan en capas que forman secuencias continuas. Obtener muestras ordenadas de estas capas es fácil: basta con clavar un largo tubo en el fondo del mar, extraer con él una columna de sedimento (un testigo), y leerlo (datarlo) desde el fondo hasta la superficie.

Cuando se sigue una misma especie de fósil a lo largo del testigo, a menudo puede verse cómo evoluciona. La Figura 4 muestra un ejemplo de evolución en un diminuto protozoo unicelular marino que construye una concha en espiral y crea nuevas cámaras a medida que crece. Estas muestras provienen de secciones de un testigo de doscientos metros de longitud obtenido en los sedimentos del fondo marino cerca de la costa de Nueva Zelanda. La figura muestra cómo cambia con el

tiempo un solo carácter: el número de cámaras de la última espiral de la concha. Lo que vemos es un cambio bastante suave y gradual en el tiempo desde una media de 4,8 cámaras por espiral al principio de la secuencia hasta 3,3 cámaras al final, una reducción de alrededor del 30 por 100.

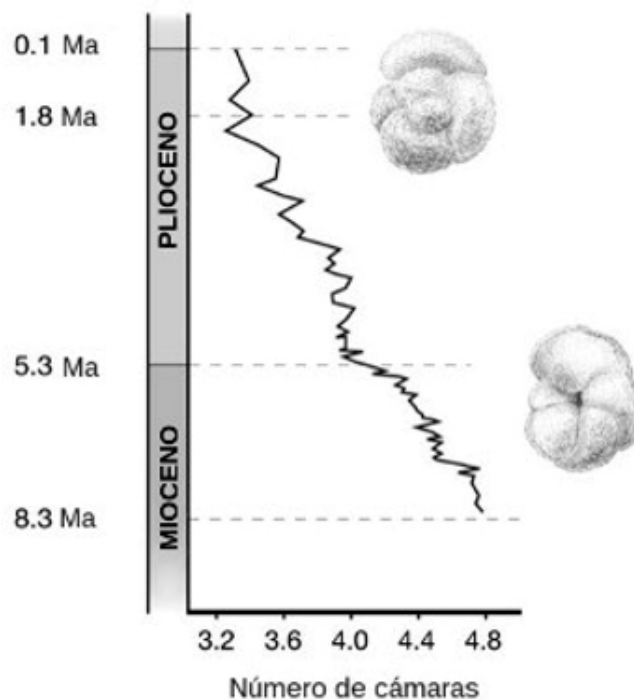


Figura 4. Registro de fósiles preservados en un testigo de sedimento marino que muestra los cambios evolutivos en un foraminífero marino, Globorotalia conoidea, a lo largo de 8 millones de años. La escala indica el número de cámaras de la última espiral de la concha, promediado entre todos los especímenes contados en cada sección del testigo. Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Malmgren y Kennett (1981).

La evolución, aunque gradual, no tiene por qué proceder siempre de forma suave o con un ritmo constante. La Figura 5 muestra un cambio más irregular en otro microorganismo marino, el radiolario *Pseudocubus vema*. En este caso los geólogos tomaron muestras regularmente espaciadas de un testigo de dieciocho metros extraído cerca de la Antártida, correspondiente a unos 2 millones de años de sedimentos. El carácter que midieron fue la anchura de la base cilíndrica del animal (su «tórax»). Aunque el tamaño aumenta en un 50 por 100 hacia el final de la serie,

no sigue una tendencia suave. Hay períodos en los que el tamaño apenas cambia, intercalados por períodos de cambio más rápido. Esta pauta es bastante común en los fósiles, y puede entenderse completamente si los cambios que observamos fueron impulsados por factores ambientales, por ejemplo fluctuaciones en el clima o la salinidad. El entorno cambia de forma esporádica e irregular, y con él aumenta y disminuye la presión de la selección natural.

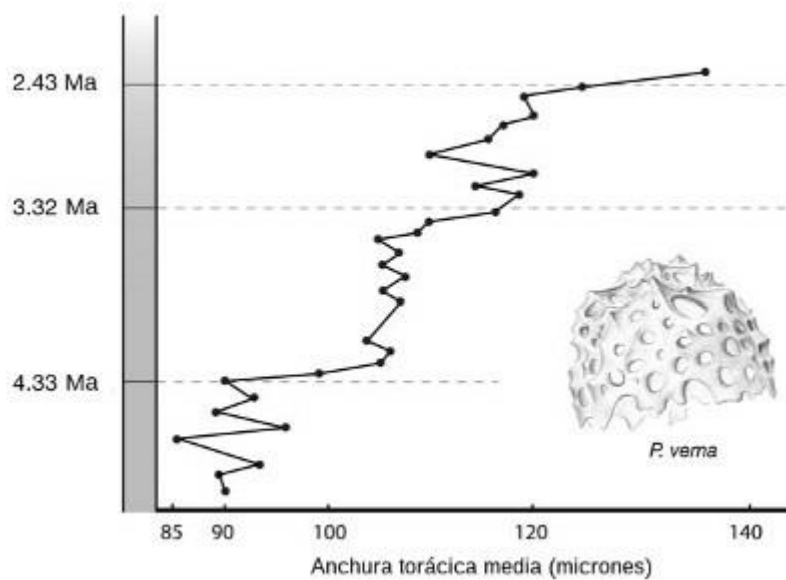


Figura 5. Cambios evolutivos en la anchura torácica del radiolario Pseudocubus vema durante un período de 2 millones de años. Los valores son promedios poblacionales para cada sección del testigo. Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Kellogg y Hays (1975).

Examinemos ahora la evolución de unos organismos más complejos: los trilobites. Los trilobites eran artrópodos, el mismo grupo al que pertenecen los insectos y las arañas. Como estaban protegidos por una cubierta dura, son muy comunes en las rocas antiguas (seguro que los tienen a la venta en algún museo cercano). Peter Sheldon, entonces en el Trinity College de Dublín, recogió fósiles de trilobites de un lecho de esquisto de Gales que comprendía un período de unos 3 millones de años. Encontró en esta roca ocho linajes distintos de trilobites, y todos mostraron con el tiempo cambios evolutivos en el número de «costillas pigidiales», los segmentos de la última sección del cuerpo.

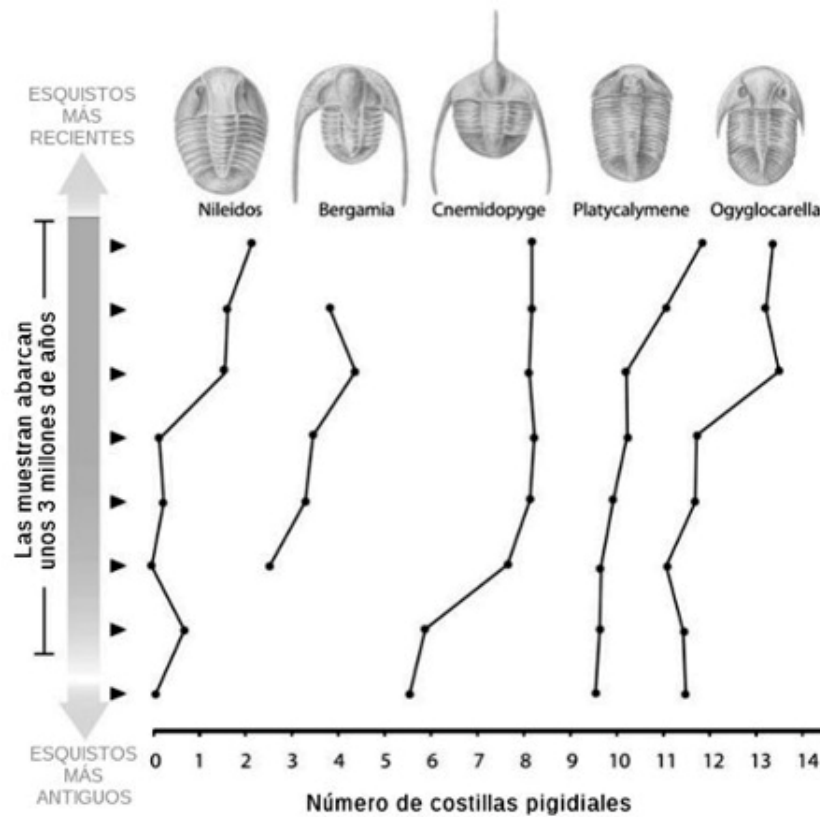


Figura 6. Cambios evolutivos en el número de «costillas pigidiales» (segmentos de la sección posterior) de cinco grupos de trilobites del Ordovícico. Los valores corresponden a la media de la población para cada sección de una muestra de esquisto de hace 3 millones de años. Las cinco especies (y otras tres que no se muestran aquí) presentan un cambio neto en el número de costillas a lo largo del período, y sugieren que la selección natural actuó a largo plazo, pero que las especies no cambiaron perfectamente en paralelo. Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Sheldon (1987).

La Figura 6 muestra los cambios en algunos de estos linajes. Aunque a lo largo de todo el período muestreado todas las especies presentaron un aumento neto del número de segmentos, los cambios entre las distintas especies no sólo no corren parejos, sino que a veces van en direcciones distintas durante el mismo período. Lamentablemente, no tenemos la menor idea de cuáles fueron las presiones selectivas que impulsaron los cambios evolutivos en estas especies del plancton y de trilobites. Siempre es más fácil documentar la evolución en el registro fósil que

entender su causa, pues se preservan los fósiles, pero no el medio donde habitaban. Lo que podemos decir es que hubo evolución, que fue gradual y que varió tanto en el ritmo como en la dirección.

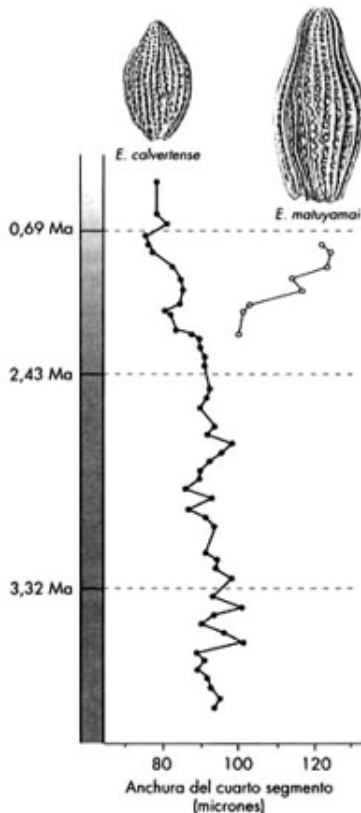


Figura 7. Evolución y especiación en dos especies del radiolario planctónico Eucyrtidium, a partir de un testigo de sedimento que comprende más de 3,5 millones de años. Los puntos, que representan la anchura del cuarto segmento, corresponden al promedio para cada especie y sección del testigo. En las áreas al norte de donde se extrajo este testigo, una población ancestral de E. calvertense se fue haciendo mayor, adquiriendo gradualmente el nombre de E. matuyamai al alcanzar un mayor tamaño. E. matuyamai invadió después el área de distribución de su pariente, tal como muestra el gráfico, y ambas especies, al habitar ahora en el mismo lugar, comenzaron a divergir en el tamaño del cuerpo. Esta divergencia podría explicarse por la actuación de la selección natural para reducir la competencia por el alimento entre las dos especies.

Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Kellogg y Hays (1975).

Además de ilustrar la evolución dentro de un linaje, el plancton marino también nos ofrece ejemplos de la escisión de un linaje. La Figura 7 muestra una especie ancestral de plancton que se divide en dos descendientes que se distinguen por el tamaño y la forma del cuerpo. Lo interesante es que la nueva especie, *Eucyrtidium matuyamai*, evolucionó al principio en un área al norte de la zona donde se tomaron estos testigos de sedimento, y más tarde invadió el área donde habitaba su

antepasado. Como veremos en el capítulo 7, la formación de una especie nueva a menudo comienza con el aislamiento geográfico de dos poblaciones de una especie. Hay centenares de ejemplos más de cambios evolutivos en fósiles, tanto graduales como puntuados, en especies de grupos tan distintos como los moluscos, los roedores y los primates. Y hay ejemplos también de especies que apenas han cambiado. (¡La teoría de la evolución no dice que todas las especies tengan que cambiar!) Pero una lista de estos casos no modificaría el mensaje: el registro fósil no ofrece indicio alguno a favor de la predicción creacionista de que todas las especies aparecieron de un solo golpe y permanecieron inmutables desde entonces. Por el contrario, las formas de vida aparecen en el registro de acuerdo con una secuencia evolutiva, evolucionan y divergen.

5. «Eslabones perdidos»

Los cambios en las especies marinas nos ofrecen indicios de la evolución, pero ésta no es la única lección que nos enseña el registro fósil. Lo que de verdad apasiona a la gente, y sobre todo a los biólogos y paleontólogos, son las formas transicionales, los fósiles que cierran la brecha entre dos tipos muy distintos de organismos vivos. ¿Es realmente cierto que las aves vienen de unos reptiles, los animales terrestres de unos peces y las ballenas de unos animales terrestres? Si es así, ¿dónde están los indicios fósiles que lo avalan? Algunos creacionistas admiten la posibilidad de que con el tiempo se produzcan pequeños cambios en tamaño y forma —un proceso denominado *microevolución*—, pero rechazan la idea de que a partir de un tipo de animal o planta pueda aparecer otro tipo *muy distinto* (*macroevolución*). Los defensores del diseño inteligente sostienen que este tipo de diferencia requiere la intervención directa de un creador.⁷ Aunque en *El origen* Darwin no pudo aportar

⁷ Los creacionistas utilizan a menudo el concepto bíblico de «género» para referirse a los grupos que surgieron de un acto de creación especial (véase Génesis, I, XII, 25), pero dentro de los cuales se permite cierto grado de evolución. Para explicar los «géneros», un sitio web del creacionismo afirma: «Por ejemplo, puede haber muchas especies de paloma, pero todas siguen siendo palomas. Por consiguiente, las palomas serían un “género” de animal (un ave)». Así pues, la microevolución se permite dentro de los «géneros», mientras que no puede producirse ni se produjo macroevolución entre géneros. En otras palabras, todos los miembros de un género tienen un antepasado común, pero no así los miembros de géneros distintos. El problema es que los creacionistas no ofrecen ningún criterio para identificar los «géneros» (¿corresponden acaso a los géneros biológicos?, ¿a las familias?, ¿pertenecen todas las moscas al mismo género o a varios géneros?), por lo que es imposible juzgar lo que ven como los límites del cambio evolutivo. Pero todos los creacionistas se muestran de acuerdo en una cosa: *Homo sapiens* es un «género» por sí mismo, y por lo tanto debe haber sido creado. No hay nada, sin embargo, ni en la teoría ni en los datos de la evolución, que implique que el cambio evolutivo pueda estar limitado: por lo que sabemos, la macroevolución no es más que microevolución en un período de tiempo muy dilatado. (Véase la visión creacionista

como pruebas formas de transición, hoy estaría muy satisfecho de ver cómo su teoría ha sido confirmada por los frutos de la moderna paleontología. Entre éstos se incluyen numerosas especies cuya existencia se había predicho hace muchos años, pero que sólo se han desenterrado durante las últimas décadas.

Pero ¿qué puede considerarse indicio fósil de una transición macroevolutiva? De acuerdo con la teoría de la evolución, para cada par de especies, por distintas que sean, hubo en algún momento una única especie que fue antepasado de las dos. A esta especie podemos denominarla «eslabón perdido». Como hemos visto, la probabilidad de descubrir esta especie ancestral en el registro fósil es casi nula. El registro fósil es, sencillamente, demasiado fragmentario.

Pero no tenemos que rendirnos, porque podemos encontrar alguna *otra* especie en el registro fósil que sea un pariente próximo del verdadero «eslabón perdido» y sirva a la perfección para documentar un antepasado común. Veamos un ejemplo. Ya en tiempos de Darwin los biólogos conjeturaron, a partir de observaciones anatómicas como las similitudes en la estructura del corazón y del cráneo, que las aves eran parientes cercanos de los reptiles. Especularon entonces que debía existir un antepasado común que, por medio de un proceso de especiación, habría producido dos linajes, uno de los cuales acabaría dando todas las aves modernas y el otro todos los reptiles actuales.

¿Qué aspecto debía de tener este antepasado común? Nuestra intuición nos dice que debía de estar a medio camino entre los reptiles modernos y las aves modernas, con una mezcla de caracteres de ambos tipos de animal. Pero no tenía por qué ser así, como Darwin decía con claridad en *El origen*:

Considerando dos especies cualesquiera, he encontrado difícil evitar el imaginarse formas directamente intermedias entre ellas; pero ésta es una opinión errónea; hemos de buscar siempre formas intermedias entre cada una de las especies y un antepasado común y desconocido, y este antepasado, por lo general, habrá diferido en algunos conceptos de todos sus descendientes modificados.

de los «géneros» en <http://www.clarifyingchristianity.com/creation.shtml> y
<http://www.nwcreation.net/biblicalkinds.html>, y una refutación en
<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hangar/2437/kinds.htm>.)

Como los reptiles aparecen en el registro fósil antes que las aves, podemos aventurar que el antepasado común de aves y reptiles fue un *antiguo reptil* y tendría aspecto de tal. Hoy sabemos que ese antepasado común era un dinosaurio. Su aspecto general daría pocas pistas de que era en realidad un «eslabón perdido», de que uno de los linajes de su descendencia acabaría dando origen con el tiempo a todas las aves modernas, y el otro a más dinosaurios. Los caracteres genuinos de las aves, como las alas y la gran quilla para el anclaje de los músculos del vuelo, sólo habrían evolucionado más tarde en la rama que condujo a las aves. Y a medida que este linaje progresaba de los reptiles a las aves, habría dado origen a muchas especies con mezclas de caracteres de reptiles y de aves. Algunas de esas especies se extinguieron; otras siguieron evolucionando hasta llegar a lo que hoy conocemos como las aves modernas. Es en estos grupos de antiguas especies, en los parientes de especies cerca de los puntos de ramificación, donde debemos buscar los indicios de los ancestros comunes.

Demostrar la ascendencia común de dos grupos no exige, por consiguiente, que hallemos fósiles de la especie exacta que fue su antepasado común, ni siquiera de especies situadas en la línea directa de descendencia desde el antepasado al descendiente. Basta con que descubramos fósiles que posean los tipos de caracteres que vinculan a los dos grupos, y, lo que es igualmente importante, que la datación de los fósiles corresponda al momento correcto del registro geológico. Una «especie transicional» no es lo mismo que una «especie ancestral»; es simplemente una especie que presenta una mezcla de los caracteres de organismos que vivieron antes y después que ella. Habida cuenta de la naturaleza fragmentaria del registro fósil, hallar estas formas en los momentos adecuados del registro es un objetivo razonable y realista. En la transición de reptil a ave, por ejemplo, las formas transicionales deberían tener el aspecto de reptiles primitivos, pero con algunos caracteres propios de las aves. Y deberíamos encontrar estas formas de transición después de que hayan evolucionado los reptiles, pero antes de que aparezcan las aves modernas. Además, las formas transicionales no tienen por qué estar en la línea directa de descendencia desde un antepasado a un descendiente vivo en la actualidad, sino que pueden ser primos evolutivos que hayan acabado extinguiéndose. Como veremos, los dinosaurios que dieron origen a las aves tenían

plumas, pero persistieron algunos dinosaurios con plumas cuando ya habían evolucionado organismos con un aspecto más parecido al de las aves actuales. Estos dinosaurios con plumas de épocas posteriores todavía constituyen indicios de la evolución, porque nos dicen algo acerca de dónde vienen las aves.

La datación y, hasta cierto punto, la apariencia física de las formas de transición pueden predecirse a partir de la teoría de la evolución. Algunas de las predicciones más recientes y vistosas que se han podido satisfacer tienen que ver con nuestro propio grupo: los vertebrados.

6. A la tierra firme: de los peces a los anfibios

Una de las predicciones mejor satisfechas de la biología evolutiva es el descubrimiento, en 2004, de una forma de transición entre los peces y los anfibios. Se trata del fósil de la especie *Tiktaalik roseae*, que nos dice mucho sobre el paso de los vertebrados a la tierra firme. Su descubrimiento es una vindicación rotunda de la teoría de la evolución.

Hasta hace unos 390 millones de años, los peces eran los únicos vertebrados. Pero, 30 millones de años más tarde, encontramos animales que son claramente *tetrápodos*, vertebrados de cuatro patas que caminaban por la tierra. Estos primitivos tetrápodos eran en muchos sentidos como los modernos anfibios: tenían la cabeza y el cuerpo planos, un cuello bien formado y extremidades bien desarrolladas, incluidas las cinturas escapular y pélvica. Pero presentan asimismo caracteres que los vinculan claramente con los peces primitivos, en particular con el grupo conocido como «peces de aletas lobuladas», así llamados a causa de sus grandes aletas óseas que les permitían apoyarse en el fondo de las lagunas y ríos someros. Entre las estructuras propias de los peces presentes en los primeros tetrápodos encontramos las escamas, los huesos de las extremidades y los huesos del cráneo (Figura 8).

¿Cómo evolucionaron los peces primitivos para poder sobrevivir en la tierra? Ésta es la pregunta que interesaba, o más bien obsesionaba, a mi colega de la Universidad de Chicago, Neil Shubin.

Neil había dedicado años al estudio de la evolución de las extremidades a partir de las aletas, y estaba decidido a entender los primeros estadios de esa evolución.

Aquí es donde entra la predicción.

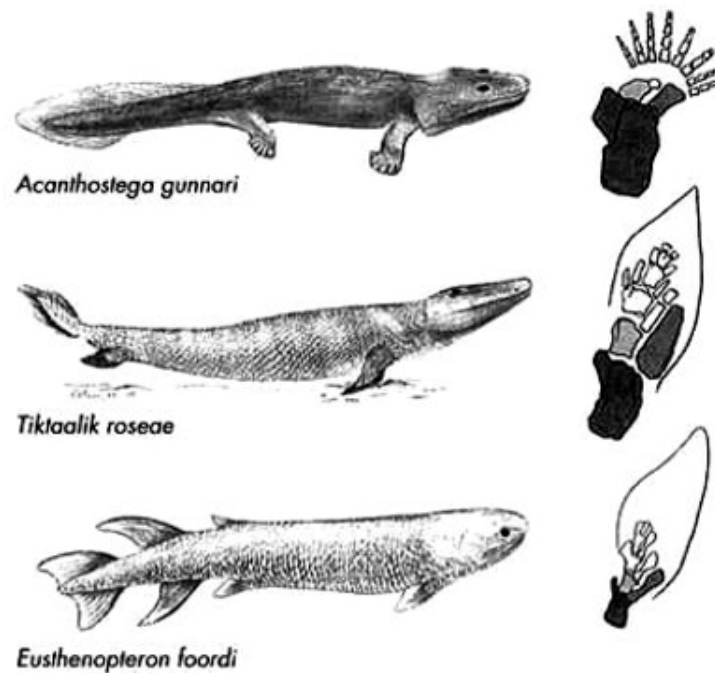


Figura 8. Invasión de la tierra firme. Un primitivo pez lobulado (Eusthenopteron foordi) de hace unos 385 millones de años; un tetrápodo terrestre (Acanthostega gunnari) de Groenlandia, de hace unos 365 millones de años; y la forma de transición, Tiktaalik roseae, de la isla Ellesmere, de hace unos 375 millones de años.

El carácter intermedio de la forma corporal de Tiktaalikmes soslayado por el carácter intermedio de sus extremidades, que tienen una estructura ósea a medio camino entre la de las robustas aletas del pez de aletas lobuladas y las extremidades ambulatorias, todavía más robustas, del tetrápodo. Los huesos que evolucionaron hacia los huesos de los brazos y las piernas de los mamíferos modernos aparecen en color gris; el hueso con el tono más oscuro se convirtió en nuestro húmero, y los de tono gris medio y claro se convirtieron en el radio y el cubito, respectivamente. Ilustración de Kalliopi Monoyios

Si hace 390 millones de años había peces de aletas lobuladas pero no vertebrados terrestres, y hace 360 millones de años ya había vertebrados claramente terrestres, ¿dónde podían encontrarse las formas transicionales? En algún lugar a medio

camino. Siguiendo esta lógica, Shubin predijo que si habían existido formas transicionales, sus fósiles deberían encontrarse en estratos de hace unos 375 millones de años. Además, las rocas deberían tener su origen en aguas dulces, no en sedimentos marinos, porque tanto los peces de aletas lobuladas posteriores como los anfibios habitaban las aguas dulces.

Shubin y sus colegas buscaron entonces en sus libros de geología un mapa de los afloramientos de rocas sedimentarias de agua dulce de la edad apropiada, y decidieron centrar sus esfuerzos en una región paleontológicamente inexplorada del Ártico canadiense: la isla Ellesmere, que se encuentra en el océano Ártico, al norte de Canadá. Tras cinco años de costosa e infructuosa búsqueda, por fin dieron con un filón: un grupo de esqueletos fósiles apilados en una roca sedimentaria formada en un antiguo río. La primera vez que Shubin vio el rostro del fósil asomando por la roca, supo que por fin había encontrado su forma transicional. En honor al pueblo inuit y al patrocinador que ayudó a costear las expediciones, el fósil recibió el nombre de *Tiktaalik roseae* (*Tiktaalik* significa «pez grande de agua dulce» en inuit, y *roseae* es una referencia críptica al patrocinador anónimo).

Tiktaalik posee caracteres que lo convierten en un vínculo directo entre los anteriores peces de aletas lobuladas y los anfibios posteriores (Figura 8). Con agallas, escamas y aletas, se trata claramente de un pez que vivía en el agua. Pero también posee características de anfibio. Para empezar, tiene la cabeza plana como la salamandra, con los ojos y las narinas en la parte superior y no a los lados del cráneo. Esto sugiere que vivía en aguas someras y podía ver, y probablemente respirar, por encima de la superficie. Las aletas son más robustas, lo que permitía al animal sostenerse sobre ellas y levantarse para explorar su entorno. Y, al igual que los primeros anfibios, *Tiktaalik* tiene cuello. Los peces carecen de cuello, pues tienen el cráneo unido directamente a las clavículas.

Lo más importante es, sin embargo, que *Tiktaalik* posee dos caracteres nuevos que habrían de ayudar a sus descendientes a invadir el medio terrestre. El primero es un conjunto de costillas robustas que ayudaban al animal a bombear el aire hasta sus pulmones y a mover el oxígeno desde las agallas (*Tiktaalik* podía respirar de las dos maneras). Y en lugar de los numerosos y diminutos huesos de las aletas de los peces de aletas lobuladas, *Tiktaalik* tenía en los miembros menos huesos, pero más

robustos, huesos parecidos en número y posición a los de todos los animales terrestres que los siguieron, incluidos nosotros mismos. De hecho, sus miembros se pueden describir adecuadamente como mitad aleta, mitad pata.

No cabe duda de que *Tiktaalik* estaba bien adaptado a vivir y arrastrarse en aguas someras, a mirar por encima de la superficie del agua y a respirar aire. Conocida su estructura, podemos imaginar cuál debió de ser el siguiente paso evolutivo crucial, que con toda probabilidad comportó una conducta novedosa. Unos pocos descendientes de *Tiktaalik* tuvieron el arrojo de aventurarse fuera del agua aguantados por sus robustas aletas-patas, quizá para alcanzar otro río (como hacen en la actualidad los curiosos peces del fango tropicales), para evitar depredadores, o quizá para buscar comida entre los muchos insectos gigantes que ya había producido la evolución. Si aventurarse en tierra firme comportaba ventajas, la selección natural habría ido moldeando esos exploradores de peces a anfibios. Ese primer pasito en el fango resultó ser un gran salto para los vertebrados, pues con el tiempo habría de conducir a la evolución de todos los animales terrestres dotados de columna vertebral.

El propio *Tiktaalik* no estaba preparado para vivir fuera del agua. Para empezar, todavía no había evolucionado hasta el punto de disponer de miembros que le permitieran caminar. Y todavía tenía agallas internas para respirar bajo del agua. Así que podemos hacer otra predicción. En algún lugar, en sedimentos de agua dulce de hace unos 380 millones de años, encontraremos uno de los primeros animales terrestres con agallas reducidas y extremidades algo más robustas que las de *Tiktaalik*.

Tiktaalik pone de manifiesto que nuestros antepasados eran peces depredadores con la cabeza aplanada que vivían en las aguas someras de los ríos. Es un fósil que vincula a los peces y los anfibios de maravilla. E igualmente maravilloso es el hecho de que su descubrimiento no se hubiese ya anticipado, sino predicho que se produciría en rocas de cierta edad y de cierto lugar.

La mejor manera de vivir el drama de la evolución es ver los fósiles o, mejor aún, tenerlos en las manos. Mis estudiantes gozaron de esta oportunidad cuando Neil trajo un molde de *Tiktaalik* a la clase, lo hizo pasar entre los alumnos y les indicó por qué cumplía con los requisitos de una verdadera forma transicional. Ésta fue,

para ellos, la más tangible evidencia de que la evolución era cierta. ¿Con qué frecuencia tenemos en las manos un trozo de historia evolutiva, y especialmente uno que podría haber sido de un antepasado distante?

7. Al aire: el origen de las aves

¿Para qué sirve media ala? Desde los tiempos de Darwin, esta pregunta no ha dejado de plantearse con la intención de proyectar dudas sobre la evolución y la selección natural. Los biólogos nos dicen que las aves evolucionaron a partir de reptiles primitivos, pero ¿cómo pudo un animal terrestre desarrollar por medio de la evolución la capacidad de volar? La selección natural, nos dicen los creacionistas, no puede explicar esta transición porque requiere estadios intermedios en los cuales los animales contarían sólo con unos rudimentos de alas que parecen más un engorro que una ventaja selectiva.

Pero si se piensa con un poco de detenimiento, no cuesta tanto imaginar estadios intermedios en la evolución del vuelo, estadios que podrían haber sido útiles para sus poseedores. El planeo es obviamente el primer paso. Un paso que, además, ha evolucionado de manera independiente muchas veces: en animales placentarios, en marsupiales e incluso en reptiles. Las ardillas voladoras se las arreglan muy bien planeando con unos repliegues de la piel que extienden a los lados del cuerpo, una buena manera de pasar de un árbol a otro para escapar a los depredadores o buscar nueces. Y luego está el aun más notable «lémur volador» o colugo del sureste asiático, que posee una impresionante membrana que se extiende desde la cabeza hasta la cola. Se ha visto a un colugo planear una distancia de unos 140 metros, la longitud de seis pistas de tenis, con una pérdida de altura de tan sólo ¡doce metros! No es difícil imaginar el siguiente paso de la evolución: el batido de unos miembros como los del colugo para producir el vuelo verdadero, como vemos en los murciélagos. Pero ya no tenemos que contentarnos con imaginar ese paso, pues tenemos fósiles que muestran con toda claridad cómo evolucionaron las aves voladoras.

Desde el siglo XIX, la similitud entre los esqueletos de las aves y de algunos dinosaurios llevó a los paleontólogos a teorizar que tenían un antepasado común; en concreto, los *terópodos*, unos ágiles dinosaurios carnívoros que caminaban sobre

dos patas. El registro fósil de hace unos 200 millones de años contiene muchos terópodos, pero ninguno que parezca, ni siquiera vagamente, un ave. En estratos de hace unos 70 millones de años, encontramos fósiles con un aspecto bastante moderno. Si la evolución es cierta, entonces cabía esperar encontrar la transición de reptiles a aves en rocas de entre 70 y 200 millones de años.

Y allí estaban. El primer vínculo entre aves y reptiles llegó a conocerlo el propio Darwin, quien, curiosamente, apenas lo cita de pasada en las últimas ediciones de *El origen*, y sólo como una rareza. Se trata de la que quizá sea la más célebre de todas las formas de transición: *Archaeopteryx lithographica*, un animal del tamaño de un cuervo, que se descubrió en una cantera de caliza de Alemania en 1860. (El nombre *Archaeopteryx* significa «ala antigua» y *lithographica* hace referencia a la caliza de Solnhofen, de grano lo bastante fino como para usarse en la fabricación de placas litográficas, y también para preservar las impresiones de unas blandas plumas.) *Archaeopteryx* posee la combinación justa de caracteres que uno esperaría encontrar en una forma de transición. Y su edad, de unos 145 millones de años, la sitúa allí donde esperábamos encontrarla.

En realidad, *Archaeopteryx* es más un reptil que un ave. Su esqueleto es casi idéntico al de algunos dinosaurios terópodos. Así lo clasificaron algunos biólogos que, no habiendo examinado sus fósiles con el detenimiento suficiente, no vieron las plumas. (La Figura 9 muestra esta similitud entre los dos tipos.) Los caracteres reptilianos incluyen una mandíbula con dientes, una cola larga y ósea, garras, dedos separados en las alas (en las aves modernas estos huesos están fusionados, como puede verse al comer alitas de pollo) y un cuello unido al cráneo por detrás (como en los dinosaurios) en lugar de por la base (como en las aves modernas). Los caracteres de ave son sólo dos: largas plumas y un dedo oponible que probablemente servía para posarse en una percha. Todavía no está claro que este animal, aunque dotado de plumas, pudiera volar, aunque sus plumas asimétricas (con un lado más largo que el otro) sugieren que así es. Las plumas asimétricas, como las alas de los aviones, crean la forma de alerón necesaria para un vuelo aerodinámico. Pero aun en el caso de que pudiera volar, *Archaeopteryx* es sobre todo un dinosaurio. Es también lo que los evolucionistas llaman un «mosaico»: en

lugar de tener todos sus caracteres a medio camino entre los reptiles y las aves, tiene algunos propios de las aves y la mayoría de los reptiles.

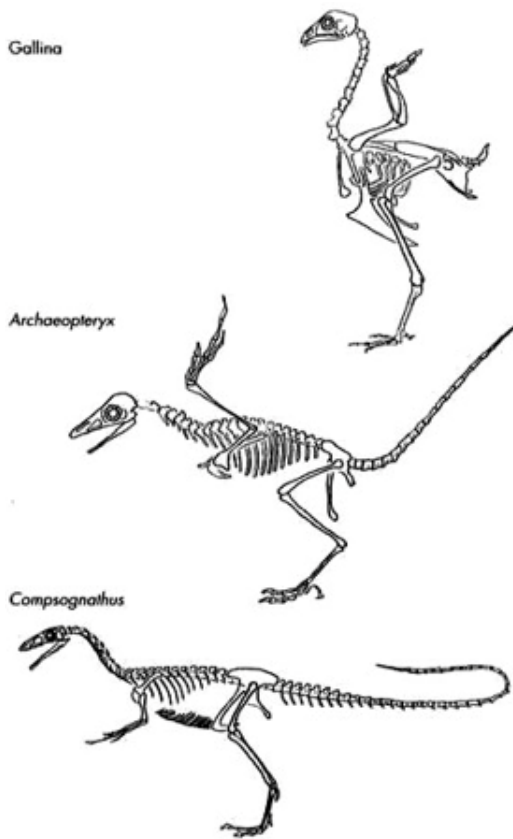


Figura 9. Esqueletos de un ave moderna (gallina), una forma de transición (Archaeopteryx) y un pequeño dinosaurio terópodo carnívoro y bípedo (Compsognathus), semejante a los antepasados de Archaeopteryx. Pueden apreciarse en Archaeopteryx algunos caracteres parecidos a los de las aves actuales (plumas y un dedo oponible), pero su esqueleto es muy similar al del dinosaurio, por ejemplo en los dientes, la pelvis reptiliana y la larga cola ósea. Archaeopteryx tenía más o menos el tamaño de un cuervo; Compsognathus era ligeramente mayor. Ilustración de Kalliopi Monoyios (Compsognathus a partir de Peyer 2006).

Tras el descubrimiento de *Archaeopteryx*, durante muchos años no se encontró ningún otro animal entre los reptiles y las aves, lo que dejaba abierta una amplia brecha entre las aves actuales y sus antepasados. Pero entonces, a mediados de la década de 1990, una avalancha de sorprendentes descubrimientos en China comenzó a cubrir la brecha. Estos fósiles, hallados en sedimentos lacustres que preservan las impresiones de las partes blandas, representan un verdadero desfile de dinosaurios terópodos con plumas.⁸ Algunos presentan unas estructuras

⁸ En la actualidad los paleontólogos creen que todos los terópodos —incluido el famoso *Tyrannosaurus rex*—, estaban recubiertos de plumas de algún tipo. Estas plumas no suelen enseñarse en las reconstrucciones de museos

filamentosas muy pequeñas que les recubren todo el cuerpo y que probablemente sean unas primitivas plumas.

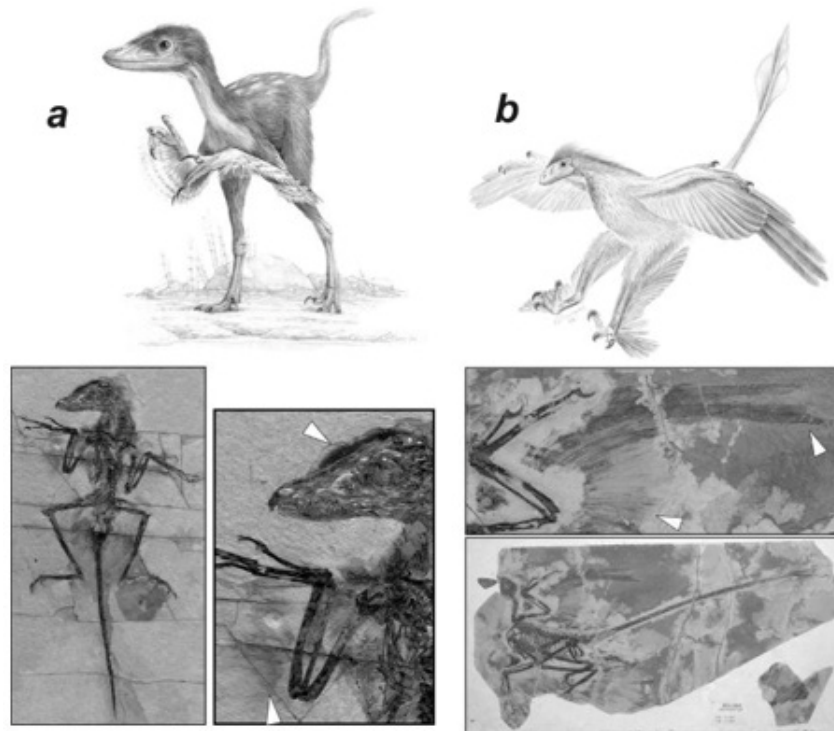


Figura 10. a) El dinosaurio con plumas Sinomithosaurus millenii, fósil original de China (con una edad de unos 125 millones de años), y reconstrucción artística. El fósil muestra con claridad la impresión de plumas filamentosas, especialmente en la cabeza y las extremidades anteriores (flechas). Ilustración de Sinomithosaurus de Mick Ellison, utilizada con permiso; fósil, con permiso del American Museum of Natural History. b) El extraño dinosaurio «de cuatro alas» Microraptor gui, que tenía largas plumas en las cuatro extremidades. Estas plumas (flechas) se ven claramente en el fósil, de hace unos 120 millones de años. No está del todo claro si este animal podía volar o sólo planear, pero las «alas» posteriores casi con seguridad lo ayudaban a tomar tierra, tal como muestra el dibujo. Ilustración de Microraptor de Kalliopi Monoyios; fósil, con permiso de American Museum of Natural History

o en películas como Parque Jurásico. ¡Ver un T. rex cubierto de plumón no haría mucho por reforzar su imagen aterradora!

Un fósil especialmente digno de mención es *Sinomithosaurus millenii* (*Sinomithosaurus* significa «ave-lagarto chino»), cuyo cuerpo aparece totalmente recubierto por unas plumas finas y alargadas, pero tan pequeñas que difícilmente podrían ayudarlo a volar (Figura 10a).

Y sus garras, dientes y larga cola ósea muestran con toda claridad que este animal estaba muy lejos todavía de las aves modernas.⁹ Otros dinosaurios presentan plumas de tamaño mediano en la cabeza y las extremidades anteriores. Incluso otros tienen grandes plumas en las extremidades anteriores y la cola, como las aves modernas. El más sorprendente de todos es *Microraptor gui*, el «dinosaurio de cuatro alas». A diferencia de las aves modernas, este extraño dinosaurio de unos 75 centímetros de longitud tenía cubiertas de plumas las extremidades anteriores y también las patas (Figura 10b), que una vez extendidas probablemente le sirvieran para planear.¹⁰

Por lo que podemos saber, los dinosaurios terópodos no sólo tenían caracteres que los acercaban a las aves: también se comportaban como aves. El paleontólogo norteamericano Mark Norell y su equipo han descrito dos fósiles que demuestran formas antiguas de comportamiento. Si de algún fósil puede decirse que es «conmover», es de éstos. Uno de ellos es un pequeño dinosaurio con plumas que duerme con la cabeza escondida bajo su antebrazo plegado como un ala, igual que hacen las aves modernas (Figura 11). El animal, que ha recibido el nombre científico de *Mei long* («dragón profundamente dormido», en chino), debió morir en medio del sopor. El otro fósil es una hembra de terópodo que encontró su fin mientras empollaba su puesta de huevos, lo que demuestra un comportamiento de cuidado de la nidada parecido al de las aves.

Todos los fósiles de dinosaurios con plumas datan de hace entre 135 y 110 millones de años, más recientes que *Archaeopteryx*, que está datado en 145 millones de años. Esto significa que no podían ser antepasados directos de *Archaeopteryx*, pero podrían haber sido sus primos. Los dinosaurios con plumas probablemente continuaron existiendo después de que uno de los suyos diera origen a las aves. Por

⁹ Una estimulante descripción de cómo se descubrió y preparó a «Dave», el primer espécimen de *Sinomithosaurus*, puede encontrarse en <http://www.amnh.org/learn/pd/dinos/markmeetsdave.html>.

¹⁰ El programa NOVA realizó un excelente documental para la televisión sobre el descubrimiento de *Microraptor gui* y la posterior controversia sobre si volaba. «The Four-Winged Dinosaur» puede verse en línea en <http://www.pbs.org/wgbh/nova/microraptor/program.html>.

consiguiente, deberíamos poder descubrir dinosaurios con plumas más antiguos que pudieran ser antecesores de *Archaeopteryx*.



Figura 11. Comportamiento fósil: el dinosaurio terópodo con plumas Mei long (arriba) fosilizado en posición de percha, durmiendo con la cabeza escondida bajo la extremidad anterior. En medio: reconstrucción de Mei long a partir del fósil. Abajo: un ave actual (un gorrión joven) durmiendo en la misma posición. Ilustración de Mei long de Mick Ellison, utilizada con permiso; fósil, con permiso del American Museum of Natural History; gorrión, por cortesía de José Luis Sanz, Universidad Autónoma de Madrid.

El problema es que las plumas sólo se preservan en sedimentos especiales: los limos de grano fino de ambientes tranquilos como los fondos de lagos y lagunas. Y estas condiciones son muy poco frecuentes. Pero podemos hacer otra predicción evolutiva contrastable: algún día encontraremos fósiles de dinosaurio con plumas más antiguos que *Archaeopteryx*.¹¹ No estamos seguros de si *Archaeopteryx* es la única especie que dio origen a todas las aves modernas. Parece improbable que sea el «eslabón perdido». Pero con independencia de ello, es un fósil de una larga serie (algunos descubiertos por el intrépido Paul Sereno) que documentan con toda

¹¹ En una auténtica hazaña científica reciente, se ha logrado obtener fragmentos de una proteína, el colágeno, de un fósil de *T. rex* de hace 68 millones de años, y determinar la secuencia de aminoácidos de estos fragmentos. El análisis muestra que *T. rex* está más estrechamente emparentado con las aves actuales (gallinas y avestruces) que con cualquier otro grupo de vertebrados vivos. Este descubrimiento confirma lo que los científicos sospechan desde hace tiempo: todos los dinosaurios se extinguieron con la excepción de un linaje que dio origen a las aves. Cada vez más, los biólogos reconocen en las aves unos dinosaurios altamente modificados. De hecho, las aves suelen clasificarse como dinosaurios.

claridad la aparición de las aves modernas. A medida que nos acercamos al presente vemos cómo la cola reptiliana se acorta, los dientes desaparecen, las garras se fusionan y aparece un gran hueso pectoral, la quilla, para el anclaje de los músculos del vuelo.

Cuando juntamos todas las piezas, vemos que los fósiles nos muestran que el plan esquelético básico de las aves, y las esenciales plumas, evolucionaron *antes* de que las aves pudieran volar. Hubo muchos dinosaurios con plumas, y éstas están claramente relacionadas con las de las aves modernas. Pero si las plumas no aparecieron como una adaptación para volar, ¿para qué demonios servían? No lo sabemos. Quizá como ornamentación o exhibición, para atraer a las parejas. Parece más probable, sin embargo, que sirvieran para aislar el cuerpo. A diferencia de los reptiles modernos, los terópodos podrían haber sido, aunque sólo parcialmente, animales de sangre caliente; y aunque no lo fueran, las plumas podrían haberlos ayudado a mantener la temperatura corporal. Más misterioso aún es *a partir de qué* evolucionaron las plumas. Cabe pensar que se derivan de las mismas células que dieron lugar a las escamas de los reptiles, pero no todo el mundo concuerda en ello. Pese a todas las incógnitas, podemos conjeturar cómo la selección natural condujo a las aves modernas. Los primeros dinosaurios carnívoros evolucionaron hacia unas patas delanteras y manos más largas, lo que probablemente los ayudara a agarrar y manipular sus presas. Este tipo de agarre habría favorecido la evolución de músculos que permitieran extender con rapidez las patas delanteras y recogerlas, justo el tipo de movimiento que se utiliza para batir las alas en el vuelo activo. Luego vino el recubrimiento del cuerpo con plumas, probablemente como aislante. Dadas estas innovaciones, hay al menos dos vías por las que pudo evolucionar el vuelo. La primera es la conocida como «árboles abajo». Hay indicios para creer que algunos terópodos vivían, al menos en parte, en los árboles. Unos miembros recubiertos de plumas habrían ayudado a estos reptiles a planear de un árbol a otro, o de un árbol al suelo, lo que les hubiera servido para escapar de sus depredadores, encontrar alimento más fácilmente o amortiguar la caída.

Un escenario distinto, y más probable, es la teoría conocida como «suelo arriba»; de acuerdo con ella, el vuelo habría evolucionado a consecuencia de las carreras y saltos con los brazos abiertos que los dinosaurios con plumas debían realizar para

capturar a sus presas. Unas alas más largas también podrían haber evolucionado como una ayuda para correr. La perdiz de Chukar, un ave de caza estudiada por Kenneth Dial, de la Universidad de Montana, representa un ejemplo vivo de este paso. Estas perdices no vuelan casi nunca, pero baten sus alas sobre todo como ayuda para correr cuesta arriba. No obtienen así una propulsión adicional, sino más tracción contra el terreno. Los pollos recién nacidos pueden correr por pendientes de 45 grados, y los adultos pueden ascender pendientes de 105 grados, ¡salientes más que verticales!, con sólo correr y batir las alas. La ventaja evidente es que trepar cuesta arriba los ayuda a escapar de sus depredadores. El siguiente paso en la evolución del vuelo sería dar pequeños saltos y mantenerse en el aire brevemente, como hacen los pavos y las codornices para escapar de un peligro.

Tanto en el escenario de «árboles abajo» como el de «suelo arriba», la selección natural podría haber comenzado a favorecer a los individuos que pudieran volar más lejos en lugar de limitarse a planear, saltar o hacer vuelos cortos. Luego vendrían las otras innovaciones compartidas por las aves actuales, como los huesos huecos para ser más ligeras y la quilla.

Aunque podemos especular sobre los detalles, la existencia de fósiles de transición y la evolución de las aves desde los reptiles son hechos. Fósiles como *Archaeopteryx* y sus parientes posteriores muestran una mezcla de caracteres de aves y reptiles primitivos, y aparecen en el momento esperado del registro fósil. Los científicos predijeron que las aves habían evolucionado a partir de los dinosaurios terópodos y, efectivamente, hemos descubierto dinosaurios terópodos con plumas. Vemos una progresión en el tiempo desde los primeros terópodos con el cuerpo recubierto por estructuras finas y filamentosas a los posteriores con plumas, probablemente buenos planeadores. Lo que vemos en la evolución de las aves es la conversión de unos caracteres antiguos (patas delanteras con dedos y pequeños filamentos en la piel) en otros nuevos (alas sin dedos y plumas), justo como predice la teoría de la evolución.

8. De vuelta al agua: la evolución de las ballenas

Duane Gish, un creacionista norteamericano, es bien conocido por sus animados y populares (aunque radicalmente desacertados) ataques a la evolución. En una

ocasión asistí a una de sus conferencias, durante la cual Gish se burló de la teoría de los biólogos según la cual las ballenas descienden de animales terrestres emparentados con las vacas. ¿Cómo, se preguntaba, podía producirse tal transición si la forma intermedia habría estado mal adaptada tanto en la tierra como en el mar, y por consiguiente no podía explicarse por la selección natural? (Este argumento recuerda al de la media ala de las aves.) Para ilustrar lo que estaba diciendo, Gish proyectó una dispositiva en la que se mostraba una caricatura de sirena con la parte delantera de vaca y la trasera de pez. Aparentemente desconcertada por su propio destino evolutivo, esta bestia claramente inadaptada permanecía en la ribera del agua, con un gran signo de interrogación sobre su cabeza. El dibujo tuvo el efecto buscado: la audiencia rompió a reír. ¿De cuánta estulticia eran capaces los evolucionistas?

Sin duda una «vaca-pezu» es un ejemplo grotesco de una forma de transición entre los mamíferos terrestres y los acuáticos, un ejemplo de «evolución en vacarrota»,¹² que diría Gish. Pero dejemos a un lado la retórica y los chascarrillos y observemos la naturaleza. ¿Podemos encontrar algún mamífero que viva tanto en la tierra como en el agua, el tipo de animal que supuestamente no puede haber evolucionado?

Fácil. Un buen candidato es el hipopótamo, que aunque estrechamente emparentado con los mamíferos terrestres, es tan acuático como puede serlo un mamífero terrestre. (Hay dos especies de hipopótamo, el pigmeo y el «normal», cuyo nombre científico es, muy apropiadamente, *Hippopotamus amphibius*.) Los hipopótamos pasan la mayor parte de su tiempo sumergidos en los ríos y pantanos de los trópicos, explorando sus dominios con ojos, narinas y orejas situados en la parte superior de su cabeza, y todos los cuales pueden cerrarse herméticamente bajo el agua. Los hipopótamos se aparean bajo el agua, y su prole, que nada antes que camina, nada y mama bajo el agua. Al ser sobre todo acuáticos, poseen adaptaciones especiales para salir del agua y pastar: suelen comer por la noche y, como son propensos a quemarse la piel, secretan un fluido rojizo y aceitoso que contiene un pigmento, el ácido hiposudórico, que actúa como un protector solar y posiblemente como antibiótico. Esto ha dado origen al mito de que los hipopótamos sudan sangre. Es evidente que están bien adaptados a su medio, y no es difícil de

¹² La expresión original de Gish es *udder failure*, que en inglés americano se pronuncia igual que *utter failure* («absoluto fracaso»); *udder* significa «ubre». (N. del t.)

entender que si encontrasen suficiente alimento bajo el agua, podrían evolucionar hasta convertirse en un animal totalmente acuático como las ballenas.

Pero no tenemos por qué contentarnos con imaginar cómo podrían haber evolucionado las ballenas extrapolando lo que vemos en especies vivas. Disponemos para las ballenas de un excelente registro fósil, gracias a sus hábitos acuáticos y sus huesos robustos que se fosilizan con facilidad. Durante los últimos veinte años hemos podido hacernos una buena idea de cómo evolucionaron. Se trata, además, de uno de nuestros mejores ejemplos de transición evolutiva, ya que disponemos de una serie de fósiles ordenada cronológicamente, quizá un linaje de antecesores a descendientes, que muestra cómo pasaron de la tierra al agua.

Se sabe y acepta desde el siglo XVII que las ballenas y sus primos los delfines y las marsopas son mamíferos. Son animales de sangre caliente, paren sus crías y las amamantan, y tienen pelo alrededor de sus orificios nasales. Los análisis de ADN y la presencia de caracteres vestigiales, como su pelvis y patas traseras rudimentarias, ponen de manifiesto que sus antepasados eran terrestres. Las ballenas casi con seguridad evolucionaron a partir de una especie de artiodáctilo, el grupo de mamíferos con un número par de dedos, como los camellos y los cerdos.¹³ Los biólogos creen en la actualidad que el pariente más cercano de las ballenas es, como algún lector ya habrá imaginado, el hipopótamo, así que la evolución imaginada de los hipopótamos a las ballenas no es tan inverosímil, después de todo. Pero las ballenas tienen sus propias características únicas que las distinguen de sus parientes terrestres. Entre éstas se incluyen la ausencia de patas traseras, las patas delanteras con forma de aleta, la cola aplanada y lobulada, el espiráculo (un orificio nasal en la parte superior de la cabeza), el cuello corto, los dientes simples y cónicos (distintos de los dientes complejos con varias cúspides de los animales terrestres), caracteres especiales de la oreja que les permiten oír bajo el agua, y proyecciones robustas encima de las vértebras para el anclaje de los poderosos músculos natatorios de la cola. Gracias a una fabulosa serie de hallazgos fósiles en Oriente Medio, podemos seguir la evolución de cada uno de estos caracteres (salvo por la cola sin huesos, que no se fosiliza) desde las formas terrestres hasta las formas acuáticas.

¹³ Las secuencias de ADN y proteínas de las ballenas muestran que, entre los mamíferos, sus parientes más cercanos son los artiodáctilos, un hallazgo que concuerda plenamente con los indicios fósiles.

Disponemos de abundantes fósiles de mamíferos de hace 60 millones de años, pero ninguno es de ballena. No aparecen hasta unos 30 millones de años después unos animales parecidos a las ballenas actuales. Debería ser posible encontrar formas de transición durante este intervalo. Y, una vez más, es precisamente ahí donde los encontramos. La Figura 12 muestra, en orden cronológico, algunos de los fósiles que participaron en esta transición, que se extiende desde hace 52 millones de años hasta hace 40 millones de años.

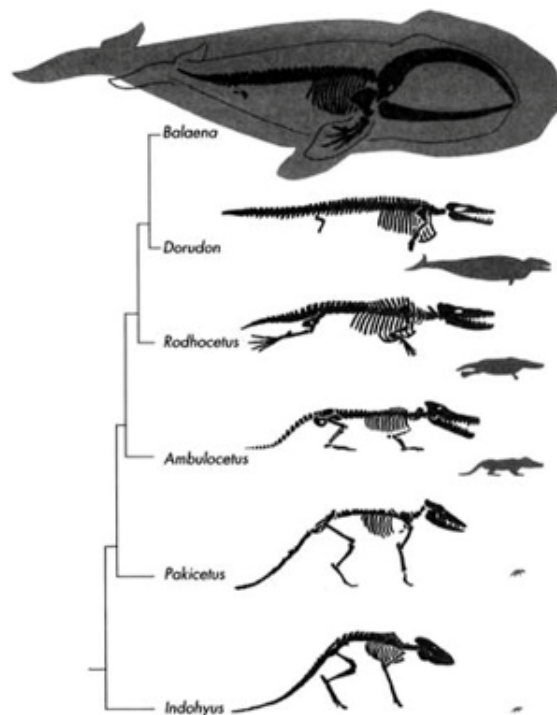


Figura 12. Formas de transición en la evolución de las ballenas modernas. (Balaena es la ballena barbada actual, con pelvis y patas traseras vestigiales, mientras que los otros géneros son fósiles de transición.) A la derecha, en gris, se muestra el tamaño relativo de los animales. El «árbol» muestra las relaciones evolutivas entre estas especies. Ilustración de Kalliopi Monoyios.

No hay necesidad de describir esta transición con todo detalle porque los dibujos hablan por sí mismos (si no gritan) de cómo un animal terrestre se echó al agua. La secuencia comienza con un fósil descubierto recientemente de un pariente cercano

de las ballenas, un animal del tamaño de un mapache llamado *Indohyus*. Este animal vivió hace 48 millones de años y, tal como se había predicho, era un artiodáctilo. Es claramente un pariente cercano de las ballenas porque posee rasgos especiales en las orejas y los dientes que sólo se encuentran en las ballenas y en sus antepasados acuáticos. Aunque *Indohyus* aparece algo más tarde que los antepasados mayormente acuáticos de las ballenas, es probable que se acerque mucho al aspecto que debía de tener el antepasado de los cetáceos. Además, era al menos parcialmente acuático. Lo sabemos porque sus huesos eran más densos que los de los mamíferos completamente terrestres, lo que impedía que flotase en el agua, y porque los isótopos extraídos de sus dientes demuestran que absorbía mucho oxígeno del agua. Lo más probable es que vadeara los ríos o lagos someros para rozar la vegetación o escapar de sus enemigos, de modo parecido a como lo hace en nuestros días un animal parecido, el ciervo-ratón acuático.¹⁴ Esta vida parcialmente acuática probablemente situara a los antecesores de las ballenas en el camino hacia la vida plenamente acuática.

Indohyus no fue un antepasado directo de las ballenas, pero casi con certeza fue primo de uno de ellos. Sin embargo, si nos movemos unos 4 millones de años atrás, hasta hace 52 millones de años, encontramos lo que bien podría ser ese antecesor. Se trata de un cráneo fósil de un animal del tamaño de un lobo llamado *Pakicetus*, que es un poco más parecido al de las ballenas que el de *Indohyus*, pues tiene dientes simples y orejas semejantes a las de los cetáceos actuales. *Pakicetus* todavía no se parecía en nada a una ballena moderna, y en el caso de haberlo podido ver, no se nos ocurriría que él o alguno de sus parientes hubieran de dar origen a una extraordinaria radiación evolutiva. Luego le siguen, en rápida secuencia, una serie de fósiles que con el tiempo fueron haciéndose cada vez más acuáticos. De hace 50 millones de años tenemos el notable *Ambulocetus* (literalmente, «ballena caminadora»), con un cráneo alargado y reducido pero que todavía tiene miembros robustos que acaban en unas pezuñas que revelan su ascendencia. Probablemente pasara casi todo el tiempo en aguas poco profundas, y sobre la tierra firme se habría bambaleado con dificultad, como les pasa a las focas. *Rodhocetus* (hace 47 millones de años) es todavía más acuático. Sus narinas han

¹⁴ El lector puede ver un ciervo-ratón corriendo hacia el agua para escapar de un águila en <http://www.youtube.com/watch?v=13GQbT21jxs>.

migrado un poco hacia atrás, y su cráneo es más alargado. A juzgar por sus robustas proyecciones en la columna vertebral para anclar los músculos de la cola, *Rodhocetus* debió de ser un buen nadador, mientras que el pequeño tamaño de su pelvis y extremidades posteriores debían suponerle una desventaja en tierra firme. No cabe duda que debía pasar casi todo el tiempo en el mar. Por último, hace 40 millones de años encontramos los fósiles *Basilosaurus* y *Dorudon*, que son claramente mamíferos acuáticos con el cuello corto y los orificios nasales en la parte superior del cráneo. Sabemos que no podían pasar ningún tiempo en tierra firme por su pelvis y extremidades posteriores de tamaño reducido (apenas medio metro en *Dorudon*, un animal de 15 metros) y desvinculadas del resto del esqueleto.

La evolución de las ballenas a partir de animales terrestres se produjo con notable rapidez: los desarrollos más importantes se produjeron en apenas 10 millones de años. Eso no es mucho más de lo que nos costó a nosotros divergir de nuestro antepasado común con los chimpancés, una transición que involucró muchas menos modificaciones en el cuerpo. No obstante, debe tenerse en cuenta que la adaptación a la vida en el mar no comportó la evolución de ningún carácter nuevo, sólo modificaciones de caracteres antiguos.

Pero ¿por qué algunos animales volvieron al agua? Después de todo, unos cuantos millones de años atrás habían invadido los continentes. No estamos seguros de por qué se produjo una migración inversa, pero tenemos varias ideas. Una posibilidad contempla la desaparición de los dinosaurios junto a sus feroces parientes marinos, los monosauros, ictiosauros y plesiosauros, todos ellos depredadores de peces. Estos animales no sólo hubieran competido por el alimento con los mamíferos acuáticos, sino que probablemente los hubieran convertido en sus presas. Una vez extinguidos sus competidores reptilianos, los antepasados de las ballenas debieron de encontrar un nicho disponible, libre de depredadores y repleto de alimento. El mar se ofrecía para la invasión, y todos sus beneficios estaban a pocas mutaciones de distancia.

9. Qué dicen los fósiles

Si llegados a este punto el lector se siente abrumado por los fósiles, le consolará saber que he omitido otros centenares que también muestran la evolución. Está la

transición entre los reptiles y los mamíferos, tan ampliamente documentada con «reptiles mamiferoides» que constituye el asunto de varios libros. Están también los caballos, una ramificación evolutiva que parte de unos pequeños antepasados de cinco dedos a la orgullosa especie de pezuña que vemos hoy. Y, naturalmente, el registro fósil de los humanos, descrito en el capítulo 8, que sin lugar a dudas constituye el mejor ejemplo de una predicción evolutiva que los descubrimientos han satisfecho.

A riesgo de aburrir al lector, mencionaré brevemente unas pocas formas de transición más. La primera corresponde a un insecto. Sobre la base de sus semejanzas anatómicas, los entomólogos habían postulado que las hormigas debían de haber evolucionado a partir de unas avispas no sociales. En 1967, E. O. Wilson y colaboradores hallaron, preservada en ámbar, una hormiga «transicional» que poseía casi el catálogo completo de caracteres de hormiga y avispa que los entomólogos habían predicho (Figura 13).

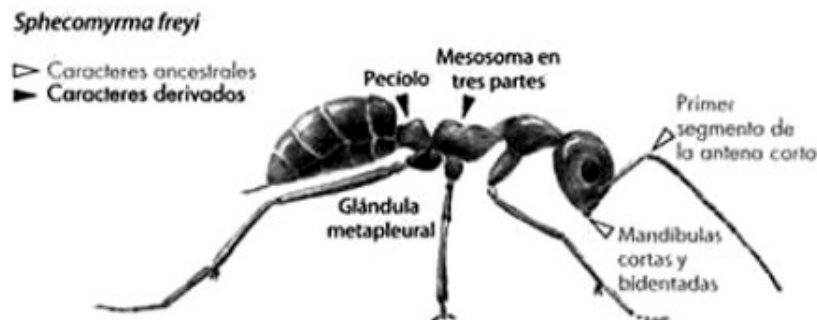


Figura 13. Insecto transicional, una de las primeras hormigas, con caracteres primitivos de avispa (el grupo ancestral predicho) y caracteres derivados propios de las hormigas. De esta especie, Sphecomyrma freyi, se encontró un único espécimen preservado en ámbar de hace 92 millones de años. Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Wilson et al. (1967).

De modo parecido, desde hacía mucho tiempo se suponía que las serpientes habían evolucionado a partir de reptiles con aspecto de lagarto que perdieron las patas, ya que los reptiles con patas aparecen en el registro fósil mucho antes que las serpientes. En 2006, unos paleontólogos que excavaban en Patagonia encontraron

un fósil de la serpiente más antigua conocida, de hace 90 millones de años. Tal como se había predicho, tenía la cintura pélvica pequeña y las patas posteriores reducidas. Pero quizá el hallazgo más emocionante sea un fósil de hace 530 millones de años descubierto en China llamado *Haikouella lanceolata*, que se asemeja a una pequeña anguila con una aleta dorsal con volantes. Pero también tenía cabeza, cerebro, corazón y una cuerda cartilaginosa que le recorría el dorso: un notocordio. Este fósil marca lo que quizá sea el primer cordado, el grupo que dio origen a todos los vertebrados, incluidos los humanos. En este complejo organismo de apenas un par de centímetros de longitud podrían encontrarse las raíces de nuestra propia evolución.

El registro fósil nos enseña tres cosas. En primer lugar, nos habla de la evolución con una voz poderosa y elocuente. El registro de las rocas confirma varias de las predicciones de la teoría de la evolución: el cambio gradual dentro de los linajes, la división de linajes y la existencia de formas de transición entre tipos de organismos muy distintos. No es posible ignorar toda esta evidencia, no es posible arrumbarla. La evolución ocurrió, y en muchos casos sabemos cómo.

En segundo lugar, cuando hayamos formas de transición, las encontramos dentro del registro fósil justo allí donde las esperamos. Las primeras aves aparecen después de los dinosaurios pero antes que las aves modernas. Hallamos ballenas ancestrales que llenan la brecha entre sus propios antepasados, pobres marineros, y las ballenas claramente modernas. Si la evolución no fuese cierta, no encontraríamos los fósiles en un orden con sentido evolutivo. Interrogado sobre la observación que podría *refutar* la evolución, el biólogo cascarrabias J. B. Haldane al parecer gruñó: « ¡Fósiles de conejo en el Precámbrico!». (El período geológico que acabó hace 543 millones de años.) Huelga decir que jamás se han hallado conejos precámbricos ni ningún otro fósil anacrónico.

Por último, el cambio evolutivo, incluso el más radical, casi siempre implica una remodelación de lo viejo en lo nuevo. Las patas de los animales terrestres son variaciones de los robustos miembros de los peces ancestrales. Los minúsculos huesecillos del oído medio de los mamíferos están hechos a partir de huesos mandibulares de sus antecesores reptilianos. Las alas de las aves derivan de las patas de los dinosaurios. Y las ballenas son animales terrestres alargados cuyas

extremidades anteriores se han convertido en aletas y cuyas narinas han migrado hasta la parte superior de la cabeza.

No hay razón alguna para que un diseñador celeste que crea unos organismos desde la nada, igual que un arquitecto diseña sus edificios, hiciera las nuevas especies remodelando caracteres de otras especies existentes. Podía haber construido cada especie desde cero. Pero la selección natural sólo puede actuar modificando lo que ya existe, no puede producir caracteres nuevos a partir de la nada. El darwinismo predice, por consiguiente, que las especies nuevas deben ser modificaciones de las existentes. El registro fósil confirma abundantemente esta predicción.

Capítulo 3

Reliquias: vestigios, embriones y mal diseño



Nada en la biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución.

THEODOSIUS DOBZHANSKY

Contenido:

1. *Vestigios*
2. *Atavismos*
3. *Genes muertos*
4. *Palimpsestos en embriones*
5. *Mal diseño*

Antes del papel, en la Europa medieval los manuscritos se escribían sobre pergamino y vitela, finas láminas de piel de animal seca. Como eran difíciles de producir, muchos escritores medievales reutilizaban láminas antiguas, raspando las palabras anteriores para escribir sobre páginas limpias. Estos manuscritos reciclados reciben el nombre de palimpsestos, del griego «raspado de nuevo».

A menudo, sin embargo, quedaban trazas minúsculas de los escritos anteriores, y estos restos han resultado ser esenciales para nuestro conocimiento del mundo antiguo. Hay muchos textos clásicos que sólo hemos podido conocer mirando debajo del estrato de sobrescritura medieval para recobrar las palabras antiguas. Quizá el más célebre de éstos sea el palimpsesto de Arquímedes, escrito en Constantinopla en el siglo X y borrado y sobrescrito tres siglos más tarde por un monje para hacer un devocionario. En 1906, un estudioso de los clásicos danés identificó en el texto original una obra de Arquímedes. Desde entonces, se han

utilizado rayos X, reconocimiento óptico de caracteres y otros complejos métodos para descifrar el texto original subyacente. Este meticuloso trabajo nos ha permitido recuperar tres tratados de matemáticas de Arquímedes escritos en griego antiguo, dos de los cuales eran desconocidos hasta entonces y revisten una enorme importancia para la historia de la ciencia. De tan arcana manera recobramos el pasado.

Igual que estos textos antiguos, los organismos son palimpsestos de la historia, de la historia evolutiva. En el cuerpo de los animales y plantas se encuentran las pistas de su ascendencia, los testimonios de su evolución. Y son abundantes. Ahí escondidos hay rasgos especiales, «órganos vestigiales», que sólo tienen sentido como reliquias de caracteres que en otro tiempo habían sido útiles para un antepasado. Otras veces encontramos «atavismos», rasgos de antepasados que aparecen ocasionalmente cuando se despiertan genes ancestrales que llevaban mucho tiempo silenciados. Ahora que podemos leer secuencias de ADN, hemos descubierto que los organismos son también palimpsestos moleculares: en su genoma está inscrita buena parte de su historia evolutiva, incluidas las ruinas de genes que fueron útiles en otro tiempo. Más aún, durante su desarrollo embrionario, muchas especies realizan contorsiones de lo más extrañas: órganos y otros caracteres aparecen para luego cambiar drásticamente o desaparecer del todo antes del nacimiento. Tampoco las especies están tan bien diseñadas: muchas presentan imperfecciones que no son signos de un diseño celestial sino de la evolución.

Stephen Jay Gould decía de estos palimpsestos biológicos que eran «signos absurdos de la historia». Pero no carecen del todo de sentido, pues constituyen poderosos indicios de la evolución.

1. Vestigios

Siendo un estudiante de doctorado en Boston, fui invitado a ayudar a un científico establecido que había escrito un artículo sobre si era más eficiente para los animales de sangre caliente correr sobre dos patas o sobre cuatro. Pensaba enviar el artículo a *Nature*, una de las revistas científicas de más prestigio, y me pidió que lo ayudara a obtener una fotografía llamativa que pudiera servir para la portada de la revista y así llamar la atención sobre su trabajo. Ansioso por salir del laboratorio,

pasé una tarde entera persiguiendo a un caballo y un avestruz por un corral con la esperanza de que en algún momento corrieran lado a lado y pudiera mostrar los dos tipos de carrera en una única foto. No hace falta que diga que los animales se negaron a cooperar, y con las tres especies agotadas, abandonamos la idea. Aunque nunca logramos la foto,¹⁵ la experiencia me enseñó una lección de biología: los avestruces no pueden volar, pero sí que utilizan las alas. Cuando corren, las usan para mantener el equilibrio, extendiéndolas a los lados para no tambalearse. Y cuando un avestruz se pone nervioso, como suele ocurrir cuando se los persigue por un corral, corre hacia el enemigo agitando las alas en una exhibición de amenaza. Es una señal para salir por pies, pues un avestruz enfurecido puede destriparnos fácilmente con una rápida patada. También utilizan las alas durante el cortejo,¹⁶ y las extienden para proteger a sus pollos del duro sol africano.

La lección, sin embargo, va más allá. Las alas del avestruz son un *carácter vestigial*, un carácter de una especie que en sus antepasados fue una adaptación, pero ha perdido su utilidad completamente o, como en el caso del avestruz, se ha aprovechado para nuevos usos. Como todas las aves no voladoras, los avestruces descienden de antepasados que sí volaban. Lo sabemos gracias al registro fósil y al registro de ascendencia inscrito en el ADN de todas las aves no voladoras. Aunque todavía presentes, las alas ya no les sirven para levantar el vuelo para aprovisionarse o para escapar de sus depredadores, o de un estudiante de doctorado un poco pesado. Pero las alas no son inútiles: han evolucionado hasta adquirir nuevas funciones. Ayudan a las aves a mantener el equilibrio, en el cortejo y apareamiento, y para amenazar a sus enemigos.

El avestruz africano no es la única ave no voladora. Además de las *ratites* —las grandes aves no voladoras entre las que se incluye el ñandú de Suramérica, el emú de Australia y el kiwi de Nueva Zelanda—, varias otras docenas de especies de aves han perdido de manera independiente la capacidad de volar. Entre ellas se cuentan las fochas y calamones, los somormujos y zampullines, las ánades y, por descontado, los pingüinos. Quizá la más extraña de todas sea el kakapo de Nueva

¹⁵ El artículo, sin embargo, sí que se publicó. En él se mostraba que pese a sus distintos estilos de carrera, los avestruces y los caballos utilizan una cantidad de energía parecida para cubrir la misma distancia. Fedak, M. A. y H. J. Seeherman, «A reappraisal of the energetics of locomotion shows identical costs in bipeds and quadrupeds including the ostrich and the horse», *Nature*, 282 (1981), pp. 713-716.

¹⁶ Este vídeo muestra el uso de las alas durante el cortejo nupcial: <http://revver.com/video/213669/masai-ostrich-mating/>.

Zelanda, un rechoncho loro no volador que vive sobre todo en el suelo pero que también puede escalar los árboles y descender de ellos suavemente en «paracaídas» hasta el suelo del bosque. Los kakapos se encuentran en peligro crítico de conservación: quedan menos de un centenar libres en la naturaleza. Como no pueden volar, son presa fácil para los depredadores introducidos, como los gatos y las ratas.

Todas las aves no voladoras tienen alas. En algunas, como el kiwi, son tan pequeñas (apenas unos centímetros, y escondidas entre las plumas) que no parecen cumplir ninguna función. No son más que reliquias. En otras, como hemos visto en el caso de los avestruces, las alas han adquirido nuevos usos. En los pingüinos, las alas ancestrales han evolucionado a una suerte de aletas que les permiten nadar bajo el agua con una sorprendente velocidad. En cualquier caso, las alas vestigiales siempre tienen exactamente los mismos huesos que en las especies voladoras. La razón es que las aves no voladoras no son el resultado de un diseño deliberado (¿por qué habría de usar un creador exactamente los mismos huesos en unas alas para volar y otras que no sirven para volar, incluidas las nadadoras de los pingüinos?), sino de la evolución a partir de unos ancestros voladores.

Los oponentes a la evolución siempre plantean el mismo argumento cuando se citan los caracteres vestigiales como prueba de la evolución. «Estos caracteres no son *inútiles*», nos dicen. «O sirven para algo, o todavía no hemos descubierto para qué sirven.» Dicho de otro modo, dicen que un carácter no puede considerarse vestigial si todavía tiene una función o se le espera encontrar una.

Pero esta réplica es irrelevante. La teoría evolutiva no dice que los caracteres vestigiales carezcan de función. Un carácter puede ser vestigial y funcional al mismo tiempo. No es vestigial porque carezca de función, sino porque ya *no realiza aquella función para la cual evolucionó*. Las alas de un avestruz son útiles, pero eso no significa que no nos digan nada sobre la evolución. ¿No sería extraño que un creador ayudara a los avestruces a mantener el equilibrio dotándolos de unos apéndices que resultan tener el aspecto preciso de unas alas reducidas y que están contruidos exactamente del mismo modo que las alas que sirven para volar?

En realidad, cabe esperar que los caracteres ancestrales evolucionen hacia nuevos usos; eso es precisamente lo que ocurre cuando la evolución fabrica nuevos

caracteres a partir de otros anteriores. El propio Darwin observó que «un órgano que por el cambio de costumbres se ha vuelto inútil o perjudicial para un objeto, puede modificarse y ser utilizado para otro».

Pero aun cuando hayamos establecido que un carácter es vestigial, las preguntas no se agotan. ¿En qué antepasados fue funcional? ¿Para qué servía? ¿Por qué perdió su función? ¿Por qué sigue ahí en vez de haber desaparecido completamente? Y ¿qué nuevas funciones ha adquirido durante su evolución, si ha adquirido alguna?

Fijémonos en las alas otra vez. Como es obvio, tenerlas supone muchas ventajas, que compartieron los antepasados voladores de las aves no voladoras. Entonces, ¿por qué perdieron algunas aves la capacidad de volar? No estamos del todo seguros, pero tenemos algunas buenas pistas. La mayoría de las aves que en su evolución perdieron la capacidad de volar lo hicieron en islas; es el caso del extinto dodo de Mauricio, de la polluela hawaiana, del kakapo y el kiwi de Nueva Zelanda, y de muchas aves no voladoras que reciben el nombre de la isla donde habitan (la gallereta de Samoa, la gallereta de la isla Gough, la cerceta de las islas Auckland, y otras). Como veremos en el próximo capítulo, una de las características notables de las islas remotas es su falta de mamíferos y reptiles, las especies que depredan a las aves. Pero ¿qué decir de las ratites, que habitan en los continentes, como los avestruces? Todas éstas evolucionaron en el hemisferio sur, donde hay muchos menos mamíferos depredadores que en el norte.

En definidas cuentas, el vuelo es metabólicamente costoso, y usa una gran cantidad de energía que podría dedicarse a la reproducción. Si uno vuela sobre todo para escapar de los depredadores pero éstos a menudo faltan en las islas, o si se puede obtener suficiente alimento en el suelo, como suele ocurrir en las islas (donde a menudo faltan los árboles), ¿para qué tener unas alas plenamente funcionales? En tal situación, las aves con alas reducidas gozarían de una ventaja reproductiva, y la selección natural favorecería la pérdida de la capacidad de volar. Además, las alas son apéndices grandes que pueden dañarse con facilidad. Si son innecesarios, pueden evitarse heridas reduciéndolos. En ambas situaciones, la selección favorecería de manera directa las mutaciones que condujeran a unas alas cada vez más pequeñas, lo que tendría como consecuencia la pérdida de la capacidad de vuelo.

Entonces, ¿por qué no han desaparecido completamente? En algunos casos, casi lo han hecho: las alas del kiwi no son más que unas pequeñas protuberancias sin función alguna. Pero cuando las alas han adoptado nuevos usos, como en el caso de los avestruces, la selección natural las ha mantenido, aunque en una forma que no permite el vuelo. En otras especies, las alas pueden estar camino de desaparecer, y simplemente las vemos porque están en medio de ese proceso.

También son comunes los ojos vestigiales. Muchos animales, y sobre todo los subterráneos y los cavernícolas, viven en la oscuridad más absoluta, pero sabemos por los árboles evolutivos que hemos construido que descienden de especies que vivían en el exterior y tenían ojos funcionales. Al igual que las alas, los ojos son una carga cuando no se necesitan. Hace falta energía para hacerlos, y pueden dañarse con facilidad. Así que cualquier mutación que favorezca su pérdida será claramente ventajosa cuando el entorno sea demasiado oscuro para no ver nada. Alternativamente, las mutaciones que reducen la visión pueden ir acumulándose con el tiempo si no ayudan ni perjudican al animal.

Justamente este tipo de pérdida de los ojos durante la evolución se produjo en los antepasados de la rata topo ciega del Mediterráneo oriental. Este roedor alargado, cilíndrico y de patas robustas parece una salchicha cubierta de pelo con una boca minúscula. Este animal pasa toda su vida bajo el suelo. Sin embargo, retiene todavía un vestigio de ojos, un órgano minúsculo de apenas un milímetro de sección totalmente escondido bajo una capa protectora de piel. Este ojo vestigial no puede formar imágenes. Los análisis moleculares indican que las ratas topo ciegas evolucionaron, hace unos 25 millones de años, a partir de unos roedores con ojos funcionales, y sus marchitos ojos son testimonio de su ascendencia. Pero ¿por qué han retenido aunque sólo sea un vestigio de los ojos? Estudios recientes muestran que contiene un fotopigmento sensible a niveles bajos de luz, y que ayuda a regular el ritmo diario de actividad del animal. Esta función residual que hace posible la pequeña cantidad de luz que penetra bajo el suelo, podría explicar la persistencia de los ojos vestigiales.

Los topos verdaderos, que no son roedores sino insectívoros, han perdido los ojos de manera independiente, reteniendo únicamente un órgano vestigial cubierto por la piel que puede verse si se despeja el pelo de la cabeza. De modo parecido, en

algunas serpientes subterráneas los ojos quedan completamente escondidos bajo las escamas. Muchos animales cavernícolas también tienen ojos reducidos o faltantes. La lista incluye peces (como el pez ciego de las cuevas, que puede comprarse en las tiendas de mascotas), arañas, salamandras, camarones y escarabajos. Hay incluso un cangrejo de río cavernícola que todavía tiene los pedúnculos ¡pero sin ojos en sus extremos!

Las ballenas son todo un archivo de órganos vestigiales. Muchas especies actuales tienen vestigios de la pelvis y de los huesos de las extremidades posteriores, testimonios, como hemos visto en el capítulo anterior, de su descendencia desde un antepasado terrestre de cuatro patas. Si se mira un esqueleto completo de ballena expuesto en un museo, se podrá ver unos diminutos huesos de la pelvis y las extremidades posteriores que cuelgan del resto del esqueleto, suspendidos por medio de hilos. La razón es que en las ballenas actuales no están conectados al resto de los huesos, aguantándose sólo por el tejido que los rodea. En otro tiempo habían formado parte del esqueleto, pero cuando dejaron de necesitarse se redujeron en tamaño y se fueron desconectando del esqueleto. La lista de órganos vestigiales de los animales podría llenar un largo catálogo. El propio Darwin, que de joven había sido un ávido coleccionista de coleópteros, apuntaba que algunos escarabajos no voladores todavía conservaban vestigios de las alas debajo de las cubiertas de las alas (los élitros), que estaban fusionadas.

Los humanos poseemos muchos caracteres vestigiales que demuestran que hemos evolucionado. El más célebre es el apéndice. Conocido en la terminología médica como apéndice vermiforme («en forma de gusano»), es un fino cilindro de tejido, del grosor de un lápiz, que constituye el extremo final del ciego, la sección de intestino situada en la unión entre el delgado y el grueso. Como muchos caracteres vestigiales, su tamaño y grado de desarrollo son muy variables: en los humanos, su longitud varía entre poco más de dos y poco más de treinta centímetros. Unas pocas personas nacen sin apéndice.

En los animales herbívoros como los koalas, los conejos y los canguros, el ciego y su apéndice son mucho más grandes que en nuestro intestino. Lo mismo puede decirse de los primates que se alimentan de hojas como los lémures, los loris y los monos araña. En éstos, la bolsa agrandada del ciego y el apéndice funciona como

un vaso de fermentación (como los «otros estómagos» de las vacas), y contiene bacterias que ayudan al animal a descomponer la celulosa en azúcares que pueda asimilar. En los primates cuya dieta incluye menos hojas, como los orangutanes y los macacos, el ciego y el apéndice están reducidos. En los humanos, que no comemos hojas y no podemos digerir la celulosa, el apéndice prácticamente ha desaparecido. Obviamente, cuanto menos herbívoro es el animal, más pequeños son el ciego y el apéndice. Dicho de otro modo, nuestro apéndice es simplemente una reliquia de un órgano de enorme importancia para nuestros antepasados herbívoros, pero que ya carece de valor para nosotros.

¿Nos sirve de algo el apéndice? Si es así, no es evidente. Su extirpación no tiene efectos secundarios ni un aumento de la mortalidad (de hecho, parece *reducir* la incidencia de colitis). Al discutir el apéndice en su famoso libro de texto *The Vertebrate Body*, el paleontólogo Alfred Romer comenta secamente: «Su mayor importancia parece residir en el apoyo financiero de la profesión médica». Pero, en justicia, podría tener alguna utilidad. El apéndice contiene retazos de tejido que podrían funcionar como parte del sistema inmunitario. Se ha sugerido también que sirve de refugio para las bacterias beneficiosas del intestino cuando una infección las elimina del resto del sistema digestivo.

Pero estos pequeños beneficios sin duda quedan más que contrarrestados por los graves problemas que acompañan al apéndice en los humanos. Su estrechez hace que se obstruya con facilidad, lo que puede conducir a su infección e inflamación, que se conoce como apendicitis. Si no se trata, un apéndice perforado puede producir la muerte. La probabilidad de contraer una apendicitis en algún momento de la vida es de uno entre quince. Por suerte, gracias a la práctica evolutivamente reciente de la cirugía, la probabilidad de morir por haber contraído una apendicitis es de sólo el 1 por 100. Pero antes de que los doctores comenzaran a extirpar los apéndices inflamados a finales del siglo XIX, la mortalidad podía superar el 20 por 100. En otras palabras, antes de la cirugía del apéndice, más de una persona de cada cien moría de apendicitis. Eso es una selección natural bastante fuerte.

Durante casi todo el dilatado período de la evolución humana, es decir durante más del 99 por 100 de ese tiempo, no había cirujanos, así que vivíamos con una bomba de relojería en nuestro intestino. Cuando se comparan las pequeñas ventajas del

apéndice con sus enormes desventajas, queda claro que en conjunto no vale la pena conservarlo. Bueno o malo, el apéndice es un órgano vestigial, pues ya no realiza la función para la que había evolucionado.

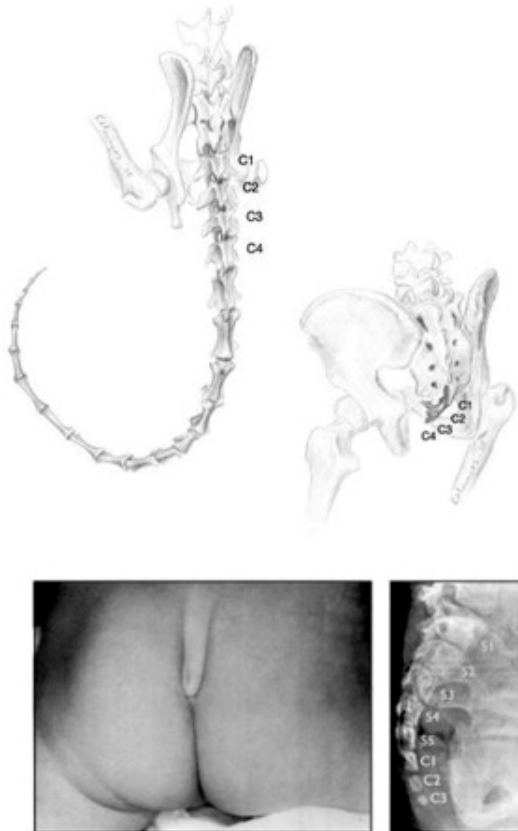


Figura 14. *Colas vestigiales y atávicas.*

Arriba, a la izquierda: en nuestros parientes con cola, como el lémur de collar (Varecia variegata), las vértebras de la cola (caudales) no están soldadas (las cuatro primeras se designan C1 a C4). En cambio, en la «cola» humana, el cóccix (arriba, a la derecha), las vértebras caudales están soldadas formando una estructura vestigial. Abajo: cola atávica en un bebé israelí de tres meses. La radiografía de la cola (derecha) muestra que las tres vértebras caudales son mucho mayores y están más desarrolladas que las normales, no están soldadas y se aproximan al tamaño de las vértebras sacras (S1 a S5). La cola fue más tarde extirpada quirúrgicamente.

Ilustraciones de Kalliopi Monoyios, fotografías de la cola, de Bar-Maor et al. (1980), utilizadas con permiso de *Journal of Bone and Joint Surgery*.

Entonces, ¿por qué lo tenemos? Todavía no conocemos la respuesta. Quizá estuviera camino de desaparecer, pero la cirugía casi ha eliminado la selección natural contra las personas que tienen apéndice. Otra posibilidad es que la selección simplemente no puede hacerlo más pequeño sin hacerlo *más* perjudicial: un apéndice de menor tamaño podría correr un riesgo todavía mayor de quedar

obstruido. Ése podría ser el tronco que bloquea su camino evolutivo hacia la desaparición.

Nuestro cuerpo contiene muchos otros restos de nuestra ascendencia primate. Tenemos una cola vestigial, el cóccix, el extremo triangular de nuestra columna vertebral, formado por varias vértebras fusionadas, que cuelga de la pelvis. Es todo lo que queda de la larga y útil cola de nuestros antepasados (Figura 14). Todavía tiene una función (algunos músculos útiles están anclados en él), pero conviene recordar que su naturaleza de vestigio no se diagnostica por su utilidad sino porque ha dejado de tener la función para la que originalmente había evolucionado. Es revelador el hecho de que algunas personas tienen un rudimentario músculo de la cola (el extensor coccígeo), idéntico al que mueve la cola de los monos y otros mamíferos. Todavía está anclado en el cóccix, pero como los huesos no pueden moverse, el músculo es inútil. Cualquiera puede tenerlo sin saberlo.

Otros músculos vestigiales se hacen notar en invierno, o cuando nos horripila una película de terror: son los músculos erectores o *arrector pili*, los diminutos músculos que se fijan a la base de cada pelo del cuerpo. Cuando se contraen, se erizan los pelos y se nos pone la «piel de gallina», así llamada por su parecido con la piel de una gallina desplumada. La piel de gallina y los músculos que la provocan no realizan ninguna función útil, al menos en los humanos. En otros mamíferos, sin embargo, levantan el pelo para proteger del frío o para que el animal parezca mayor de lo que es cuando amenaza o es amenazado. Piénsese sino en los gatos, que arquean el cuerpo y levantan el pelo cuando hace frío o están furiosos. Nuestra piel de gallina vestigial está ocasionada por los mismos estímulos, es decir el frío o un subidón de adrenalina.

Hete aquí un último ejemplo: las personas que pueden mover las orejas también son prueba de la evolución. Tenemos tres músculos bajo el cuero cabelludo que se fijan a las orejas. En la mayoría de las personas no sirven para nada, pero algunas pueden usarlos para menear los pabellones auditivos. (Yo soy uno de los afortunados, y cada año realizo una demostración de esta habilidad en mi clase de evolución, ante la mirada divertida de mis alumnos.) Éstos son los mismos músculos que otros animales, como los gatos y los caballos, usan para mover las orejas y localizar los sonidos. En estas especies, mover las orejas los ayuda a

detectar a sus depredadores, localizar a sus crías y otras cosas. Pero en los humanos estos músculos sólo sirven para el entretenimiento.¹⁷

Parafraseando la cita del genetista Theodosius Dobzhansky que abre este capítulo, los caracteres vestigiales sólo cobran sentido a la luz de la evolución. Aunque a veces sean útiles y con frecuencia no lo sean, son exactamente lo que esperaríamos encontrar si la selección natural eliminase de manera paulatina los caracteres inútiles o los remodelara para crear otros nuevos y con valor adaptativo. Unas alas diminutas y no funcionales, un apéndice peligroso, unos ojos que no pueden ver y unos estúpidos músculos de las orejas sencillamente carecen de sentido cuando uno piensa que las especies son el resultado de un acto especial de creación.

2. Atavismos

De manera ocasional aparecen individuos con una anomalía que parece el resurgimiento de un carácter ancestral. Puede tratarse de un caballo con dedos extranumerarios, o de un bebé humano con una cola. Estas reliquias de caracteres ancestrales que se expresan de manera esporádica reciben el nombre de *atavismos*, del latín *atavus*, «antepasado»; difieren de los caracteres vestigiales en que sólo aparecen de manera ocasional, y no en todos y cada uno de los individuos.

Los atavismos verdaderos deben recapitular un carácter ancestral, y de forma bastante fiel. No son simplemente monstruosidades. Un humano que nazca con una pierna de más, por ejemplo, no es un atavismo porque ninguno de nuestros antepasados tuvo cinco extremidades. Los atavismos genuinos más famosos son sin duda las patas de las ballenas. Ya hemos visto que algunas especies de ballena retienen una pelvis vestigial, y los huesos de las extremidades posteriores, pero una de cada quinientas nace con una pata posterior que sobresale de la pared del cuerpo. Estas extremidades presentan todos los grados de refinamiento, y algunas de ellas contienen claramente los principales huesos de las patas de los mamíferos terrestres, es decir, el fémur, la tibia y el peroné. ¡Algunas incluso tienen pies con todos sus dedos!

¿Por qué se producen atavismos como éste? Nuestra mejor hipótesis es que surgen de la expresión de genes que habían sido funcionales en los antepasados pero que

¹⁷ Las ballenas, que no tienen orejas externas, también tienen unos músculos de las orejas no funcionales (y a veces unos orificios auditivos diminutos e inútiles) que han heredado de sus antepasados terrestres.

la selección natural había silenciado cuando dejaron de ser necesarios. Estos genes dormidos pueden despertarse en algunas ocasiones cuando algo falla en el desarrollo. Las ballenas tienen todavía la información genética necesaria para desarrollar unas patas; no unas patas perfectas, pues esa información se ha ido degradando durante los millones de años que ha residido en el genoma sin utilizarse, pero patas al fin y al cabo. Y esa información está ahí porque las ballenas descienden de antepasados con cuatro patas. Al igual que la ubicua pelvis de las ballenas, las raras patas de las ballenas son una prueba de la evolución.

Los caballos actuales, que descienden de antepasados de menor tamaño y con cuatro dedos, presentan atavismos similares. El registro fósil documenta la pérdida gradual de los dedos a lo largo del tiempo, de manera que en los caballos actuales sólo queda el central, que forma la pezuña. Lo interesante es que los embriones de caballo comienzan su desarrollo con tres dedos que crecen al mismo ritmo. Más tarde, sin embargo, el dedo central comienza a crecer más rápido que los otros dos, que en el alumbramiento quedan como simples «sobrehuesos» a cada lado de las patas del caballo. (Los sobrehuesos son auténticos caracteres vestigiales. Cuando se inflaman, se dice del caballo que «tiene sobrecañas».) En raras ocasiones, sin embargo, estos dedos continúan su desarrollo hasta convertirse en dedos extranumerarios, cada uno con su propia pezuña. A menudo estos dedos atávicos no tocan el suelo salvo cuando el caballo corre. Precisamente así era el caballo fósil *Merychippus*, de hace 15 millones de años. Los caballos con dedos extranumerarios se consideraban en otro tiempo un prodigio sobrenatural, y se cuenta que tanto Julio César como Alejandro Magno los habían montado. Y en cierto modo sí que son prodigios, pero prodigios de la evolución, pues muestran con toda claridad el parentesco genético entre los caballos actuales y los fósiles.

El atavismo más sorprendente de nuestra propia especie es la llamada «proyección coccígea», más conocida como cola humana. Como veremos enseguida, durante las primeras fases de su desarrollo el embrión humano presenta un cola parecida a la de los peces, y de tamaño considerable, que comienza a desaparecer hacia las siete semanas de gestación (sus huesos y tejidos son simplemente reabsorbidos por el cuerpo). En raros casos, la regresión no es completa, y el bebé nace con una cola que sale de la base de la columna vertebral (Figura 14). Las colas varían

enormemente: algunas son «blandas», sin huesos, mientras que otras contienen vértebras, las mismas que normalmente están soldadas en nuestro cóccix. Algunas colas tienen unos dos centímetros de largo; otras, hasta un tercio de metro. Y no son simples repliegues de la piel, sino que tienen pelo, músculos, vasos sanguíneos y nervios. ¡Algunas incluso pueden menearse! Por fortuna, estas extrañas extensiones pueden extirparse quirúrgicamente con facilidad.

¿Qué puede significar esto si no es que todavía llevamos con nosotros un programa de desarrollo para hacer una cola? De hecho, investigaciones genéticas recientes han demostrado que llevamos exactamente los mismos genes responsables de la formación de la cola en animales como los ratones, pero estos genes normalmente están desactivados en los fetos humanos. Las colas son verdaderos atavismos.

Algunos atavismos pueden producirse en el laboratorio. El más increíble de éstos es ese parangón de la rareza: los dientes de gallina. En 1980, E. J. Kollar y C. Fisher, de la Universidad de Connecticut, combinaron los tejidos de dos especies injertando el tejido que recubre la boca de un embrión de pollo encima del tejido embrionario de la mandíbula de un ratón. Sorprendentemente, el tejido de pollo produjo unas estructuras parecidas a dientes, algunas lo bastante parecidas como para tener raíces y coronas. Como el tejido subyacente del ratón no podía haber producido los dientes por sí solo, Kollar y Fisher concluyeron que algunas moléculas del ratón debían haber despertado un programa de desarrollo de dientes que estaba silenciado en los pollos. Esto quiere decir que los pollos tenían todos los genes necesarios para producir dientes, pero les faltaba la chispa que el tejido del ratón había proporcionado. Veinte años más tarde, los científicos han desentrañado la biología molecular implicada, validando así la sugerencia de Kollar y Fisher: las aves poseen las vías genéticas para producir los dientes, pero no los producen porque carecen de una sola proteína esencial. Cuando se proporciona esa proteína, se forman en el pico unas estructuras con forma de dientes. Como se recordará, las aves evolucionaron a partir de los reptiles. Esos dientes los perdieron hace más de 60 millones de años, pero hoy sabemos que llevan todavía algunos de los genes para producirlos, unos genes que son un recuerdo de su ascendencia reptiliana.

3. Genes muertos

Los atavismos y los caracteres vestigiales nos enseñan que cuando un carácter deja de utilizarse o se reduce, los genes correspondientes no desaparecen al instante del genoma: la evolución evita su acción inactivándolos, no expulsándolos del ADN. A partir de aquí podemos hacer una predicción: deberíamos encontrar, en los genomas de muchas especies, genes silenciados o «muertos», genes que en otro tiempo habían sido útiles pero que ya no están intactos y no se expresan. En otras palabras, deberíamos encontrar genes vestigiales. En contraste con esto, la idea de que todas las especies fueron creadas a partir de la nada predice que este tipo de genes no debería existir, pues no habría antepasados comunes en los que esos genes estuvieran activos.

Hace treinta años no podíamos poner a prueba esta predicción porque no teníamos manera de leer el código del ADN. En la actualidad, sin embargo, es bastante fácil secuenciar el genoma completo de una especie, y ya se ha hecho con varias, incluida la especie humana. Disponemos así de un instrumento único para estudiar la evolución si tenemos en cuenta que la función normal de un gen es fabricar una proteína, cuya secuencia de aminoácidos viene determinada por la secuencia de bases nucleótidas que constituyen el ADN. Y una vez que tenemos la secuencia de ADN de un gen determinado podemos, por lo general, saber si se expresa de forma normal (es decir, si hace una proteína funcional) o si en cambio está silenciado y no hace nada. Podemos ver, por ejemplo, si alguna mutación ha cambiado el gen de manera que ya no sirva para hacer una proteína útil, o si las regiones de «control» responsables de activar un gen han quedado ellas mismas inactivadas. Un gen que no funciona se denomina *pseudogen*.

La predicción evolutiva de que encontraremos pseudogenes se ha cumplido ampliamente. Todas las especies albergan genes muertos, muchos de ellos todavía activos en las especies emparentadas. Esto implica que los genes también estaban activos en un antepasado común, y quedaron anulados en algunos de sus descendientes pero no en otros.¹⁸ Por ejemplo, de los aproximadamente treinta mil genes de los humanos, más de dos mil son pseudogenes. Nuestro genoma, y el de otras especies, son unos cementerios bien poblados de genes muertos.

¹⁸ Los pseudogenes, hasta donde yo sé, no pueden resucitarse. Una vez que un gen experimenta una mutación que lo inactiva, rápidamente acumula otras que van degradando cada vez más la información para hacer la proteína. La probabilidad de que todas esas mutaciones reviertan y despierten el gen es, en la práctica, nula.

El pseudogen humano más famoso es el *GLO*, así llamado porque en otras especies produce una enzima llamada L-gulono- γ -lactona oxidasa. Esta enzima se utiliza en la síntesis de la vitamina C (ácido ascórbico) a partir del azúcar simple glucosa. La vitamina C es esencial para el metabolismo, y prácticamente todos los mamíferos disponen de vías metabólicas para fabricarlo; todos, con la excepción de los primates, los murciélagos frugívoros y los cobayas. Estas especies obtienen la vitamina C directamente de los alimentos, y sus dietas habituales contienen la suficiente. Si no ingerimos la vitamina C necesaria, enfermamos: el escorbuto era corriente entre los marineros del siglo XIX, privados de fruta en sus viajes. La razón de que los primates y otros pocos mamíferos no sintetizan su propia vitamina C es que no necesitan hacerlo. Pero la secuenciación de ADN nos dice que los primates todavía llevan la mayor parte de la información genética necesaria para hacer la vitamina.

Resulta que la vía de síntesis de la vitamina C a partir de la glucosa consiste en una secuencia de cuatro pasos, cada uno de ellos promovido por el producto de un gen distinto. Los primates y los cobayas todavía poseen los genes para los tres primeros pasos, pero el último, que requiere la enzima *GLO*, no lo pueden producir porque el *GLO* ha quedado inactivado por una mutación. Se ha convertido en un pseudogen, llamado ψ *GLO* (ψ es la letra griega psi, que simboliza «pseudo»). ψ *GLO* no funciona porque le falta un nucleótido de la secuencia de ADN del gen. Y es exactamente el *mismo* nucleótido que falta en otros primates. Esto nos dice que la mutación que destruyó nuestra capacidad para sintetizar la vitamina C estaba presente en el antepasado de todos los primates, y pasó a todos sus descendientes. La inactivación de *GLO* en los cobayas se produjo de manera independiente, pues implica otras mutaciones. Es muy probable que como los murciélagos frugívoros, los cobayas y los primates reciben más que suficiente vitamina C con su dieta, la inactivación de su vía de síntesis no fuera una desventaja. Incluso podría haber sido beneficiosa porque eliminaba una proteína de fabricación costosa.

Un gen muerto en una especie pero activo en especies emparentadas constituye evidencia de la evolución, pero hay más. Cuando se analiza el ψ *GLO* en los primates actuales, se descubre que su secuencia es más similar en las especies más emparentadas que en las más distantes. Las secuencias de ψ *GLO* de los humanos y

de los chimpancés, por poner un caso, se asemejan mucho entre sí pero difieren más del ψGLO de los orangutanes, que son parientes más distantes. Más aún, la secuencia de ψGLO de los cobayas es muy distinta de la de todos los primates.

Sólo la evolución y la descendencia desde un antepasado común pueden explicar estos hechos. Todos los mamíferos han heredado una copia funcional del gen *GLO*. Hace unos 40 millones de años, en el antepasado común de todos los primates, un gen que había dejado de ser necesario quedó inactivo a causa de una mutación. Todos los primates heredaron la misma mutación. Después de que *GLO* quedase silenciado, se produjeron otras mutaciones en el gen, que ya no se expresaba. Estas mutaciones se fueron acumulando con el tiempo, pues son inocuas en los genes muertos, y se fueron transmitiendo a todas las especies descendientes. Como los parientes cercanos comparten un antepasado común más reciente, los genes que cambian al ritmo del tiempo siguen la pauta de la ascendencia común, lo que significa secuencias de ADN más parecidas en los parientes cercanos que en los distantes. Esto ocurre tanto en los genes activos como en los muertos. La secuencia de ψGLO de los cobayas es tan diferente porque se inactivo de manera independiente, en un linaje que ya había divergido del de los primates. Y ψGLO no es el único gen que manifiesta estas pautas: hay muchos otros pseudogenes.

Si uno cree que los primates y los cobayas son el fruto de un acto de creación especial, estas observaciones carecen de sentido. ¿Por qué habría de poner el creador en todas estas especies las vías para la síntesis de la vitamina C sólo para inactivarla después? ¿No sería más fácil simplemente omitir la vía entera desde un buen principio? ¿Por qué habrían de tener todos los primates la misma mutación de inactivación, y otra distinta los cobayas? ¿Por qué las secuencias de los genes muertos reflejan de manera precisa las relaciones de parentesco predichas a partir de la filogenia conocida de estas especies? ¿Y por qué, además, habrían de tener los humanos miles de pseudogenes?

También albergamos genes muertos que provienen de otras especies: de virus. Algunos, los llamados «retrovirus endógenos», pueden realizar copias de su genoma e insertarse a sí mismos en el ADN de la especie que hayan infectado. (El HIV es un retrovirus.) Si los virus infectan las células que fabrican los espermatozoides y los óvulos, pueden transmitirse a las generaciones futuras. El genoma humano contiene

miles de virus como éstos, casi todos ellos inactivos a causa de mutaciones. Son remanentes de antiguas infecciones. Pero lo más revelador es que algunos de estos restos se encuentran exactamente en el mismo lugar en los cromosomas de los humanos y de los chimpancés. Sin duda se trata de virus que infectaron a algún antepasado común y se han transmitido a todos sus descendientes. Como la probabilidad de que dos virus se inserten de manera independiente en el mismo lugar exacto en dos especies distintas es ínfima, que los encontremos ahí es una prueba fuerte de la descendencia a partir de antepasados comunes.

Otro caso interesante que implica a los genes muertos tiene que ver con nuestro sentido del olfato, o más bien nuestro pobre sentido del olfato, pues desde luego los humanos olfateamos muy mal en comparación con el resto de mamíferos. Aun así, podemos distinguir más de diez mil olores distintos. ¿Cómo logramos tal proeza? Hasta hace poco, la respuesta era un absoluto misterio. Pero la hemos encontrado en el ADN, o más en concreto, en nuestros numerosos genes de receptores olfativos (RO).

La historia de los RO fue desentrañada por Linda Buck y Richard Axel, quienes por este logro recibieron el premio Nobel en 2004. Veamos cómo son los RO en un súper olfato, el del ratón.

Los ratones dependen en grado sumo de su sentido del olfato, no sólo para encontrar comida y evitar a los depredadores, sino también para detectar las feromonas emitidas por sus congéneres. El mundo sensorial de un ratón es extraordinariamente distinto del nuestro, en el que utilizamos mucho más la vista que el olfato. Los ratones tienen aproximadamente un millar de genes olfativos funcionales. Todos ellos descienden de un único gen ancestral que surgió hace millones de años y se duplicó muchas veces, de manera que cada gen difiere ligeramente de los otros. Y cada uno produce una proteína distinta, un «receptor olfativo», que reconoce una molécula distinta llevada por el aire. Cada proteína RO se expresa en un tipo distinto de célula receptora en los tejidos que recubren las mucosas olfativas de la nariz. Cada olor consiste en una combinación distinta de moléculas, y cada combinación estimula un grupo distinto de células. Éstas envían señales al cerebro, que integra y descodifica las diferentes señales. Así es como el ratón puede distinguir el olor de los gatos del aroma del queso. Al integrar

combinaciones de señales, el ratón (y otros mamíferos) puede reconocer un número de olores mucho mayor que el número de genes RO que posee.

La capacidad de reconocer distintos olores es útil, pues permite distinguir a los individuos emparentados de los que no lo están, encontrar pareja, localizar el alimento, reconocer a los depredadores y saber quién ha estado invadiendo el territorio propio. Las ventajas para la supervivencia son enormes. ¿Cómo las ha aprovechado la selección natural? En primer lugar, un gen ancestral se duplica varias veces. Este tipo de duplicaciones se produce con cierta frecuencia como un accidente durante la división celular. De manera paulatina, las copias duplicadas van divergiendo entre sí, de modo que cada una reconoce a una molécula volátil distinta. Para cada uno del millar de genes RO evolucionó un tipo de célula distinta. Al mismo tiempo, en el cerebro fueron formándose conexiones nuevas que permitían combinar las señales de los distintos tipos de célula para crear las sensaciones de los distintos olores. Ésta es una auténtica hazaña de la evolución impulsada por el enorme valor que tiene un buen olfato para la supervivencia.

Nuestro sentido del olfato queda muy lejos del de los ratones. Una de las razones de ello es que expresamos muchos menos genes RO, tan sólo unos cuatrocientos. Pero todavía llevamos con nosotros un total de ochocientos genes olfativos, que en conjunto corresponden a un 3 por 100 de nuestro genoma. Pero la mitad de estos genes son pseudogenes permanentemente inactivados por mutaciones. Lo mismo puede decirse de la mayoría de los primates. ¿Cómo ocurrió esto? Probablemente lo que pasó es que los primates, que son activos sobre todo durante el día, utilizan más la vista que el olfato, y por consiguiente, no necesitan discriminar tantos olores. Los genes innecesarios acaban corrompidos por mutaciones. De manera previsible, los primates con visión del color, y por tanto con mayor discriminación de su entorno, tienen más genes RO muertos.

Cuando se examinan las secuencias de los genes RO humanos, tanto los activos como los inactivos, se ve que son más similares a los de otros primates, menos parecidos a los de mamíferos más «primitivos» como el ornitorrinco, y aún menos parecidos a los genes RO de nuestros parientes lejanos como los reptiles. ¿Por qué habrían de mantenerse estas relaciones de parecido si no es por la evolución? Y el hecho de que alberguemos tantos genes inactivos es un indicio más de la evolución:

arrastramos esta carga genética porque la necesitaban nuestros antepasados lejanos, que para sobrevivir dependían de un fino sentido del olfato.

Pero el ejemplo más sorprendente de la evolución —o «desevolución»— de genes RO se encuentra en el delfín. Los delfines no necesitan detectar olores volátiles en el aire porque viven en el agua y poseen un conjunto distinto de genes para detectar sustancias químicas disueltas en el agua. Como cabía esperar, en los delfines los genes RO están inactivos. De hecho, el *80 por 100 de ellos* no son funcionales. Cientos de ellos todavía se encuentran silenciados en el genoma del delfín, como mudo testimonio de la evolución. Y si se analizan las secuencias de ADN de estos genes muertos de los delfines, se descubre que se parecen a los de los mamíferos terrestres. Tiene sentido que sea así cuando se tiene en cuenta que los delfines evolucionaron a partir de mamíferos terrestres cuyos genes RO perdieron la utilidad al pasar a habitar en el agua.¹⁹ Carecería de sentido, en cambio, si los delfines hubieran sido creados por un acto especial.

Los genes vestigiales van de la mano de las estructuras vestigiales. Los mamíferos hemos evolucionado a partir de antepasados reptilianos que ponían huevos. A excepción de los «monotremas», el orden de mamíferos al que pertenecen el equidna australiano y el ornitorrinco (que significa pico de ave), los mamíferos abandonaron hace mucho la práctica de poner huevos a favor de alimentar a sus crías directamente a través de la placenta en lugar de proveerles unas reservas alimenticias en la yema. Los mamíferos poseen tres genes que, en los reptiles y las aves, producen la proteína vitelogenina, que llena el saco vitelino o yema, pero prácticamente todos tienen estos genes muertos, totalmente inactivos a causa de mutaciones. Sólo los monotremas, que ponen huevos, producen todavía vitelogenina, pues de los tres genes tienen uno funcional. Además, los mamíferos, incluidos los humanos, todavía producen un saco vitelino, aunque vestigial y sin yema, un gran globo lleno de fluido unido al intestino fetal (Figura 15) que en los humanos se separa del embrión en el segundo mes de embarazo.

Con su pico de ave, su gruesa cola, sus espolones venenosos en las patas traseras de los machos y con hembras que ponen huevos, los ornitorrincos de Australia son

¹⁹ Como era de esperar, los mamíferos marinos que pasan parte del tiempo en tierra firme, como los leones marinos, tienen más genes RO activos que las ballenas y los delfines, supuestamente porque todavía necesitan detectar olores en el aire

raros con avaricia. Si hay alguna especie que parece estar diseñada de manera *nada* inteligente, o quizá para goce y disfrute del creador, es ésta. Y su catálogo de rarezas no acaba aquí: el ornitorrinco no tiene estómago.



Figura 15. Sacos vitelinos normales y vestigiales. Arriba: saco vitelino lleno en un embrión de pez cebra (Danio rerio), extraído del huevo a los dos días, justo antes de la eclosión. Abajo: saco vitelino vestigial y vacío de un embrión humano de unas cuatro semanas. El embrión humano de la derecha muestra los arcos branquiales, la yema de las piernas y, debajo de ésta, la «cola». Fotografía de pez cebra por cortesía de la Dra. Victoria Prince; fotografía de embrión humano por cortesía del National Museum of Health and Medicine.

A diferencia de casi todos los vertebrados, que poseen un estómago en forma de bolsa donde las enzimas digestivas descomponen los alimentos, el «estómago» del ornitorrinco ha quedado reducido a un leve abultamiento del esófago allí donde se une al intestino. Este estómago carece de las glándulas que en otros vertebrados producen las enzimas digestivas. No sabemos a ciencia cierta por qué la evolución se ha deshecho del estómago, aunque quizá sea porque la dieta del ornitorrinco,

formada por insectos blandos, no requiere demasiado procesamiento. Sabemos, sin embargo, que el ornitorrinco procede de antecesores con estómago. Y una de las razones para pensarlo es que su genoma contiene dos pseudogenes que codifican enzimas relacionadas con la digestión. Innecesarios, han quedado inactivos a causa de mutaciones, pero quedan como testimonio de la evolución de este extraño animal.

4 Palimpsestos en embriones

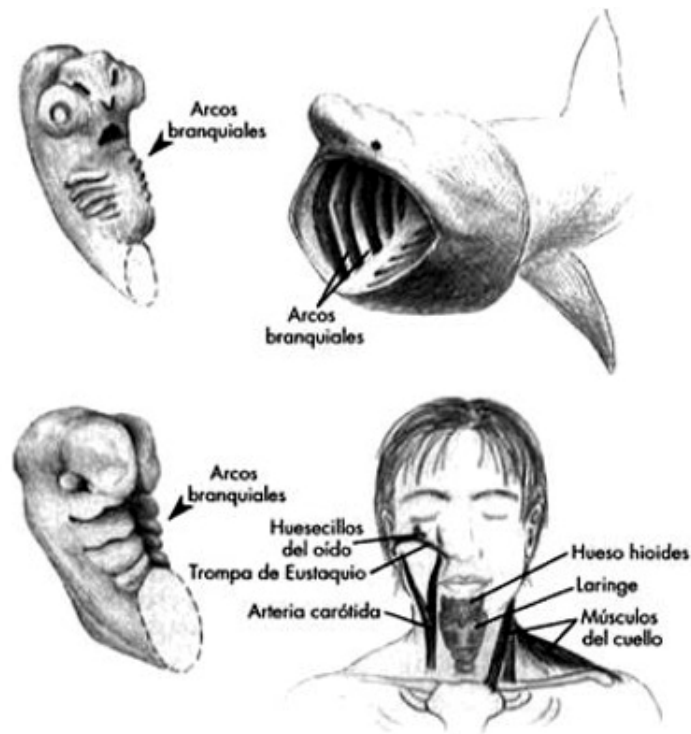
Mucho antes de los tiempos de Darwin, los biólogos ya se ocupaban del estudio de la embriología (cómo se desarrolla un animal) y la anatomía comparada (las semejanzas y diferencias en la estructura de distintos animales). Sus estudios revelaron muchas peculiaridades que, en aquel momento, no tenían sentido. Por ejemplo, todos los vertebrados comienzan su desarrollo del mismo modo, con una apariencia de pez embrionario. A medida que avanza su desarrollo, las especies comienzan a divergir, pero lo hacen de las más extrañas maneras. Algunos vasos sanguíneos, nervios y órganos que al principio estaban presentes en los embriones de todas las especies, de repente desaparecen; otras se someten a extrañas contorsiones y migraciones. Al final, la danza del desarrollo culmina en las formas adultas, tan distintas de los peces, los reptiles, las aves, los anfibios y los mamíferos. Pero al principio del desarrollo, todos se parecen mucho. Darwin cuenta la historia de cómo el gran embriólogo alemán Karl Ernst von Baer se mostraba confundido por la similitud de los embriones de los vertebrados. Von Baer había escrito a Darwin:

Tengo en mi poder embriones en alcohol, cuyos nombres he dejado de anotar, y ahora me es imposible decir a qué clase pertenecen. Pueden ser saurios o aves pequeñas, o mamíferos muy jóvenes: tan completa es la semejanza en el modo de formación de la cabeza y tronco de estos animales.

Y una vez más fue Darwin quien reconcilió las dispares observaciones que llenaban los tratados de embriología de su época al mostrar que las extrañas características del desarrollo cobraban sentido de golpe bajo la idea unificadora de la evolución:

La embriología aumenta mucho en interés cuando consideramos el embrión como un retrato, más o menos borrado, de la forma del progenitor común de cada una de las grandes clases de animales.

Comencemos por ese feto con aspecto de pez que aparece en todos los vertebrados, sin miembros y con una cola que recuerda una aleta caudal. Quizá de los caracteres que recuerdan a los peces, el más sorprendente sea una serie de siete bolsas, separadas por surcos, presentes en el embrión a cada lado de lo que será la cabeza. Estas bolsas reciben el nombre de arcos branquiales, pero en bien de la brevedad podemos llamarlos «arcos» (Figura 16).



*Figura 16. Arcos branquiales de un embrión de tiburón (arriba, a la izquierda) y de un embrión humano (abajo, a la izquierda). En los tiburones y los peces (como el tiburón peregrino, *Cetorhinus maximus*, arriba a la izquierda), los arcos se desarrollan directamente en las estructuras branquiales de los adultos, mientras que en los humanos (y otros mamíferos) dan lugar en el adulto a diversas estructuras de la cabeza y el tronco. Ilustraciones de Kalliopi Monoyios.*

Cada uno de los arcos contiene tejidos que durante el desarrollo se convertirán en nervios, vasos sanguíneos, músculos y hueso o cartílago. A medida que avanza el desarrollo embrionario de los peces y los tiburones, los primeros arcos se convierten en estructuras branquiales: los surcos entre las bolsas se abren convirtiéndose en hendiduras branquiales, y las bolsas desarrollan nervios para controlar el movimiento de las branquias, vasos sanguíneos para extraer el oxígeno del agua, y barras de hueso o cartílago para sostener la estructura de branquias. Así pues, en los peces, incluidos los tiburones, el desarrollo de las branquias a partir de los arcos embrionarios es más o menos directo: estos caracteres embrionarios simplemente aumentan de tamaño sin cambiar demasiado hasta formar el aparato respiratorio del adulto.

En otros vertebrados que de adultos no tienen branquias, estos arcos se convierten en estructuras muy diferentes: estructuras que forman parte de la cabeza. En los mamíferos, por ejemplo, forman los tres huesecillos del oído medio, la trompa de Eustaquio, la arteria carótida, las amígdalas, la laringe y los nervios craneanos. En algunos casos, las hendiduras branquiales embrionarias no se acaban de cerrar en el feto humano, y el resultado es un bebé con un quiste en el cuello. Esta afección, que es un atavismo de nuestros antepasados peces, puede corregirse con cirugía. Nuestros vasos sanguíneos sufren algunas contorsiones bastante peculiares. En los peces y los tiburones, el sistema de vasos sanguíneos se desarrolla de manera bastante directa a partir del que se forma en el embrión. En otros vertebrados, sin embargo, los vasos migran durante el desarrollo, y algunos desaparecen. Los mamíferos como nosotros se quedan con sólo tres de los seis vasos originales. Lo realmente curioso es que a medida que avanza nuestro desarrollo, los cambios recuerdan una secuencia evolutiva.

Nuestro sistema circulatorio de pez se convierte en uno parecido al de los embriones de los anfibios. En éstos, los vasos embrionarios se convierten directamente en los adultos, pero los nuestros siguen cambiando hasta convertirse en un sistema circulatorio parecido al de los embriones de los reptiles. En éstos, este sistema produce directamente el adulto, pero el nuestro sigue cambiando, dando algunas vueltas más que lo convierten en un verdadero sistema circulatorio de mamífero, con sus arterias carótidas, pulmonares y dorsales (Figura 17).

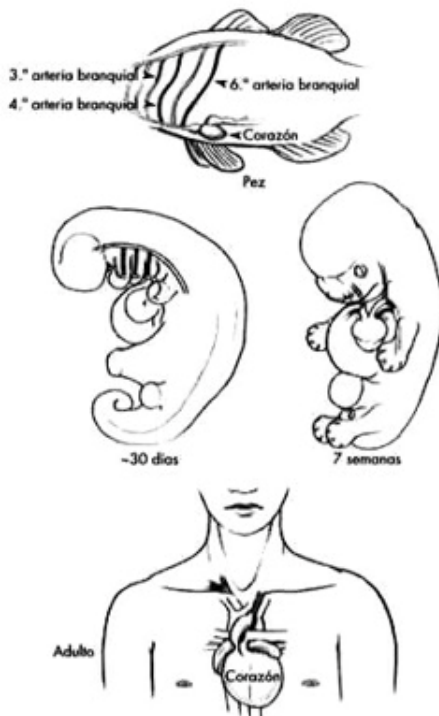


Figura 17. Los vasos sanguíneos de los embriones humanos comienzan siendo parecidos a los de los embriones de los peces, con un vaso dorsal y otro ventral conectados por vasos paralelos, uno a cada lado («arcos aórticos»). En los peces, estos vasos laterales llevan la sangre de y hacia las branquias. Los peces embrionarios y adultos tienen seis pares de arcos; éste es el plan básico que aparece al principio del desarrollo de todos los vertebrados. En el embrión humano, los arcos primero, segundo y quinto se forman brevemente al principio del desarrollo, pero desaparecen a las cuatro semanas de edad, cuando se forman los arcos tercero, cuarto y sexto (que se distinguen aquí por el diferente tono de gris). A las siete semanas, los arcos embrionarios adoptan una disposición que se parece mucho a la que siguen los vasos embrionarios de un reptil. En la configuración final del adulto, las vasos vuelven a adoptar una nueva configuración, desapareciendo algunos mientras otros se transforman en distintos vasos. Los arcos aórticos de los peces no sufren tales transformaciones. Ilustraciones de Alison E. Burke.

Estas pautas de desarrollo plantean muchas preguntas. Para empezar, ¿por qué distintos vertebrados, que al final acabarán siendo muy diferentes, comienzan su desarrollo con el aspecto de un embrión de pez? ¿Por qué los mamíferos forman la cabeza y el rostro a partir de las mismas estructuras embrionarias que en los peces

dan lugar a las branquias? ¿Por qué los embriones de los vertebrados siguen una secuencia tan retorcida de cambios en el sistema circulatorio? ¿Por qué los embriones humanos, o los de los reptiles, no comienzan su desarrollo con el plan del sistema circulatorio que les corresponderá como adultos, en lugar de hacer tantos cambios sobre los desarrollos anteriores? ¿Y por qué nuestra secuencia de desarrollo sigue el orden de nuestros antepasados (de peces a anfibios, a reptiles y a mamíferos)? Como Darwin explica en *El origen*, no es porque los embriones humanos experimenten durante su desarrollo una serie de entornos a los que tengan que adaptarse de manera sucesiva, primero el propio de un pez, luego el propio de un reptil, y así en adelante:

Los puntos de estructura en que los embriones de animales muy diferentes, dentro de la misma clase, se parecen entre sí, muchas veces no tienen relación directa con sus condiciones de existencia. No podemos, por ejemplo, suponer que en los embriones de los vertebrados, la dirección, formando asas, de las arterias junto a las aberturas branquiales esté relacionada con condiciones semejantes en el pequeño mamífero que es alimentado en el útero de su madre, en el huevo de ave que es incubado en el nido y en la puesta de una rana en el agua.

La «recapitulación» de una secuencia evolutiva se observa también en la secuencia de desarrollo de otros órganos: por ejemplo, los riñones. Durante el desarrollo, el embrión humano forma en realidad tres tipos distintos de riñón, uno tras otro, de manera que los dos primeros son eliminados antes de que aparezca nuestro riñón definitivo. Esos riñones embrionarios transitorios se parecen a los que encontramos en especies que evolucionaron antes que nosotros en el registro fósil: los peces agnatos y los reptiles, respectivamente. ¿Qué significado tiene esto?

Uno podría dar a esta pregunta una respuesta superficial del siguiente modo: todos los vertebrados pasan por una serie de fases durante su desarrollo, y resulta que la secuencia de esas fases sigue la secuencia evolutiva de sus antecesores. Así, un reptil comienza su desarrollo pareciéndose primero a un pez embrionario, luego a

un anfibio embrionario y, por último, a un reptil embrionario. Los mamíferos siguen la misma secuencia, pero añaden al final la fase del mamífero embrionario.

Esta respuesta es correcta pero sólo plantea preguntas más profundas. ¿Por qué habría de producirse el desarrollo de esta manera? ¿Por qué la selección natural no elimina la fase de «pez embrionario» del desarrollo humano, dado que la combinación de una cola, unos arcos branquiales y un sistema circulatorio como los de los peces no parecen necesarios para un embrión humano? ¿Por qué no comenzamos nuestro desarrollo directamente como pequeños homúnculos, como en efecto creían algunos biólogos del siglo XVII, y vamos creciendo hasta que por fin nacemos? ¿Por qué tantos cambios y transformaciones?

La respuesta probable, que no es nada mala, es que a medida que una especie evoluciona hacia otra, los descendientes heredan el programa de desarrollo de sus antepasados, es decir, todos los genes que forman las estructuras ancestrales. Y el desarrollo es un proceso muy conservador. Muchas estructuras que se forman en las fases tardías del desarrollo requieren «señales» bioquímicas generadas por caracteres que se han formado antes. Si, por ejemplo, uno intenta modificar el sistema circulatorio remodelándolo desde el principio mismo del desarrollo, podrían producirse toda suerte de efectos secundarios adversos en la formación de otras estructuras, como los huesos, que no necesitan cambiarse. Para evitar estos efectos laterales deletéreos, lo más sencillo suele ser producir algunos cambios menos drásticos en lo que ya es un plan de desarrollo básico y robusto. Lo mejor es programar las cosas que *evolucionaron* más tarde para que se *desarrollen* más tarde en el embrión.

Este principio de «añadir lo nuevo a lo viejo» explica también por qué la secuencia de cambios durante el desarrollo refleja la secuencia evolutiva de los organismos. A medida que un grupo evoluciona hacia otro, a menudo añade su programa de desarrollo al final del antiguo.

Habiendo observado este principio, Ernst Haeckel, un evolucionista alemán coetáneo de Darwin, formuló en 1866 una «ley biogenética» que suele resumirse en la célebre máxima «la ontogenia recapitula la filogenia». Esto significa que durante el desarrollo de un organismo se representa su historia evolutiva. Pero esta idea sólo es cierta en un sentido limitado. Los estadios embrionarios no se parecen a las

formas adultas de los antepasados, como Haeckel sostenía, sino a las formas *embrionarias* de los antepasados. Los fetos humanos, por ejemplo, no se parecen nunca a un pez o un reptil adultos, sino que en ciertos aspectos se parecen a peces y reptiles embrionarios. Además, la recapitulación no es ni estricta ni inevitable: no todos los caracteres del embrión de un antepasado aparecen en los descendientes, como tampoco se suceden los estadios de desarrollo con arreglo a un orden evolutivo estricto. Además, algunas especies, como las plantas, han prescindido de casi toda traza de su ascendencia durante el desarrollo. La ley de Haeckel ha quedado desprestigiada no sólo porque no es estrictamente cierta, sino también porque Haeckel fue acusado, de forma bastante injusta, de alterar algunos dibujos de embriones en sus primeras fases para hacerlos más parecidos entre ellos de lo que realmente eran.²⁰ Pero tampoco se trata de tirar la fruta fresca con la pocha. Los embriones presentan cierta forma de recapitulación: a menudo los caracteres que aparecieron primero en la evolución también aparecen primero durante el desarrollo. Y esto sólo cobra sentido si las especies tienen una historia evolutiva.

Ahora bien, no sabemos con certeza por qué algunas especies retienen buena parte de su historia evolutiva durante el desarrollo. El principio de «añadir lo nuevo a lo viejo» no es más que una hipótesis, una explicación de las observaciones de la embriología. Es difícil demostrar que es más fácil que un programa de desarrollo evolucione de una forma y no de otra. Pero las observaciones de la embriología siguen estando ahí, y sólo tienen sentido a la luz de la evolución. Todos los vertebrados comienzan su desarrollo como peces embrionarios porque todos descendemos de un antepasado semejante a los peces y con un embrión, por consiguiente, parecido al de los peces.

Vemos extrañas contorsiones y desapariciones de órganos, vasos sanguíneos y hendiduras branquiales porque los descendientes todavía llevan los genes y los programas de desarrollo de sus antepasados. Y la secuencia de cambios durante el desarrollo también tiene sentido: en cierta fase del desarrollo los mamíferos tienen

²⁰ Los creacionistas usan a menudo los dibujos «alterados» de Haeckel como arma para atacar a la evolución en general: los evolucionistas, dicen, distorsionan los hechos para que apoyen un darwinismo que es erróneo. Pero la historia de Haeckel no es tan simple. Quizá no fuera culpable de falsedad, sino de negligencia: su «fraude» consistió únicamente en ilustrar tres embriones distintos con la misma plancha de xilografía. Cuando se le llamó la atención sobre su error, lo admitió y corrigió. No hay evidencia alguna de que hubiera distorsionado a propósito la apariencia de los embriones para que parecieran más semejantes de lo que eran. R. J. Richards (2008, capítulo 8) explica la historia completa

un sistema circulatorio embrionario parecido al de los reptiles, pero no viceversa. ¿Por qué? Porque los mamíferos descienden de antiguos reptiles y no al contrario.

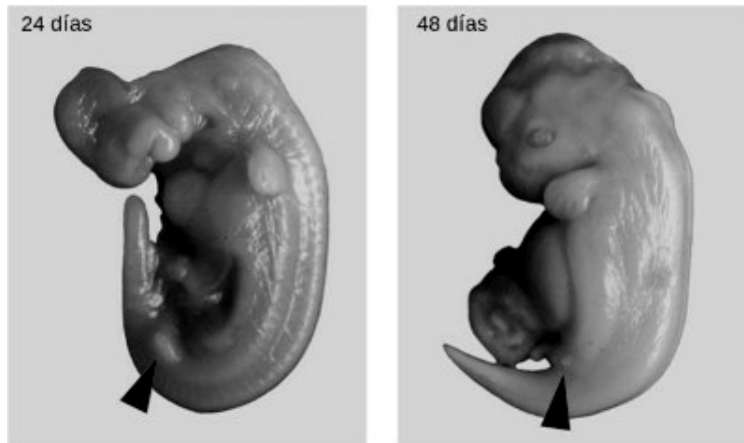


Figura 18. Desaparición, en el delfín manchado (Stenella attenuata), de las estructuras de las extremidades posteriores, que son un vestigio evolutivo de sus antepasados tetrápodos. En el embrión de 24 días (izquierda), la yema de las extremidades posteriores (señalada con un triángulo) está bien desarrollada, siendo apenas un poco menor que la de las extremidades anteriores. Pero a los 48 días (derecha), las yemas posteriores casi han desaparecido, mientras que las anteriores continúan su desarrollo hasta lo que serán las aletas. Fotografías del Dr. Ivan Misek, utilizadas con permiso.

Cuando escribió *El origen*, Darwin consideraba que la embriología aportaba los indicios más fuertes a favor de la evolución. En la actualidad probablemente concedería la posición de honor al registro fósil. Con todo, la ciencia sigue acumulando rasgos peculiares del desarrollo que apoyan la evolución. Los embriones de las ballenas y los delfines forman yemas de los miembros posteriores, unas protuberancias de tejido que, en los mamíferos de cuatro patas, se convierten en las patas traseras. Pero en los mamíferos marinos las yemas se reabsorben poco después de su formación. La Figura 18 muestra esta regresión en el desarrollo del delfín manchado. Las ballenas con barbas (misticetos), que no tienen dientes pero descienden de ballenas que sí los tenían, desarrollan dientes embrionarios que desaparecen antes del nacimiento.

Uno de mis casos preferidos de prueba embriológica de la evolución es el pelo en el feto humano. Se nos conoce como «monos desnudos» porque, a diferencia de otros primates, no nos cubre una capa gruesa de pelo. Con la excepción de un breve período, mientras somos embriones. Alrededor de los seis meses después de la concepción, quedamos totalmente cubiertos por un vello fino y aterciopelado que recibe el nombre de lanugo. Por lo general, el lanugo cae un mes antes del nacimiento, y es reemplazado entonces por el pelo más escaso con el que nacemos. (Los bebés prematuros, sin embargo, a veces nacen con lanugo, que cae al poco tiempo.) El caso es que los embriones humanos no necesitan un abrigo temporal de pelo. Después de todo, en el útero se vive muy cómodamente a 37 grados centígrados. El lanugo sólo puede explicarse como una reliquia de nuestros antepasados comunes con los primates: los fetos de los monos también desarrollan una cubierta de pelo aproximadamente en la misma fase del desarrollo. Su pelo, sin embargo, no cae, sino que se mantiene hasta formar el pelo del adulto. Y, al igual que los humanos, los fetos de las ballenas tienen lanugo como recuerdo de sus antepasados terrestres.

El último ejemplo relativo a los humanos nos introduce en el dominio de la especulación, pero es demasiado atractivo como para omitirlo. Me refiero al «reflejo de prensión» de los recién nacidos. Si el lector tiene oportunidad de probarlo con un bebé, bastará con que le acaricie con un dedo la palma de la mano. El bebé responderá cerrando el puño alrededor del dedo. De hecho, agarran con tanta fuerza que, con las dos manos, pueden colgarse de un palo de escoba durante varios minutos. (Advertencia: ¡no haga este experimento en casa!) El reflejo de prensión, que desaparece unos cuantos meses después del nacimiento, podría ser una conducta atávica. Los monos y los simios recién nacidos poseen el mismo reflejo, pero en ellos persiste durante toda la infancia, lo que les permite agarrarse al pelo de sus madres cuando se desplazan.

Es una lástima que aunque la embriología nos proporciona una mina de indicios de la evolución, los libros de texto de esta disciplina no suelen hacer mención de esto. He conocido obstetras, por ejemplo, que lo saben todo sobre el lanugo salvo por qué aparece.

Además de las peculiaridades del desarrollo embrionario, hay peculiaridades de la estructura de los animales que sólo la evolución puede explicar. Me refiero a los casos de «mal diseño».

5. Mal diseño

En la poco memorable película *El hombre del año*, el actor de comedia Robin Williams interpreta el papel de un entrevistador de la televisión que, por una serie de extraños accidentes, se convierte en presidente de Estados Unidos. Durante un debate electoral, le preguntan al personaje de Williams por el diseño inteligente. Y responde: «La gente habla del diseño inteligente, dicen que deberíamos enseñarlo. Fijaos en el cuerpo humano; ¿os parece eso inteligente? ¡Tenemos una planta de desechos al lado de un área recreativa!».

Es una buena observación. Aunque los organismos parezcan estar diseñados para ajustarse a sus entornos naturales, la idea de diseño *perfecto*, no es más que una ilusión. Todas las especies son imperfectas de varias maneras. Los kiwis tienen alas inútiles, las ballenas una pelvis vestigial, y nuestro apéndice es un órgano nefando. A lo que me refiero con lo de «mal diseño» es a que si los organismos hubieran sido contruidos desde cero por un diseñador que utilizara como materiales de construcción los nervios, los músculos, los huesos, etc., no tendrían esas imperfecciones. El diseño perfecto sería verdaderamente el sello de un diseñador habilidoso e inteligente. El diseño imperfecto es la marca de la evolución; de hecho, es precisamente lo que esperamos de la evolución. Sabemos que la evolución no comienza de cero. Las partes nuevas evolucionan a partir de otras ya existentes, y tienen que funcionar bien con las partes que ya habían evolucionado. En consecuencia, debemos esperar compromisos: algunos caracteres que funcionan bastante bien, pero no tan bien como podrían, o algunas características (como las alas de los kiwis) que no funcionan en absoluto, que son sólo remanentes evolutivos.

Un buen ejemplo de mal diseño son los peces planos, cuya popularidad como pescado de mesa (el lenguado, por ejemplo) le viene en parte por su forma, que hace que sea fácil separar los filetes de la espina. Existen unas quinientas especies de peces planos (halibut, rodaballo, platija), todos ellos en el orden

pleuronectiformes. Esta palabra significa «que nadan de lado», y nos da la clave de su pobre diseño. Los peces planos nacen siendo peces de aspecto normal que nadan verticalmente, con un ojo a cada lado de su cuerpo en forma de torta. Pero al mes de vida les ocurre algo extraño: uno de los ojos comienza a migrar hacia arriba. Migra hasta pasar al otro lado del cráneo y unirse al otro ojo, formando una pareja en uno de los lados del cuerpo, el derecho o el izquierdo, dependiendo de la especie. El cráneo también cambia de forma para facilitar esta migración, y se producen cambios en las aletas y el color. Al mismo tiempo, el pez plano se vuelca sobre el lado del cuerpo que ha quedado sin ojos, que quedan en lo que ahora es la parte superior del pez. Se convierte así en un habitante de los fondos, en los que se camufla para depredar sobre otros peces. Cuando tiene que nadar, lo hace de lado. Los peces planos son los vertebrados más asimétricos del mundo; vale la pena examinar de cerca un ejemplar en la pescadería más cercana.

Si uno quisiera diseñar un pez plano, seguro que no lo haría así. Produciría un pez como la raya, que es plano desde el momento en que nace y descansa sobre el vientre, y no un pez que para ser plano tiene que acostarse sobre un lado, desplazar los ojos y deformar el cráneo. Si este diseño es deficiente es a causa de su herencia evolutiva. Sabemos por su árbol filogenético que las platijas, como todos los peces planos, evolucionaron a partir de peces simétricos «normales». Debió resultarles ventajoso tumbarse sobre un lado y nadar por el fondo del mar, donde podían esconderse de sus depredadores y ocultarse ante sus presas. Esto, como es obvio, creó un problema: el ojo que quedase contra el fondo sería inútil y se dañaría fácilmente. Para arreglarlo, la selección natural siguió el camino tortuoso pero factible de mover ese ojo al otro lado y deformar de otra manera el cuerpo. Uno de los peores diseños de la naturaleza es el nervio laríngeo recurrente de los mamíferos. Este nervio, que conecta el cerebro con la laringe, nos ayuda a hablar y tragar. Lo curioso es que es mucho más largo de lo necesario. En lugar de seguir una ruta directa desde el cerebro hasta la laringe, una distancia de unos treinta centímetros en los humanos, lo que hace es bajar hasta el pecho, darle la vuelta a la aorta y un ligamento derivado de una arteria, y luego regresar («recurrir») hacia arriba hasta conectar con la laringe (Figura 19). Con tanta vuelta, acaba teniendo una longitud de casi un metro. En las jirafas el nervio sigue un camino parecido, o

sea, que baja todo su largo cuello y vuelve a subir, recorriendo una distancia ¡4,6 metros mayor que la ruta directa! La primera vez que tuve noticia de este extraño nervio, me costó creerlo. Deseoso de verlo con mis propios ojos, hice acopio de coraje y me dirigí al laboratorio de anatomía humana dispuesto a inspeccionar mi primer cadáver. Un solícito profesor me mostró el nervio, siguiendo su curso con un lápiz de la cabeza al torso y de vuelta a la garganta.

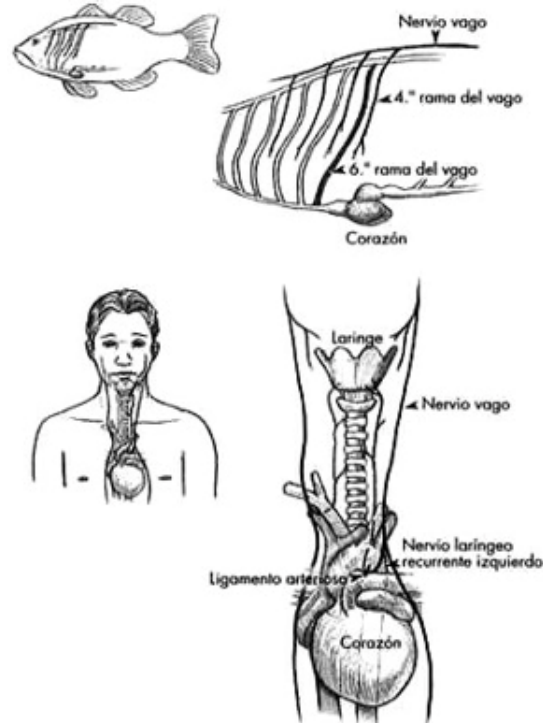


Figura 19. El tortuoso recorrido del nervio laríngeo recurrente izquierdo en los humanos es prueba de su evolución a partir de un antepasado parecido a los peces. El sexto arco branquial de los peces, que más tarde se convierte en una branquia, está irrigado por el sexto arco aórtico. La cuarta rama del nervio vago discurre por detrás de este arco. Estas estructuras se mantienen como parte del aparato branquial en el pez adulto, invirtiéndolo y trayendo la sangre de las branquias. En cambio, en los mamíferos una parte del arco branquial evolucionó hasta convertirse en la laringe. Ésta y su nervio se mantuvieron conectados durante este proceso, pero el sexto arco aórtico del lado izquierdo del cuerpo migró hacia el pecho, donde quedó reducido a un vestigio no funcional, el ligamento arterioso. Como el nervio se mantuvo detrás de este arco pero conectado todavía con una estructura del cuello,

su evolución se vio forzada a desarrollar una vía que baja hasta el pecho, da la vuelta a la aorta y a los restos del sexto arco aórtico, y asciende después de vuelta a la laringe. El recorrido indirecto de este nervio no refleja un diseño inteligente; sólo puede entenderse como el producto de nuestra evolución a partir de antepasados con un plan corporal muy distinto. Ilustraciones de Alison E. Burke.

El retorcido circuito del nervio laríngeo recurrente no se queda en mal diseño: podría ser una mala adaptación. La longitud innecesaria lo hace propenso a las heridas. Puede dañarse, por ejemplo, por un golpe en el pecho, que resultaría entonces en una dificultad para hablar y tragar. Pero el recorrido puede explicarse teniendo en cuenta cómo evolucionó este nervio. Como la propia aorta de los mamíferos, desciende de aquellos arcos branquiales de nuestros antepasados comunes con los peces. En los primeros estadios de desarrollo del embrión de todos los vertebrados, cuando se parece al embrión de un pez, el nervio discurre de arriba abajo acompañando al vaso sanguíneo del sexto arco branquial; es una rama de otro nervio mayor, el nervio vago, que recorre el dorso desde el cerebro. Y en los peces adultos, el nervio conserva esta posición, conectando el cerebro con las branquias, a las que ayuda a bombear agua.

Durante nuestra evolución, el vaso sanguíneo del quinto arco aórtico desapareció, y los vasos del cuarto y sexto arco migraron hacia abajo, hasta el futuro torso, donde se convirtieron en la aorta y un ligamento que conecta la aorta con la arteria pulmonar. Pero el nervio laríngeo, todavía detrás del sexto arco, tenía que mantenerse conectado con las estructuras embrionarias que se convirtieron en la laringe, unas estructuras que se mantuvieron más cerca del cerebro. Cuando la futura aorta, en su evolución, dio la vuelta hacia el corazón, el nervio faríngeo se vio obligado a evolucionar con ella. Hubiera sido más eficiente que el nervio diera la vuelta a la aorta, se rompiera y luego volviera a formarse siguiendo una ruta más directa, pero la selección natural no podía hacer eso porque cortar un nervio para volverlo a unir es un paso que reduce la eficacia biológica o *fitness*. Obligado a seguir a la aorta en su giro, el nervio laríngeo tuvo que hacerse largo y recurrente. Esta vía evolutiva, además, queda recapitulada durante el desarrollo, pues

comenzamos nuestra vida como embriones con un diseño de nervios y vasos sanguíneos como en los peces ancestrales. Al final, acabamos con un mal diseño.

Por gentileza de la evolución, la reproducción humana también está repleta de chapuzas. Ya hemos visto que el descenso de los testículos en los machos, que es una consecuencia de su evolución a partir de las gónadas de los peces, crea puntos blandos en la cavidad abdominal que pueden provocar hernias. Los machos tienen la desventaja adicional de un pobre diseño de la uretra, que pasa por en medio de la próstata, la glándula que produce una parte del fluido seminal. Parafraseando a Robin Williams, es una alcantarilla que atraviesa un área de ocio. Una elevada fracción de hombres de edad avanzada sufre un engrosamiento de la próstata, que estruja la uretra y hace que la micción sea difícil y dolorosa. (Cabe suponer que esto nunca fue un problema durante la evolución humana, cuando pocos hombres vivían más de treinta años.) Un diseñador inteligente no haría nunca que un tubo susceptible de aplastarse pasase a través de un órgano propenso a la infección y el engrosamiento. Si ocurrió así fue porque la próstata de los mamíferos evolucionó a partir del tejido de las paredes de la uretra.

Las mujeres no lo tienen mucho mejor. Alumbran a sus hijos por la pelvis, un proceso doloroso y poco eficiente que, antes del advenimiento de la medicina moderna, mataba a un número considerable de madres y bebés. El problema es que al aumentar nuestro volumen cerebral, la cabeza del bebé se hizo muy grande en comparación con la abertura de la pelvis, que tenía que mantenerse estrecha para permitir un eficiente bipedismo (locomoción sobre dos piernas). Este compromiso está en la raíz de las dificultades e intensos dolores del parto en las mujeres. Puestos a diseñar una mujer, ¿no hubiera sido mejor cambiar el tracto reproductor para que se abriera al exterior por el bajo abdomen en lugar de hacerlo por la pelvis? ¡Cuánto más fácil no sería entonces dar a luz! Pero los humanos evolucionaron a partir de animales que ponían huevos o parían (pero de forma mucho menos dolorosa que nosotros) a través de la pelvis. Nuestra historia evolutiva nos impone restricciones.

Y ¿hubiera creado un diseñador inteligente la pequeña brecha entre los ovarios humanos y las trompas de Falopio, que obliga a los huevos a cruzar este espacio antes de poder descender por la trompa e implantarse en el útero? De vez en

cuando un óvulo fecundado no consigue dar el salto y se implanta en el abdomen. Se producen así «embarazos abdominales» que casi indefectiblemente son fatales para el feto y, si no se interviene quirúrgicamente, también para la madre. La brecha es un remanente de nuestros antepasados peces y reptiles, que ponían los huevos directamente del ovario al exterior del cuerpo. Las trompas de Falopio son una conexión imperfecta porque evolucionaron posteriormente como un añadido en los mamíferos.²¹

Algunos evolucionistas replican que el mal diseño no es un argumento a favor de la evolución, que un diseñador inteligente sobrenatural podía haber creado a propósito estas características imperfectas. En su libro *La caja negra de Darwin: el reto de la bioquímica a la evolución*, el defensor del DI Michael Behe afirma que «las características de diseño que nos resultan extrañas podrían o no haber sido puestas ahí por el Diseñador por alguna razón, artística quizá, o por dar variedad, para lucirse, por algún propósito práctico que todavía no podemos entender o alguna razón que nunca podremos averiguar». Pero no es ésa la cuestión. Un diseñador podría, en efecto, haber tenido motivos insondables. Pero los ejemplos concretos de mal diseño que hemos observado sólo tienen sentido *si evolucionaron a partir de características de los antepasados*. Si un diseñador realmente tenía claros motivos cuando creó las especies, sin duda uno de ellos debía de ser el de engañar a los biólogos haciendo que pareciera que los organismos habían evolucionado.

²¹ Nuestra ascendencia nos ha legado muchos otros males físicos. Las hemorroides, los dolores de espalda, el hipo y la apendicitis son también un recuerdo de nuestra evolución. Neil Shubin describe éstos y muchos otros en *Your Inner Fish*.

Capítulo 4

La geografía de la vida



Siendo naturalista a bordo del HMS Beagle, me impresionaron mucho ciertos hechos de la distribución geográfica de los habitantes de América del Sur, y de las relaciones geológicas entre los habitantes actuales y los pasados de aquel continente. Estos hechos parecían dar alguna luz sobre el origen de las especies, este misterio de los misterios, como lo ha llamado uno de nuestros mayores filósofos.

CHARLES DARWIN, *El origen de las especies*

Contenido:

- 1. Continentes*
- 2. Islas*
- 3. Epílogo*

Uno de los lugares más solitarios de la Tierra son las lejanas islas volcánicas de los mares del sur. En una de ellas, Santa Elena, situada a medio camino entre África y América del Sur, transcurrieron los últimos cinco años del cautiverio británico de Napoleón, exiliado de su Francia nativa. Pero las islas más famosas por su aislamiento son las del archipiélago de Juan Fernández, cuatro pequeños retazos de tierra con una superficie total de unos cien kilómetros cuadrados situados a unos

600 kilómetros al oeste de Chile. Fue en una de estas islas donde transcurrió la solitaria vida de náufrago de Alexander Selkirk, el auténtico Robinson Crusoe.

Nacido en 1676 como Alexander Selcraig, Selkirk fue un iracundo escocés que se embarcó en 1703 como maestro en el *Cinque Ports*, un buque con patente de corso del Gobierno británico para saquear los barcos españoles y portugueses. Preocupado por la temeridad de su joven capitán de veintiún años y por la deplorable condición en que se hallaba el buque, Selkirk exigió que se le dejara en tierra, a la espera de un pronto rescate, cuando el *Cinque Ports* lanzó amarras para aprovisionarse de agua y alimentos en la isla de Más a Tierra, en el archipiélago de Juan Fernández. El capitán accedió, y Selkirk fue abandonado voluntariamente, llevándose consigo a la isla únicamente ropa, sábanas y algunas herramientas, un fusil de pedernal, tabaco, una tetera y una Biblia. Así comenzaron cuatro años y medio de soledad.

Más a Tierra era una isla desierta en la que los únicos mamíferos, aparte de Selkirk, eran cabras, ratas y gatos que otros navegantes habían introducido en el pasado. Pero tras un período inicial de soledad y depresión, Selkirk se adaptó a sus circunstancias, y se dedicó a cazar cabras, recolectar mariscos y frutas, recoger las verduras que habían plantado sus predecesores, hacer fuego frotando dos palos, fabricarse ropas con pieles de cabra y mantener a raya las ratas domesticando unas crías de gato para que compartieran sus habitaciones.

Selkirk fue rescatado por fin en 1709 por un barco británico que, curiosamente, era pilotado por el capitán del *Cinque Ports*. La tripulación quedó asombrada por aquel salvaje vestido con pieles que llevaba tanto tiempo solo que su inglés era casi ininteligible. Tras ayudar a aprovisionar el barco de fruta y carne de cabra, Selkirk embarcó de vuelta a Inglaterra. Allí se alió con un escritor para producir un popular relato de sus aventuras, *The Englishman*, que supuestamente inspiró el *Robinson Crusoe* de Daniel Defoe.²² Sin embargo, Selkirk nunca logró adaptarse a la vida sedentaria en tierra firme. Volvió a navegar en 1720, y murió de unas fiebres un año más tarde en la costa africana.

Fueron las contingencias del tiempo y del carácter las que produjeron la historia de Selkirk. Pero la contingencia es también la lección de otra gran historia, la de los

²² También inspiró el poema de William Cowper «The Solitude of Alexander Selkirk» [La soledad de Alexander Selkirk], con sus célebres versos iniciales

habitantes no humanos de las islas de Juan Fernández y de otras islas como ésta. Pues aunque Selkirk no lo supiera, Más a Tierra (hoy isla de Alexander Selkirk) estaba habitada por los descendientes de antiguos náufragos: los Robinson Crusoes de plantas, aves e insectos que arribaron a la isla por accidente miles de años antes que Selkirk. Sin saberlo, vivía en un laboratorio de la evolución.

En la actualidad las tres islas de Juan Fernández son un museo viviente de plantas y animales exóticos y raros, con numerosas especies endémicas, es decir, que no se encuentran en ningún otro lugar del mundo. Entre ellas se cuentan cinco especies de aves (incluido un colibrí gigante de unos doce centímetros y color pardo rojizo, el espectacular picaflor de Juan Fernández, que se encuentra en estado crítico de conservación), 126 especies de plantas (incluidos muchos miembros peculiares de la familia de los girasoles), un lobo de mar y un puñado de insectos. Ninguna otra superficie comparable en todo el mundo contiene tantas especies endémicas. Pero la isla es igualmente notable por lo que le *falta*: no acoge *ni una sola especie de anfibio, reptil o mamífero*, unos grupos que son comunes en los continentes de todo el mundo. Esta pauta de formas de vida extrañas y eflorescentes, con la sorprendente ausencia de muchos grandes grupos, se repite una y otra vez en las islas oceánicas. Y, como veremos, aporta importantes indicios a favor de la evolución.

Fue Darwin quien primero examinó a fondo estas pautas. Gracias a sus propios viajes de juventud en el HMS *Beagle* y a su voluminosa correspondencia con científicos y naturalistas, comprendió que era necesario apelar a la evolución para explicar no sólo los orígenes y formas de las plantas y animales sino también su distribución por el planeta. Estas distribuciones planteaban numerosas preguntas. ¿Por qué las islas oceánicas tienen floras y faunas tan extrañas y desequilibradas en comparación con los grupos de especies que se encontraban en los continentes? ¿Por qué casi todos los mamíferos autóctonos de Australia eran marsupiales, mientras que los placentarios predominaban en el resto del mundo? Y si las especies habían sido creadas, ¿por qué el creador había colocado en regiones distantes con un terreno y un clima parecidos, como los desiertos de África y América, especies semejantes en su apariencia pero que mostraban otras diferencias más fundamentales?

Otros antes que Darwin habían cavilado sobre estas preguntas y habían sentado los cimientos para su propia síntesis intelectual, una síntesis que Darwin consideraba tan importante que le dedicó dos capítulos enteros en *El origen*. Estos capítulos suelen considerarse el documento fundacional del campo de la *biogeografía*, la disciplina que estudia la distribución de las especies en la Tierra. La explicación evolutiva de la geografía de la vida que propuso entonces resultó ser en gran medida correcta, y sólo ha sido refinada y apoyada por una legión de estudios posteriores. La evidencia biogeográfica a favor de la evolución es en la actualidad tan poderosa que jamás me he encontrado con un libro, artículo o conferencia creacionista que haya intentado refutarla. Los creacionistas simplemente fingen que esa evidencia no existe.

Irónicamente, las raíces de la biogeografía se hunden en la religión. Los primeros «teólogos naturales» intentaron reconciliar la distribución de los organismos con el relato del arca de Noé de la Biblia. Todos los animales vivos se consideraban descendientes de las parejas que Noé llevó a bordo, parejas que viajaron hasta los lugares que ocupan en la actualidad desde el lugar donde quedó varada el arca después del diluvio (que tradicionalmente se supone que fue cerca del monte Ararat, en el levante de Turquía). Pero esta explicación tiene problemas evidentes. ¿Cómo se las arreglaron los canguros y las lombrices de tierra gigantes para cruzar los océanos hasta llegar a su hogar actual en Australia? ¿No se habría apresurado la pareja de leones a comerse a los antílopes? A medida que los naturalistas fueron descubriendo nuevas especies de plantas y animales, hasta los más recalcitrantes creyentes se dieron cuenta de que ninguna barca podía contenerlas a todas, y eso sin contar con su alimento y agua para un viaje de seis semanas.

Surgió entonces otra teoría: la de las creaciones *múltiples* distribuidas por toda la superficie de la Tierra. A mediados del siglo XIX, el prestigioso zoólogo Louis Agassiz, entonces en la Universidad de Harvard, afirmó que «no sólo eran las especies inmutables y estáticas, sino que también lo eran sus distribuciones, permaneciendo cada una en el lugar de su creación o cerca de él». Pero varios avances, sobre todo el número cada vez mayor de fósiles que refutaban la idea de que las especies fuesen «inmutables y estáticas», hicieron que tampoco esta idea pudiera sostenerse. Geólogos como Charles Lyell, el amigo y mentor de Charles

Darwin, comenzaron a hallar indicios de que la Tierra no sólo era muy vieja, sino que además era cambiante. Durante el viaje del *Beagle*, el propio Darwin descubrió fósiles de conchas de moluscos a gran altitud en los Andes, lo que demostraba que lo que hoy es una montaña, en otro tiempo había estado bajo el mar. Las tierras podían ascender o hundirse, y los continentes que vemos en la actualidad podían haber sido mayores o menores en el pasado. Y quedaban además todas aquellas preguntas sin respuesta sobre la distribución de las especies. ¿Por qué la flora del sur de África se parecía tanto a la del sur del continente americano? Algunos biólogos propusieron que todos los continentes habían estado conectados en otro tiempo a través de gigantescos istmos, pero no existía ningún indicio de que hubieran existido (Darwin se quejó a Lyell de que estos istmos se habían hecho aparecer «con la misma facilidad con la que un cocinero hace unas tortas»).

En un intento por sortear estas dificultades, Darwin propuso su propia teoría: que las distribuciones de las especies no se explican por la creación, sino por la evolución. Si las plantas y los animales dispusieran de medios para dispersarse a gran distancia y, después de dispersarse, pudieran evolucionar, entonces, unido esto a algunos cambios antiguos en la Tierra, como los períodos de expansión glacial, podrían explicarse muchas de las peculiaridades de la biogeografía que habían desconcertado a sus predecesores.

Al final, Darwin resultó tener razón, aunque no en todo. Es cierto que muchas de las observaciones de la biogeografía cobran sentido si suponemos dispersión, evolución y una Tierra cambiante. Pero no todas. Las grandes aves no voladoras, como los avestruces, los ñandúes y los emús, viven en África, América del Sur y Australia, respectivamente. Si todos hubieran tenido un mismo antepasado común, ¿cómo podía haberse dispersado tan ampliamente? ¿Y por qué el este de China y el este de América del Norte, dos regiones muy alejadas, comparten plantas, como los tuliperos y el dragón fétido, que no aparecen en las tierras que se extienden entre ellas?

Hoy disponemos de muchas de las respuestas que escaparon a Darwin gracias a dos avances que él no podía siquiera imaginar: la teoría de la deriva continental y la taxonomía molecular. Darwin comprendió que la Tierra había cambiado con el tiempo, pero no tenía ni idea de cuánto había cambiado realmente. Desde la década

de 1960, los científicos saben que la geografía antigua del mundo era muy distinta de la actual, que unos ingentes supercontinentes se han desplazado, unido y separado después en fragmentos.²³

Además, desde hace unos cuarenta años, hemos ido acumulando información de secuencias de ADN y proteínas que no sólo nos dicen cuáles son las relaciones evolutivas entre las especies, sino también el momento aproximado en que divergieron de sus antepasados comunes. La teoría de la evolución predice, y los datos lo apoyan, que a medida que las especies divergen de sus antepasados comunes, sus secuencias de ADN cambian de manera más o menos lineal con el tiempo. Podemos utilizar este «reloj molecular», calibrado con antepasados fósiles de especies existentes, para estimar el momento de divergencia de especies que tienen registros fósiles pobres.

Con la ayuda del reloj molecular podemos establecer las correspondencias entre las relaciones evolutivas entre especies y los movimientos conocidos de los continentes, además de los movimientos de los glaciares y la formación de auténticos puentes de tierra como el istmo de Panamá. Esto nos dice si los orígenes de las especies concurren en el tiempo con el origen de nuevos continentes y hábitats. Estas innovaciones han transformado la biogeografía en una gran historia de detectives: usando una serie de instrumentos y con un conjunto de hechos aparentemente inconexos, los biólogos deducen por qué las especies viven donde lo hacen. Hoy sabemos, por ejemplo, que las similitudes entre las plantas africanas y suramericanas no son sorprendentes, pues sus antepasados habitaron en otro tiempo en un supercontinente, Gondwana, que hace unos 170 millones de años se comenzó a separar en varios trozos (los actuales África, América del Sur, India, Madagascar y Antártida).

Cada uno de los pequeños trabajos de detective ya resueltos apoya el hecho de la evolución. Si las especies no hubieran evolucionado, sus distribuciones geográficas, tanto las actuales como las de sus fósiles, carecerían de sentido. Examinaremos primero las especies que viven en los continentes y luego las de las islas, pues estas dos geografías tan distintas aportan distintos indicios de la evolución.

²³ Puede verse una animación de la deriva continental durante los últimos 150 millones de años en http://mulinet6.li.mahidol.ac.th/cd-rom/cd-rom0309t/Evolution_files/platereconanim.gif. Más animaciones, y más detalladas, de la historia completa de la Tierra, pueden encontrarse en <http://www.scotese.com/>.

1. Continentes

Comencemos por una observación que habrá llamado la atención de cualquier persona que haya viajado mucho. Cuando se visitan dos áreas con un terreno y un clima parecidos, se encuentran diferentes tipos de organismos. Tomemos el caso de los desiertos. Muchas plantas del desierto son suculentas: presentan una combinación de caracteres adaptativos como los tallos gruesos y carnosos para almacenar agua, las espinas para disuadir a los herbívoros y las hojas reducidas o ausentes para reducir la pérdida de agua. Pero cada desierto tiene un tipo de suculentas distinto. En el continente americano, las suculentas pertenecen a la familia de los cactus. Pero los desiertos de Asia, Australia y África no tienen cactus autóctonos, y en ellos las suculentas pertenecen a una familia distinta, la de las lechetreznas o euforbias. Pueden distinguirse los dos tipos de suculentas por las flores y por la savia, que es clara y acuosa en los cactus, y lechosa y amarga en las lechetreznas. Sin embargo, pese a estas diferencias fundamentales, cactus y euforbias pueden tener una apariencia muy semejante. Tengo plantas de los dos tipos en las macetas del alféizar, y mis visitas son incapaces de distinguirlos sin leer las etiquetas.

¿Por qué un creador habría de colocar plantas que son fundamentalmente distintas pero tienen aspecto muy parecido en áreas distantes del mundo que parecen ser ecológicamente idénticas? ¿No tendría más sentido poner las mismas especies de plantas en las regiones que tienen el mismo tipo de suelo y el mismo clima?

Podría replicarse que, si bien los desiertos *parecen* idénticos, son hábitats que difieren en aspectos sutiles pero importantes, y que los cactus y las euforbias se crearon de manera que se adecuaron a la perfección a sus hábitats respectivos. Pero esta explicación no vale, porque cuando se introducen cactus en los desiertos del Viejo Mundo, donde no se encuentran de manera natural, no tienen ningún problema para crecer. La chumbera, por ejemplo, que es un cactus originario de América del Norte, se introdujo en Australia a principios del siglo XIX con la intención de que los colonos pudieran extraer un tinte rojo de las cochinillas que se alimentan de la planta (éste es el tinte que da a las alfombras persas su intenso color rojo carmesí). A la entrada del siglo XX la chumbera se había extendido con

tanta rapidez que ya era una grave plaga que había malogrado miles de hectáreas de tierras agrícolas y estimulado programas de erradicación tan drásticos como ineficaces. La planta no pudo controlarse hasta 1926 con la introducción de la polilla del nopal (*Cactoblastis cactorum*), cuyas orugas devoran el cactus, en lo que constituye el primer ejemplo de control biológico, y uno de los de mayor éxito. Está claro, pues, que las chumberas, que son cactus, pueden crecer estupendamente en los desiertos australianos aunque en éstos las suculentas autóctonas sean euforbias. El ejemplo más famoso de especies distintas que desempeñan papeles parecidos es el de los mamíferos marsupiales, que en la actualidad se encuentran sobre todo en Australia (la zarigüeya es una excepción), y los mamíferos placentarios, que predominan en el resto del mundo.

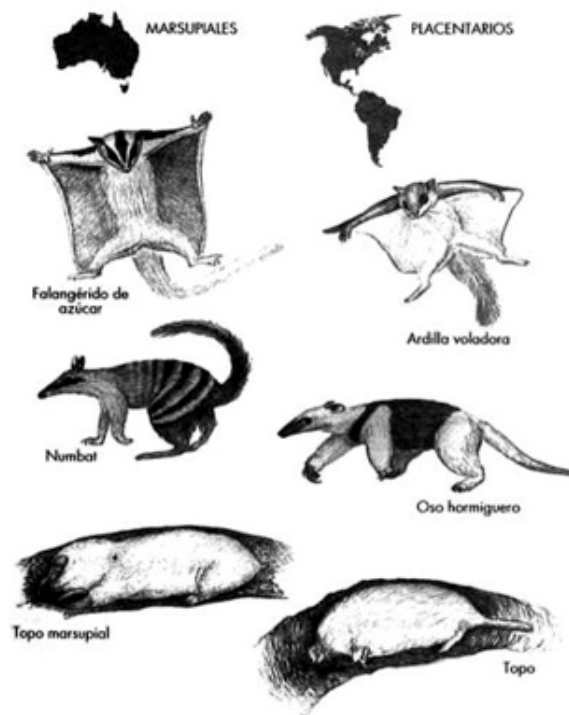


Figura 20. Evolución convergente en los mamíferos. Los hormigueros, falangéridos y topos marsupiales evolucionaron en Australia de manera independiente de sus equivalentes placentarios de América; sus formas, sin embargo, son notablemente parecidas. Ilustraciones de Kalliopi Monoyios.

Los dos grupos presentan importantes diferencias anatómicas, sobre todo en su sistema reproductor (casi todos los marsupiales tienen bolsa, el marsupio, y paren crías muy poco desarrolladas, mientras que los placentarios poseen placentas que permiten que las crías nazcan con un grado de desarrollo mucho más avanzado).

No obstante, en otros aspectos algunos marsupiales y placentarios muestran un parecido sorprendente. Hay topos marsupiales de aspecto y comportamiento casi igual al de los topos placentarios, ratones marsupiales que se parecen a los ratones placentarios, está el falangérido de azúcar, un marsupial que planea de árbol en árbol del mismo modo que las ardillas voladoras, y hay hormigueros marsupiales que hacen exactamente lo mismo que los osos hormigueros suramericanos (Figura 20).

Una vez más, hay que preguntarse: si los animales hubieran sido creados especialmente, ¿por qué habría de producir el creador en continentes distintos unos animales fundamentalmente distintos que sin embargo tienen aspecto y comportamiento tan parecidos? No es que los marsupiales sean inherentemente superiores a los placentarios en Australia, porque a los mamíferos placentarios introducidos en este continente les ha ido muy bien. Los conejos, sin ir más lejos, se han convertido en una plaga tan seria en Australia que están desplazando a marsupiales autóctonos como el bilbi (un pequeño mamífero con unas orejas marcadamente largas). Para ayudar a recoger fondos para la erradicación del conejo, los conservacionistas están haciendo campaña para que se abandone el conejo de Pascua a favor del bilbi de Pascua, así que cada primavera los bilbis de chocolate llenan los estantes de los supermercados australianos.

Ningún creacionista, sea del ramo del arca de Noé o de cualquier otro, ha ofrecido jamás una explicación razonable de por qué algunos tipos de animales distintos tienen formas tan parecidas en lugares distintos. No les queda otra que apelar a los inescrutables caprichos del creador. La evolución, en cambio, explica estas observaciones invocando un proceso bien descrito conocido como *evolución convergente*. Es muy sencillo. Las especies que habitan en hábitats parecidos están sometidos a presiones de selección parecidas de su entorno, así que su evolución los lleva a desarrollar adaptaciones parecidas, es decir a converger, y acaban pareciéndose y comportándose de manera muy similar aunque no están

emparentadas. Pero estas especies conservan diferencias esenciales que delatan su lejana ascendencia. (Un ejemplo famoso de convergencia es la coloración blanca de camuflaje que comparten diversos animales árticos como el oso polar y el búho nival.) El antepasado de los marsupiales colonizó Australia, mientras que los placentarios dominaron el resto del mundo. Tanto unos como otros se escindieron en multitud de especies, adaptadas a hábitats distintos. Si uno sobrevive y se reproduce mejor porque excava túneles bajo el suelo, la selección natural le reducirá los ojos y le proveerá de largas garras excavadoras, sin importar que se trate de un placentario o de un marsupial. Pero cada uno retendrá algunos rasgos característicos de sus antepasados.

Los cactus y las euforbias también muestran caracteres convergentes. El antepasado de las euforbias colonizó el Viejo Mundo, y el de los cactus el continente americano. Las especies que acabaron viviendo en los desiertos evolucionaron hacia adaptaciones parecidas: si uno es una planta en un clima seco, lo mejor es ser duro, no tener hojas y tener un tallo grueso para almacenar agua. Así que la selección natural moldeó las euforbias y los cactus de forma parecida.

La evolución convergente demuestra cómo funcionan de manera conjunta tres aspectos de la teoría de la evolución: la ascendencia común, la especiación y la selección natural. La ascendencia común explica por qué los marsupiales australianos comparten determinados caracteres (por ejemplo, las hembras tienen dos vaginas y dos úteros), mientras que los mamíferos placentarios comparten un conjunto distinto de caracteres (por ejemplo, una placenta persistente). La especiación es el proceso por el que el antepasado común da origen a muchas especies descendientes distintas. Y la selección natural hace que cada especie esté bien adaptada a su medio. Si ponemos todo esto junto y añadimos el hecho de que áreas distantes del mundo pueden tener hábitats parecidos, obtenemos la evolución convergente y, por añadidura, una explicación sencilla de las principales pautas biogeográficas.

Por lo que respecta a cómo llegaron los marsupiales a Australia, eso es parte de otra historia evolutiva, una historia que, además, conduce al enunciado de predicciones contrastables. Los fósiles de marsupiales más antiguos no se han encontrado en Australia sino en América del Norte. A medida que los marsupiales

evolucionaron, se fueron extendiendo hacia el sur hasta alcanzar hace unos 40 millones de años lo que hoy es la punta más meridional de América del Sur. Los marsupiales llegaron a Australia aproximadamente unos 10 millones de años más tarde, y comenzaron a diversificarse en las alrededores de doscientas especies que viven allí en la actualidad.

Pero ¿cómo pudieron cruzar el Atlántico meridional? La respuesta es que todavía no existía. En el momento de la invasión de los marsupiales, América del Sur y Australia estaban unidas al sur del supercontinente de Gondwana. Esta masa continental ya había comenzado a separarse, desabrochándose para formar el océano Atlántico, pero la punta de América del Sur todavía estaba conectada con lo que hoy es la Antártida, que a su vez estaba conectada con lo que hoy es Australia (véase la Figura 21). Como los marsupiales tuvieron que viajar por la tierra firme desde América del Sur hasta Australia, a la fuerza tuvieron que cruzar la Antártida. Así que podemos predecir que debería haber fósiles de marsupiales en la Antártida que daten de hace 30 a 40 millones de años.

Esta hipótesis era lo bastante sólida como para empujar a algunos científicos hasta la Antártida en busca de marsupiales fósiles. Y, efectivamente, los encontraron: hallaron más de una docena de especies de marsupiales (que pueden identificarse como tales por su característica dentición y sus mandíbulas) en la isla Seymour, cerca de la península Antártica. Esta área se encuentra justo en el antiguo paso libre de hielo entre América del Sur y la Antártida. Y los fósiles tienen la edad predicha: de 35 a 40 millones de años. Tras su descubrimiento en 1982, el paleontólogo polar William Zinsmeister clamó exultante: «Durante años y años hemos pensado que aquí tenía que haber marsupiales. Esto encaja con todas las suposiciones que se habían hecho sobre la Antártida. Hemos encontrado lo que esperábamos encontrar».

¿Y qué decir de los muchos casos de especies parecidas (pero no idénticas) que viven en hábitats parecidos pero en continentes distintos? El ciervo común vive en el norte de Europa, mientras que el uapití, que se le parece mucho, vive en América del Norte. Las ranas acuáticas sin lengua de la familia *Pipidae* viven en dos lugares muy distantes: el este de América del Sur y el África subtropical.

Y ya hemos comentado el caso de las semejanzas en la flora del este de Asia y el este de América del Norte. Estas observaciones *serian* desconcertantes para los evolucionistas si los continentes siempre hubieran estado en los lugares que ocupan en la actualidad.

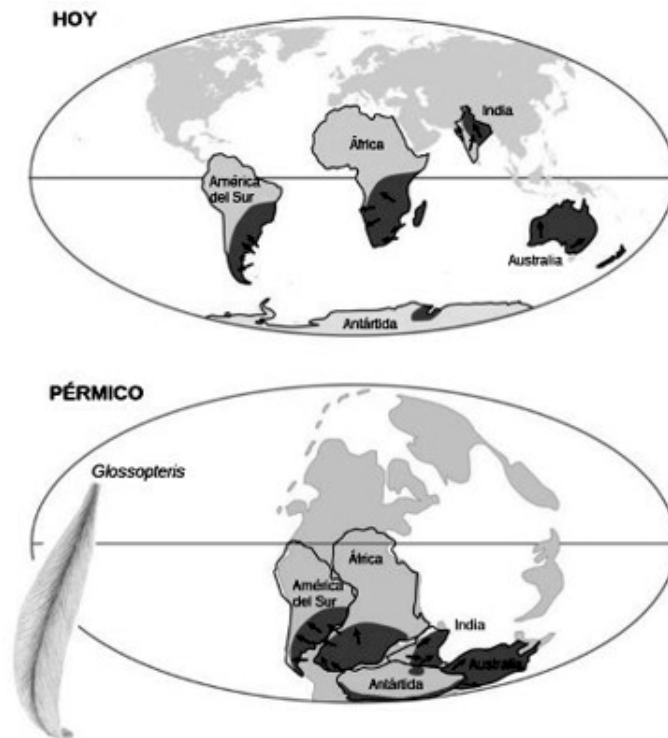


Figura 21. La deriva de los continentes explica la biogeografía evolutiva del género de árboles extintos *Glossopteris*. Arriba: la distribución actual de fósiles de *Glossopteris* (sombreado) está dividida en fragmentos distribuidos por varios continentes, lo que la hace difícil de interpretar. Las estrías que dejaron los glaciares en las rocas también resultan enigmáticas (flechas). Abajo: la distribución de *Glossopteris* cobra sentido durante el período Pérmico, cuando las tierras emergidas estaban unidas formando un supercontinente: las especies rodeaban el polo sur en una franja de clima templado. También las estrías glaciares pueden interpretarse ahora, pues todas apuntan hacia fuera del polo sur del Pérmico. Ilustraciones de Kalliopi Monoyios, distribución de fósiles a partir de McLoughlin (2001).

Hubiera sido imposible entonces la dispersión de una magnolia de China a Alabama, de unas ranas de agua dulce entre África y América del Sur o que el ciervo ancestral hubiera pasado de Europa a América del Norte. Pero hoy sabemos perfectamente cómo se produjo esta dispersión: gracias a la existencia de antiguas conexiones de tierra firme entre los continentes. (Muy distintas de los enormes puentes de tierra que habían imaginado los primeros biogeógrafos.) Asia y América del Norte estuvieron en otro tiempo conectados por el puente de Beringia, a través del cual colonizaron este continente plantas y animales, incluidos los humanos. Y América del Sur y África fueron en otro tiempo parte de Gondwana.

Cuando los organismos se dispersan y colonizan con éxito una nueva área, con frecuencia evolucionan. Y esto nos lleva a otra predicción que ya enunciamos en el capítulo 1. Si se ha producido evolución, las especies que viven en un área determinada deberían descender de especies anteriores que habían habitado en el mismo lugar. Así que si excavamos en lechos poco profundos de las rocas de ese lugar, deberíamos encontrar fósiles que se asemejen a los organismos que pisan ese suelo en la actualidad.

Y así es. ¿Dónde encontramos los fósiles de canguro que más se parecen a los actuales? En Australia. Está también el caso de los armadillos del Nuevo Mundo. Los armadillos son unos mamíferos únicos por llevar por armadura (de ahí el nombre) un caparazón duro. Viven en todo el continente americano. ¿Dónde encontramos los fósiles que más se les parecen? En América, que fue el hogar de los *gliptodontes*, unos mamíferos herbívoros con caparazón y aspecto de armadillo recrecido. Algunos alcanzaban el tamaño de un escarabajo de Volkswagen, con una tonelada de peso, una armadura de unos cinco centímetros de grosor y unas bolas espinosas en la cola que blandían como mazas. El creacionismo lo tiene difícil para explicar todas estas observaciones: para hacerlo, tendría que proponer que en todo el mundo se ha ido produciendo un número inacabable de extinciones y creaciones sucesivas, y que en cada conjunto de nuevas creaciones, las especies se parecían a las que habían vivido anteriormente en el mismo lugar. Eso queda muy lejos del arca de Noé.

Que los ancestros fósiles y sus descendientes aparezcan en los mismos lugares conduce a una de las predicciones más famosas de la historia de la biología

evolutiva: la hipótesis planteada por Darwin en *El origen del hombre* (1871) de que los humanos evolucionaron en África:

Es natural preguntarse entonces cuál fue el lugar de nacimiento del hombre en aquel estadio de la descendencia en el que nuestros progenitores divergieron de los catarrinos [los monos y simios del Viejo Mundo]. El hecho de que pertenecieran a este grupo muestra con claridad que habitaban en el Viejo Mundo; pero no en Australia ni en ninguna isla oceánica, como podemos inferir de las leyes de la distribución geográfica. En cada gran región del mundo los mamíferos existentes están estrechamente emparentados con las especies extintas de la misma región. Por consiguiente, es probable que África estuviera habitada con anterioridad por simios hoy extintos afines al gorila y al chimpancé; y como estas dos especies son en la actualidad las más parecidas al hombre, es algo más probable que nuestros primeros progenitores vivieran en el continente africano que en ningún otro lugar.

Cuando Darwin hizo esta predicción, nadie había visto todavía ningún fósil de los primeros humanos. Como veremos en el capítulo 8, los primeros restos no se descubrieron hasta 1924 y, como era de esperar, se hallaron en África. La profusión de fósiles de transición entre los simios y los humanos descubiertos desde entonces, de los que los más antiguos han aparecido siempre en África, no deja dudas de que Darwin tenía razón.

La biogeografía no se limita a hacer predicciones; también ha resuelto algunos enigmas. He aquí uno relativo a los glaciares y los árboles. Los geólogos saben desde hace tiempo que todos los continentes y subcontinentes meridionales experimentaron un intenso período de glaciaciones durante el período Pérmico, hace unos 290 millones de años. Sabemos que es así porque, a medida que se desplazan los glaciares, las rocas y cantos que arrastran dejan unas estrías características causadas por la fricción contra la roca madre. La dirección de estas estrías nos dice hacia dónde se movían los glaciares.

El examen de las rocas del Pérmico en las tierras meridionales revela unas estrías muy extrañas. Los glaciares parecen haberse originado en áreas como África central, que en la actualidad son muy cálidas y, lo que resulta todavía más confuso, parecen haberse desplazado del mar al continente. (Véase la dirección de las flechas en la Figura 21.) Todo esto parece imposible: los glaciares sólo se forman en climas constantemente fríos y sobre la tierra firme, donde las continuas nevadas se van compactando y formando hielo que comienza a moverse bajo su propio peso. ¿Cómo se explican entonces los dibujos de aspecto caprichoso que forman las estrías de los glaciares y su aparente origen en el mar?

Hay otra pieza más en este rompecabezas, pero no relacionada con la distribución de las estrías sino de unas especies de árboles, las del género *Glossopteris*. Estas coníferas tenían hojas en forma de lengua en lugar de agujas (*glossa* significa «lengua» en griego). *Glossopteris* fue una de las plantas que dominaron la flora del Pérmico. Por varias razones, los botánicos creen que eran árboles de hoja caduca, que dejaban caer cada otoño para producir las de nuevo a la primavera siguiente, pues tenían anillos de crecimiento y características especializadas que indican que las hojas estaban programadas para separarse del árbol. Estos y otros rasgos sugieren que *Glossopteris* vivía en áreas templadas con inviernos fríos.

Cuando se sitúa sobre un mapa la distribución de los fósiles de *Glossopteris* en el hemisferio sur, que es la única región donde se han hallado (Figura 21), se observa un dibujo extraño formado por manchas inconexas en varios continentes. Esta distribución no puede explicarse por dispersión, pues las semillas de *Glossopteris* eran grandes y pesadas, y casi con toda seguridad no flotaban. ¿Podríamos tener aquí un caso de creación de la planta en distintos continentes? No tan rápido.

Los dos enigmas se resuelven cuando se atiende a la posición que los continentes actuales ocupaban a finales del Pérmico (Figura 21), cuando estaban unidos como piezas de un puzle formando un único continente: Gondwana. Cuando se unen las piezas, la posición de las estrías de los glaciares y la distribución de los árboles cobran sentido de inmediato. Ahora las estrías apuntan hacia afuera del centro de la Antártida, que resulta ser la parte de Gondwana que pasó por el polo sur durante el Pérmico. La nieve debió producir entonces extensos glaciares que se desplazaban alejándose de esta área y produciendo, por tanto, estrías en las direcciones

observadas. Y cuando en el mapa de Gondwana se superpone la distribución de *Glossopteris*, el dibujo que aparece deja de ser caótico: ahora las manchas están conectadas formando un anillo alrededor de los márgenes de los glaciares. Éstas son precisamente las áreas de clima fresco donde cabe encontrar árboles de hoja caduca.

Así que no fueron los árboles los que migraron de un continente a otro, cruzando grandes distancias, sino que fueron los continentes mismos los que se movieron, llevando los árboles con ellos. Estos rompecabezas cobran sentido a la luz de la evolución, mientras que el creacionismo carece de explicaciones para el dibujo de las estrías glaciales o la peculiar distribución disyunta de *Glossopteris*.

Esta historia tiene una nota triste. Cuando en 1912 se encontró el grupo de exploradores dirigidos por Robert Scott, que habían muerto congelados después de un intento fallido de convertirse en los primeros en alcanzar el polo sur (el noruego Roald Amundsen llegó un poco antes), junto a sus cuerpos se encontraron unos quince kilos de fósiles de *Glossopteris*. Pese a haber abandonado buena parte de su equipaje en un intento desesperado por mantenerse con vida, el grupo había seguido arrastrando estas pesadas rocas en trineos de mano, concedores sin duda de su valor científico. Eran los primeros especímenes de *Glossopteris* descubiertos en la Antártida.

Las pruebas de la evolución que aporta la distribución de la vida sobre los continentes son sólida, pero más aún lo es, como veremos enseguida, la que aporta la distribución de la vida en las islas.

2. Islas

Darse cuenta de que la distribución de las especies en las islas proporciona una prueba concluyente de la evolución fue una de las mayores hazañas detectivescas de la historia de la biología. También ésta se la debemos a Darwin, cuyas ideas todavía pesan mucho en el campo de la biogeografía. En el capítulo 12 de *El origen*, Darwin presenta un hecho tras otro recogidos meticulosamente durante años de observaciones y correspondencia, hasta construir su caso como un brillante abogado. Cuando enseñé a mis alumnos las pruebas de la evolución, ésta es mi clase preferida, una historia de misterio que parte de la acumulación de datos

disparos que al cabo de la hora se resuelve en un sólido argumento en favor de la evolución.

Pero antes de presentar la evidencia, necesitamos distinguir entre dos tipos de islas. El primero es el de las *islas continentales*, aquellas que en otro tiempo estuvieron conectadas al continente pero quedaron separadas de él por una subida del nivel del mar o por el movimiento de las placas continentales. A este tipo pertenecen, entre muchas otras, las islas Británicas, Japón, Sri Lanka, Tasmania y Madagascar. Algunas son muy antiguas (Madagascar se apartó de África hace unos 160 millones de años), otras mucho más jóvenes (Gran Bretaña se separó de Europa hace unos 300.000 años, probablemente a causa de la rotura catastrófica de la presa natural que contenía un gran lago situado al norte). Las *islas oceánicas*, por otro lado, son aquellas que nunca estuvieron conectadas con un continente; se alzaron desde el fondo del mar, al principio totalmente desprovistas de vida, por la erupción de volcanes o el crecimiento de arrecifes coralinos. Se incluye en este grupo a las islas de Hawái, el archipiélago de Galápagos, Santa Elena y el grupo de Juan Fernández, descrito al principio de este capítulo.

El argumento a favor de la evolución que se fundamenta en las islas comienza con la siguiente observación: en las islas oceánicas faltan muchos tipos de especies autóctonas que encontramos tanto en los continentes como en las islas continentales. Tomemos el caso de Hawái, un archipiélago tropical cuyas islas ocupan unos 17.000 kilómetros cuadrados, algo menos de la superficie del estado de Massachusetts. Aunque estas islas están bien provistas de aves, plantas e insectos autóctonos, carecen por completo de peces de agua dulce, anfibios, reptiles y mamíferos terrestres que no sean introducidos. Santa Elena, la isla de Napoleón, y el archipiélago de Juan Fernández carecen de estos mismos grupos, y tienen en cambio abundantes plantas, aves e insectos. Las islas Galápagos tienen unos pocos reptiles autóctonos (iguanas terrestres y marinas, además de las famosas tortugas gigantes), pero carecen como las otras de mamíferos, anfibios o peces de agua dulce autóctonos. Una y otra vez, en las islas oceánicas que salpican el Pacífico, el Atlántico sur y el océano Índico, se sigue la misma pauta: faltan grupos. Más aún, faltan siempre los *mismos* grupos.

A primera vista, estas ausencias resultan extrañas. En la más pequeña parcela de territorio de un continente o isla continental de la región tropical, por ejemplo en Perú, Nueva Guinea o Japón, se encuentran indefectiblemente abundantes especies autóctonas de peces, anfibios, reptiles y mamíferos.

Tal como observó Darwin, esta disparidad es difícil de explicar bajo un prisma creacionista: «Quien admita la doctrina de la creación separada para cada especie, tendrá que admitir que para las islas oceánicas no fue creado un número suficiente de plantas y animales bien adaptados». Pero ¿cómo sabemos que los mamíferos, anfibios, peces de agua dulce y reptiles son realmente *adecuados* para las islas oceánicas? A lo mejor el creador no las puso porque en ellas no podrían desarrollarse. Una respuesta obvia es que las islas *continentales* sí tienen esos animales, y ¿por qué habría de poner el creador tipos distintos de animales en las islas dependiendo de si son oceánicas o continentales? Cómo se formó la isla no debería importar. Pero Darwin acaba la frase antes citada con una respuesta aún mejor: «... pues el hombre involuntariamente las ha poblado de modo mucho más completo y perfecto que lo hizo la naturaleza».

Dicho de otro modo, los mamíferos, los anfibios, los peces de agua dulce y los reptiles a menudo se las arreglan muy bien en las islas oceánicas donde el hombre las ha introducido. De hecho, es frecuente que dominen a las especies autóctonas, barriéndolas en algunos casos. Los cerdos y cabras introducidos en Hawái han hecho pasto de las plantas nativas. Las ratas y las mangostas introducidas han destruido o puesto en peligro de extinción a muchas de las espectaculares aves de Hawái. El sapo de la caña, un enorme anfibio venenoso nativo de la América tropical, fue introducido en Hawái en 1932 para controlar los escarabajos de la caña de azúcar. En la actualidad se han convertido en una plaga: se reproducen prolíficamente y matan a los gatos y perros que los toman por alimento. Las islas Galápagos no tienen anfibios autóctonos, pero la ranita arbórea ecuatoriana, introducida en 1998, se ha establecido en tres de las islas. En Sao Tomé, una isla volcánica situada frente a la costa occidental de África donde capturo moscas de la fruta para mi propia investigación, se han introducido cobras negras (quizá de manera accidental) desde el continente africano, y les va tan bien en la isla que nos hemos visto obligados a dejar de trabajar en determinadas áreas donde las cobras

son tan numerosas que en un solo día nos podríamos encontrar con varias de estas serpientes mortales y agresivas. Los mamíferos terrestres también pueden vivir bien en las islas: las cabras introducidas en Más a Tierra ayudaron a Alexander Selkirk a sobrevivir, y también viven muy bien en Santa Elena. Dondequiera que se vaya, la historia es la misma: los humanos introducen especies en islas oceánicas donde antes no existían, y estas especies desplazan o destruyen las formas nativas. Ahí queda el argumento de que las islas oceánicas son de algún modo inadecuadas para mamíferos, anfibios, reptiles y peces.

El siguiente paso del argumento es el siguiente: aunque las islas oceánicas carecen de muchas clases básicas de animales, en las que se encuentran, lo hacen a menudo con una profusión de especies semejantes. Veamos de nuevo el caso de las Galápagos. En sus trece islas hay un total de veintiocho especies de aves que no se encuentran en ningún otro lugar. Y de estas veintiocho, catorce pertenecen a un mismo grupo de aves muy estrechamente emparentadas: los famosos pinzones de las Galápagos. Ningún continente o isla continental tiene una avifauna tan claramente dominada por pinzones. Pero pese a los caracteres que comparten como tales, los pinzones de las Galápagos son ecológicamente bastante diversos, con distintas especies especializadas en alimentos tan diferentes como insectos, semillas y huevos de otras especies. El «pinzón carpintero» es una de esas raras especies que utilizan herramientas, en su caso una espina de cactus o una ramita para sacar los insectos de los árboles. Los pinzones carpinteros desempeñan el papel ecológico de los pájaros carpinteros, de los que no hay ninguna especie en las islas Galápagos. Y hay incluso un «pinzón vampiro» que picotea los cuartos traseros de las aves marinas para luego lamer la sangre.

Hawái posee también su propia radiación de aves, más espectacular si cabe: la de los trepadores mieleros hawaianos. Cuando los polinesios llegaron a Hawái hace unos mil quinientos años, encontraron alrededor de 140 especies de aves autóctonas (lo sabemos gracias a los estudios de «subfósiles» de aves, es decir, de huesos preservados en antiguos vertederos de desechos y en tubos de lava). Unas sesenta de estas especies, casi la mitad de la avifauna del archipiélago, eran trepadores mieleros, y todos habían descendido de un única especie ancestral de pinzón que habían llegado a la isla hace unos 4 millones de años. Por desgracia, en

la actualidad sólo quedan veinte especies de trepadores hawaianos, todas ellas amenazadas. El resto fue extinguido por la caza, la pérdida de hábitat y los depredadores introducidos por el hombre, como las ratas y las mangostas. Pero incluso los pocos trepadores que quedan exhiben una fabulosa diversidad de roles ecológicos, tal como muestra la Figura 22. El pico de un ave nos dice mucho sobre su dieta.

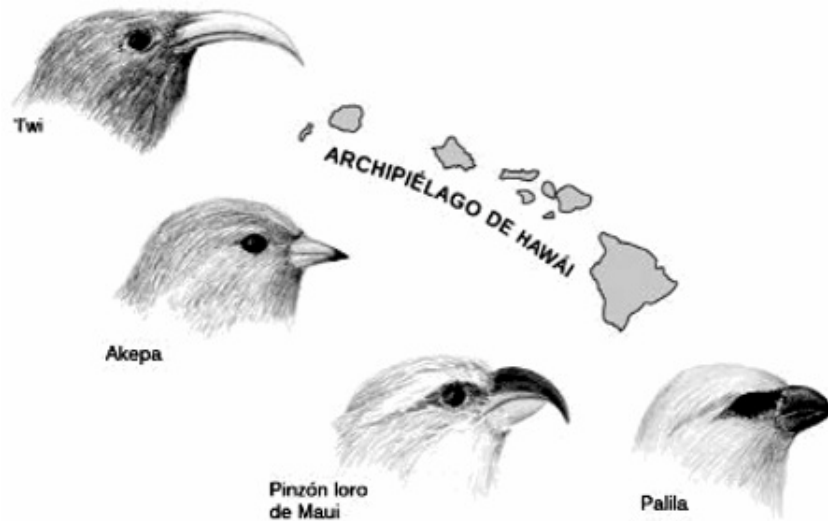


Figura 22. Una radiación adaptativa: algunas especies emparentadas de trepadores mieleros hawaianos que evolucionaron después de que su antepasado común, un ave con aspecto de pinzón, colonizara las islas. Cada pinzón tiene un pico que le permite explotar una fuente de alimento distinta. El fino pico del 'i'wi lo ayuda a chupar el néctar de largas flores tubulares, el akepa tiene un pico ligeramente cruzado con el que puede abrir los brotes y los capullos en busca de insectos y arañas, el pinzón loro de Maui tiene un pico robusto para levantar la corteza de los árboles y partir los tallos y ramitas en busca de larvas de escarabajos, y el pico corto pero fuerte del palila le permite abrir vainas para extraer las semillas.

Ilustraciones de Kalliopi Monoyios.

Algunas especies tienen picos curvos para chupar el néctar de las flores, otras tienen picos robustos, como los de los loros, para partir semillas duras o estrujar tallos, otras tienen picos curvados para picotear los insectos entre el follaje, y aun otras tienen picos ganchudos para extraer insectos de los troncos de los árboles, en

el papel que habitualmente desempeñan los pájaros carpinteros. Como en las Galápagos, vemos un grupo que se encuentra representado en exceso, con especies que ocupan los nichos que en los continentes y las islas continentales ocupan especies muy diferentes.

Las islas oceánicas también albergan radiaciones de plantas e insectos. Santa Elena carece de muchos grupos de insectos, pero da cobijo a docenas de especies de escarabajos pequeños y no voladores, sobre todo gorgojos de la madera. En Hawái, las moscas de la fruta del género *Drosophila*, que es el grupo que estudio, manifiestan una diversidad exuberante. Aunque las islas de Hawái representan tan sólo el 0,004 por 100 de la superficie de las tierras emergidas del planeta, contienen casi la mitad de las dos mil especies de *Drosophila* del mundo. También son ejemplos las notables radiaciones de plantas de la familia de los girasoles en el archipiélago de Juan Fernández y en Santa Elena, algunas de las cuales se han convertido en pequeños árboles leñosos. Sólo en las islas oceánicas pueden las pequeñas plantas con flor, libres de la competencia de arbustos y árboles mayores, evolucionar ellas mismas hasta convertirse en árboles.

Hasta aquí hemos pasado revista a dos conjuntos de hechos observados en las islas oceánicas: carecen de muchos grupos de especies que viven en los continentes y las islas continentales, y sin embargo los grupos que sí se encuentran en las islas oceánicas están repletos de especies similares. Juntas, estas dos observaciones muestran que, en comparación con otras áreas del mundo, la vida en las islas oceánicas está desequilibrada. Cualquier teoría biogeográfica que merezca ese nombre tiene que dar cuenta de este contraste.

Pero hay algo más. El siguiente cuadro presenta una lista de los principales grupos que suelen ser autóctonos de las islas oceánicas y de los que suelen faltar (Juan Fernández es uno de los grupos de islas que se ajustan a esta lista):

Autóctonas	Faltantes
Plantas	Mamíferos terrestres
Aves	Reptiles
Insectos y otros artrópodos (por ejemplo, arañas)	Anfibios
	Peces de agua dulce

¿Cuál es la diferencia entre las dos columnas? Basta con pensar un poco para ver la respuesta. Las especies de la primera columna pueden colonizar las islas oceánicas porque pueden dispersarse a grandes distancias; las especies de la segunda columna carecen de esa capacidad. Las aves pueden volar a gran distancia sobre el mar, llevando con ellas no sólo sus propios huevos, sino también las semillas de plantas que hayan comido (que pueden germinar en las propias deyecciones), parásitos en las plumas y pequeños organismos en el limo pegado a sus patas. Las plantas pueden llegar a las islas en forma de semillas, flotando por el mar a enormes distancias. Las semillas con pelos ganchudos o cubiertas pegajosas pueden viajar hasta las islas en las plumas de las aves. Las ligeras esporas de los helechos, los hongos y los musgos pueden desplazarse a mucha distancia arrastrados por el viento. Los insectos también pueden volar a las islas o dejarse arrastrar por el viento.

En cambio, los animales de la segunda columna tienen grandes dificultades para cruzar las grandes extensiones oceánicas. Los mamíferos terrestres y los reptiles son pesados y no pueden nadar muy lejos. Y la mayoría de los anfibios y peces de agua dulce sencillamente no pueden sobrevivir en el agua salada.

Así que los grupos de especies que hallamos en las islas oceánicas son precisamente aquellos que pueden llegar hasta ellas cruzando el mar desde tierras muy lejanas. Pero ¿qué pruebas tenemos de que lo hacen? Cualquier aficionado a las aves nos hablará de «visitantes» ocasionales encontrados a miles de kilómetros de su hábitat normal, víctimas de los vientos o de errores de orientación. Algunas aves han llegado incluso a establecer colonias en islas oceánicas en tiempos históricos. El calamoncillo americano, que durante mucho tiempo había sido un visitante accidental de la isla de Tristán da Cunha, en el Atlántico sur, por fin comenzó a anidar allí durante la década de 1950.

El propio Darwin realizó algunos experimentos sencillos pero elegantes para mostrar que las semillas de algunas especies de plantas conservaban la capacidad de germinar después de pasar mucho tiempo inmersas en agua del mar. Por otro lado, se han encontrado semillas de las Indias Occidentales en las lejanas costas de Escocia, adonde llegaron sin duda arrastradas por la corriente del golfo, y también

se han encontrado «semillas de deriva» originarias de continentes o de otras islas en las costas de las islas del Pacífico sur. Las aves enjauladas pueden retener semillas de plantas en su sistema digestivo durante una semana o más, lo que demuestra la posibilidad de que las transporten a largas distancias. Y se ha conseguido muchas veces capturar insectos suspendidos en el aire utilizando trampas llevadas por aviones o barcos en lugares alejados de la tierra. Entre las especies recogidas se cuentan langostas, polillas, mariposas, moscas, pulgones y escarabajos. Ya en 1933, durante su viaje a través del Atlántico, Charles Lindbergh expuso al aire portaobjetos de microscopio en los que capturó numerosos microorganismos y partes de insectos. Muchas arañas se dispersan durante los estadios juveniles dejándose arrastrar por el aire gracias a unos «paracaídas» que elaboran con su seda; estos vagabundos se han encontrado a cientos de kilómetros de la tierra.

Los animales y las plantas también pueden viajar hasta las islas encima de «balsas» formadas por troncos y masas de vegetación que flotan a la deriva desde los continentes, por lo general desde las desembocaduras de los ríos. En 1995 una de estas grandes balsas, empujada quizá por un huracán, depositó su carga de quince iguanas en la isla caribeña de Anguilla, donde no habían existido hasta entonces, desde un lugar de origen situado a más de trescientos kilómetros de distancia. En Hawái se han encontrado troncos de abeto de Douglas, de América del Norte, y hasta Tasmania han llegado troncos originarios de América del Sur. Estas balsas explican la ocasional presencia de reptiles en islas oceánicas, como las iguanas y tortugas de las Galápagos.

Además, cuando se analiza qué tipo de insectos y plantas son autóctonos de las islas oceánicas, se ve que proceden de los grupos que son buenos colonizadores. La mayoría de los insectos son pequeños, pues son precisamente los que pueden ser llevados con facilidad por el viento. Comparados con las plantas herbáceas, los árboles son relativamente raros en las islas oceánicas, casi con certeza porque muchos árboles producen semillas pesadas que ni flotan ni son comidas por las aves. (Una excepción notable es el cocotero, de frutos grandes que flotan, una palmera que se encuentra en casi todas las islas de los océanos Pacífico e Índico.) De hecho, la rareza relativa de árboles explica por qué muchas plantas que en los

continentes tienen porte herbáceo, en las islas han evolucionado hacia formas arbóreas.

Los mamíferos terrestres no son buenos colonizadores, y por eso faltan en las islas oceánicas. Pero no faltan *todos* los mamíferos. Esto nos lleva a comentar dos excepciones que confirman la regla. La primera fue observada ya por Darwin:

Aun cuando los mamíferos terrestres no existan en las islas oceánicas, los mamíferos aéreos existen en casi todas las islas. Nueva Zelanda posee dos murciélagos que no se encuentran en ninguna otra parte del mundo; la isla de Norfolk, el archipiélago de Viti, las islas Bonin, los archipiélagos de las Carolinas y de las Marianas, la isla de Mauricio poseen todas sus murciélagos peculiares. ¿Por qué la supuesta fuerza creadora —podría preguntarse— ha producido murciélagos y no otros mamíferos en las islas alejadas? Dentro de mi teoría esta pregunta puede contestarse fácilmente, pues ningún mamífero terrestre puede ser transportado a través de un gran espacio de mar; pero los murciélagos pueden volar y atravesarlo.

Y también hay mamíferos *acuáticos* en las islas. Hawái tiene uno, la foca monje de Hawái, que es endémica, y las islas de Juan Fernández tienen un lobo marino autóctono. Si los mamíferos autóctonos de las islas oceánicas no fueron creados, sino que descienden de ancestros colonizadores, cabe predecir que esos ancestros debían poder volar o nadar.

Es evidente que la dispersión a gran distancia de una especie determinada hasta una isla lejana no puede ser un evento frecuente. La probabilidad de que un insecto o un ave pueda no ya atravesar grandes extensiones de océano hasta aterrizar en una isla, sino establecer una población reproductora una vez allí (lo cual requiere que o bien llegue una hembra fecundada o al menos dos individuos de sexo opuesto), debe de ser muy reducida. Si la dispersión fuese más frecuente, la vida en las islas oceánicas se parecería bastante a la de los continentes y las islas continentales. No obstante, la mayoría de las islas oceánicas tienen edades que se miden en millones de años, tiempo suficiente para que se produzca alguna

colonización. Como bien señalaba el zoólogo George Gaylord Simpson: «Todo evento que no sea absolutamente imposible... se hace probable si transcurre el tiempo suficiente». Veamos un caso hipotético. Supongamos que cierta especie sólo tiene una oportunidad en un millón de colonizar una isla en un año dado. Es fácil ver que después de un millón de años, hay una elevada probabilidad de que la isla haya sido colonizada al menos una vez: un 63 por 100, para ser precisos.²⁴

Una última observación pone el broche a la cadena lógica que asegura el caso a favor de la evolución en las islas. Es ésta: con pocas excepciones, los animales y plantas de las islas oceánicas se parecen más que a otras a las especies que se encuentran en las tierras continentales más cercanas. Así pasa, por ejemplo, en las islas Galápagos, cuyas especies se parecen a las de la costa occidental de América del Sur. La similitud no puede explicarse con el argumento de que las islas y América del Sur tengan hábitats parecidos para unas especies creadas por un acto divino, porque las Galápagos son secas, volcánicas y sin árboles, muy distintas de los exuberantes trópicos que predominan en la costa americana. Darwin se muestra especialmente elocuente a este respecto:

El naturalista, al contemplar los habitantes de estas islas volcánicas del Pacífico, distantes del continente varios centenares de millas, tiene la sensación de que se encuentra en tierra americana. ¿Por qué ha de ser así? ¿Por qué las especies que se supone que han sido creadas en el archipiélago de los Galápagos y en ninguna otra parte han de llevar tan visible el sello de su afinidad con las creadas en América? Nada hay allí, ni en las condiciones de vida, ni en la naturaleza geológica de las islas, ni en su altitud o clima, ni en las proporciones en que están asociadas mutuamente las diferentes clases, que se asemeje mucho a las condiciones de la costa de América del Sur; en realidad, hay una diferencia considerable por todos estos conceptos... Hechos como éstos no admiten explicación de ninguna clase dentro de la opinión corriente de las creaciones independientes; mientras que, según la opinión que aquí se defiende, es evidente que las islas de los Galápagos estarían en buenas

²⁴ $1 - (999.999/1.000.000)^{1000000}$, o sea, 1 menos la probabilidad de que no colonice la isla ni una sola vez en un millón de años. (N. del t.)

condiciones para recibir colonos de América, ya por medios ocasionales de transporte, ya —aun cuando yo no creo en esta teoría— por antigua unión con el continente ... estos colonos estarían sujetos a modificación, delatando todavía el principio de la herencia de su primitivo lugar de origen.

Lo que es cierto de las Galápagos es cierto también de otras islas oceánicas. Los parientes más cercanos de las plantas y animales endémicos de Juan Fernández provienen de los bosques templados del sur del continente americano, el continente más cercano. La mayoría de las especies de Hawái son similares (no idénticas) a las de las regiones más cercanas, la indopacífica (Indonesia, Nueva Guinea, Fiji, Samoa y Tahití) y América. Ahora bien, si se tiene en cuenta los caprichos de los vientos y la dirección de las corrientes oceánicas, no cabe esperar que *todos* los colonizadores de las islas provengan de la fuente más cercana. El 4 por 100 de las especies vegetales de Hawái, por ejemplo, tienen sus parientes más cercanos en Siberia o en Alaska. Aun así, la similitud de las especies de las islas con las de los continentes más cercanos exige una explicación.

En resumen, las islas oceánicas poseen características que las distinguen de los continentes y de las islas continentales. Las islas oceánicas tienen biotas poco equilibradas, en las que faltan algunos de los grandes grupos de organismos, y además faltan los mismos grupos en las distintas islas. Pero los tipos de organismos que *sí* se encuentran en ellas a menudo comprenden muchas especies parecidas, una *radiación*, y son los tipos de especies, como las aves y los insectos, que pueden dispersarse más fácilmente atravesando grandes extensiones del océano. Además, las especies más parecidas a las que habitan en las islas oceánicas por lo general se encuentran en las tierras continentales más cercanas, aunque en ellas los hábitats sean distintos.

¿Cómo encajan todas estas observaciones? Cobran sentido a la luz de una simple explicación evolutiva: los habitantes de las islas oceánicas descienden de especies anteriores que colonizaron las islas, por lo general procedentes de continentes cercanos, en raros eventos de dispersión a larga distancia. Una vez allí, los colonos accidentales lograron formar muchas especies porque las islas oceánicas ofrecen

muchos hábitats vacíos en los que faltan competidores y depredadores. Esto explica por qué la especiación y la selección natural se desboca en las islas, produciendo «radiaciones adaptativas» como la de los trepadores mieleros hawaianos. Todo encaja si se añade la dispersión ocasional, que sabemos que se produce, a los procesos darwinistas de selección, evolución, ascendencia común y especiación. En suma, las islas oceánicas demuestran todos los principios de la teoría de la evolución.

Es importante recordar que las islas continentales no suelen conformarse a estas pautas (veremos una excepción en un segundo), pues comparten especies con los continentes a los que en otro tiempo pertenecían. Las plantas y animales de Gran Bretaña, por ejemplo, forman un ecosistema mucho más equilibrado, con especies casi siempre idénticas a las de Europa continental. A diferencia de las islas oceánicas, las continentales se desgajaron con la mayoría de sus especies incorporadas.

Intentemos pensar ahora en una teoría que explique las pautas que hemos discutido apelando a actos especiales de creación de las especies de las islas oceánicas y continentales. ¿Por qué un creador habría de dejar a los anfibios, los mamíferos, los peces y los reptiles fuera de las islas oceánicas pero no de las continentales? ¿Por qué produjo un creador radiaciones de especies similares en las islas oceánicas, pero no en las continentales? ¿Y por qué las especies de las islas continentales se crearon para que se parecieran a las del continente más cercano?

No hay buenas respuestas a no ser que se suponga que el propósito del creador era hacer que *pareciera* que las especies habían evolucionado en islas. Nadie está dispuesto a abrazar esta respuesta, lo que explica que los creacionistas simplemente rehúyan la biogeografía de las islas.

Podemos enunciar ahora una última predicción. Las islas continentales *muy antiguas*, las que se han separado del continente hace millones de años, deberían presentar pautas evolutivas intermedias entre las de las islas continentales jóvenes y las islas oceánicas. Las islas continentales antiguas, como Madagascar o Nueva Zelanda, que se separaron de sus continentes hace 160 millones y 85 millones de años, respectivamente, quedaron aisladas antes de que hubieran evolucionado muchos grupos de primates y plantas modernas. Una vez estas islas se apartaron

del continente, algunos de sus nichos ecológicos permanecieron desocupados. Esto abrió las puertas a que especies que evolucionaron más tarde lograsen colonizarlas con éxito y establecerse. Podemos predecir, por consiguiente, que estas viejas islas continentales deberían contener una flora y una fauna *algo* desequilibrada, con algunas de las peculiaridades biogeográficas de las islas oceánicas verdaderas.

Y, en efecto, eso es lo que encontramos. Madagascar es famosa por sus inusuales flora y fauna, que incluyen muchas plantas autóctonas y, por supuesto, sus lémures, los primates más primitivos, que sólo viven allí y cuyos ancestros, después de llegar a Madagascar hace unos 60 millones de años, experimentaron una radiación que dio origen a más de setenta y cinco especies endémicas. Nueva Zelanda también tiene muchas especies propias, de las que son especialmente célebres las aves no voladoras: el moa gigante, un monstruo de cuatro metros de altura que fue cazado hasta su extinción hacia 1500; el kiwi, y una especie de loro grande y no volador, el kakapo. Nueva Zelanda también muestra algo del «desequilibrio» de las islas oceánicas: sólo tiene unos pocos reptiles endémicos, sólo una especie de anfibio y dos mamíferos autóctonos, ambos murciélagos (aunque recientemente se ha hallado un pequeño mamífero fósil). También allí se produjo una radiación: hubo once especies de moa, todas extintas en la actualidad. Y, al igual que las islas oceánicas, las especies de Madagascar y Nueva Zelanda están emparentadas con las que se encuentran en los continentes más cercanos: África y Australia, respectivamente.

3. Epílogo

La principal lección de la biogeografía es que sólo la evolución puede explicar la diversidad de la vida en los continentes y las islas. Pero hay otra lección: la distribución de la vida en la Tierra refleja una mezcla de azar y necesidad. Azar, porque la dispersión de animales y plantas depende de los impredecibles caprichos de los vientos, las corrientes y la oportunidad de colonizar. Si a las Galápagos o a Hawái no hubieran llegado los primeros pinzones, quizá hoy veríamos en estas islas aves muy distintas. Si a Madagascar no hubiera llegado un animal parecido a los lémures, la isla (y probablemente la Tierra) no tendría hoy lémures. El tiempo y el azar bastan para explicar quién acaba náufrago en una isla, en lo que podríamos

llamar «efecto Robinson Crusoe». Pero también está la necesidad. La teoría de la evolución predice que muchas de las plantas y animales que arriban a unos hábitats nuevos y desocupados evolucionarán y crecerán en ellos, formando nuevas especies que ocuparán nichos ecológicos. Y que normalmente tendrán sus parientes más cercanos en la isla o continente más cercano. Esto es lo que vemos una y otra vez. No puede entenderse la evolución si no se comprende su interacción única entre el azar y la necesidad, entre la oportunidad y la ley, una interacción que, como veremos en el siguiente capítulo, reviste una importancia crucial para entender la idea de la selección natural.

Pero las lecciones de la biogeografía van más allá, adentrándose en el dominio de la conservación biológica. Las plantas y animales de las islas se han adaptado a sus entornos aislados de otras especies que se encuentran en todos lados, sus competidores, depredadores y parásitos potenciales. Como las especies de las islas no experimentan la diversidad de la vida que se encuentra en los continentes, interaccionar con otros es algo que no se les da muy bien. Por eso los ecosistemas de las islas son frágiles, asolados con facilidad por especies foráneas que pueden destruir hábitats y acabar con especies. La peor es la humana, que no sólo tala los árboles y caza, sino que además trae consigo todo un séquito de destructivas chumberas, ovejas, cabras, ratas y sapos. Muchas de las especies únicas de las islas oceánicas ya se han extinguido, víctimas de las actividades humanas, y lamentablemente podemos decir con seguridad que muchas más desaparecerán en un futuro cercano. Durante nuestra vida quizá veamos al último de los trepadores mieleros de Hawái, o la extinción de los kakapos y kiwis de Nueva Zelanda, la reducción catastrófica de los lémures y la pérdida de muchas especies raras de plantas, quizá menos carismáticas, pero no por ello menos interesantes. Cada especie representa millones de años de evolución y, una vez desaparecida, nunca más podrá volver. Y cada una es un libro que contiene una historia única sobre el pasado. Perder cualquiera de ellas es perder una parte de la historia de la vida.

Capítulo 5

El motor de la evolución



¿Qué, si no los colmillos del lobo, talló tan finas las rápidas y ligeras patas del antílope?

¿Qué, si no el miedo, dio alas a las aves, qué si no el hambre engarzó tales ojos en la cabeza del gran azor?

ROBINSON JEFFERS, «*The Bloody Sire*»

Contenido:

1. *La evolución sin selección*
2. *Cría de plantas y animales*
3. *La evolución en el tubo de ensayo*
4. *Resistencia a fármacos y venenos*
5. *La selección en la naturaleza*
6. *¿Puede la selección producir complejidad?*

Uno de los prodigios de la evolución es el avispón gigante de Asia, una avispa depredadora especialmente común en Japón. Se hace difícil imaginar un insecto más aterrador. Este avispón, el más grande del mundo, es tan largo como un pulgar, y tiene sus cinco centímetros de cuerpo adornados con amenazadoras franjas negras y amarillas. Está armado con unas terroríficas mandíbulas que utiliza para agarrar y matar a los insectos que depreda, y un aguijón de más de medio centímetro que resulta fatal para varias docenas de asiáticos cada año. Y con una envergadura alar de más de siete centímetros, puede volar a más de cuarenta kilómetros por hora (mucho más rápido de lo que podemos correr), y recorrer hasta ciento cincuenta kilómetros en un solo día.

Este avispon no sólo es feroz: es voraz. Sus jóvenes larvas son unas gordas e insaciables máquinas de comer que de manera insistente golpean la cabeza contra la colmena para anunciar su hambre de carne. Para satisfacer sus incansables demandas de alimento, los avispones adultos saquean los nidos de las avispas y abejas sociales.

Una de las principales víctimas del avispon es la abeja melífera europea, que aquí es un insecto introducido. El ataque a una colmena de abejas acaba en una despiadada matanza que tiene pocos paralelos en la naturaleza. Comienza cuando un solitario avispon explorador encuentra una colmena. Con su abdomen, el explorador marca el sino del nido colocando una gota de feromona junto a la entrada de la colonia de abejas. Alertados por esta marca, los compañeros de nido del explorador descienden sobre el lugar, un grupo de veinte o treinta avispones contra una colonia de hasta treinta mil abejas.

Pero no se produce una verdadera contienda. Los avispones entran en la colmena y, blandiendo sus mandíbulas, decapitan las abejas una por una. Cada avispon hace rodar cabezas a razón de cuarenta por minuto: en pocas horas, la batalla ha finalizado, todas las abejas están muertas, y esparcidos por la colmena yacen los fragmentos de sus cuerpos. Los avispones se dedican entonces a aprovisionar su despensa. Durante la siguiente semana, saquean sistemáticamente el nido, comiendo la miel y transportando las inanes larvas de las abejas hasta su nido, donde las depositan en las voraces e insaciables bocas de sus propias larvas.

Ésta es la «naturaleza roja de colmillos y garras» que había descrito el poeta Tennyson.²⁵ Los avispones son unas terroríficas máquinas de matar, y ante ellas las abejas introducidas están indefensas. Pero hay abejas que *sí* pueden rechazar el ataque del avispon gigante: las abejas melíferas autóctonas de Japón. Su defensa es asombrosa, otro prodigio de comportamiento adaptativo. Cuando un avispon explorador llega a su colmena, las abejas situadas cerca de la entrada se apresuran a entrar en la colmena, donde arengan a las armas a sus compañeras de nido al

²⁵ Este verso, sin duda el más célebre de Tennyson, procede de su poema «In Memoriam A. H. H.» (1850):

[Man,] Who trusted God was love indeed

And love Creation's final law—

Tho' Nature, red in tooth and claw

With ravine, shrieked against his creed.

[[El hombre,] que en verdad creyó que Dios era amor / y el amor la ley última de la creación / —aunque la Naturaleza, roja de colmillos y garras / de rapacidad, brama contra su creencia—.

tiempo que atraen al avispón hacia el interior. Entre tanto, cientos de abejas trabajadoras se congregan en el interior de la entrada. Una vez el avispón está dentro, es atacado en grupo por las abejas, que lo cubren en una apretada bola. Haciendo vibrar sus abdómenes, las abejas hacen que ascienda con rapidez la temperatura en el interior de la bola hasta alcanzar unos 47 grados centígrados. Las abejas pueden sobrevivir a esta temperatura, pero el avispón no. En cuestión de veinte minutos, el avispón explorador queda *cocido hasta la muerte* y, la mayoría de las veces, la colmena queda a salvo. No se me ocurre ningún otro caso (salvo por la Inquisición española) de unos animales que maten a sus enemigos quemándolos.²⁶ Hay en esta tortuosa historia varias lecciones sobre la evolución. La más evidente es que el avispón está maravillosamente adaptado para matar, como si hubiera sido *diseñado* para las matanzas. Además, son muchos los caracteres que trabajan de manera coordinada para convertir a la avispa en una máquina de matar: la forma corporal (cuerpo de gran tamaño, aguijón, mandíbulas mortíferas, grandes alas), caracteres químicos (feromonas para marcar el lugar y un veneno mortal en el aguijón) y comportamiento (vuelo rápido, ataques coordinados contra las colmenas y el comportamiento larvario de gritar « ¡tengo hambre! » que incita los ataques de los avispones). Y luego está la defensa de las abejas nativas, la congregación coordinada para cocer a su enemigo, que sin duda es una respuesta evolutiva a los repetidos ataques de los avispones. (Hay que recordar que este comportamiento está codificado genéticamente en un cerebro menor que la punta de un bolígrafo.) Por otro lado, las abejas europeas recientemente introducidas están virtualmente indefensas ante los avispones. Esto es exactamente lo que cabría esperar, pues estas abejas evolucionaron en un lugar donde no había grandes avispones depredadores, y por consiguiente la selección natural no las llevó a montar una defensa. Podemos predecir, no obstante, que si los avispones son unos depredadores lo bastante fuertes, las abejas europeas acabarán siendo extirpadas (salvo que sean reintroducidas) o encontrarán su propia respuesta evolutiva a los

²⁶ Puede verse un vídeo de avispones japoneses depredando abejas melíferas y siendo cocidos hasta la muerte durante la defensa de abejas japonesas en <http://www.youtube.com/watch?v=DcZCttPGyJO>. Los científicos han descubierto recientemente otra forma en que las abejas matan a los avispones: los asfixian. En Chipre, las abejas autóctonas también forman bolas alrededor de los avispones intrusos. Para respirar, las avispas expanden y contraen el abdomen, bombeando aire al interior del cuerpo a través de unos finos conductos. La apretada bola que forman las abejas impide que el avispón pueda mover el abdomen, que queda de este modo privado de aire.

avispones, que no necesariamente será la misma que hallaron las abejas autóctonas.

Algunas adaptaciones conllevan tácticas todavía más siniestras. Un ejemplo es un gusano nematodo que parasita a algunas especies de hormiga de América Central. Al ser infectada, la hormiga experimenta un cambio radical tanto en su apariencia como en su comportamiento. En primer lugar, su abdomen, normalmente negro, se torna de un rojo llamativo. La hormiga se hace entonces muy lenta y levanta su abdomen hacia el cielo como una provocativa bandera colorada. La fina unión entre el tórax y el abdomen se toma endeble. Además, una hormiga infectada no produce feromonas de alarma al ser atacada, de modo que no puede avisar a sus compañeras de nido.

Todos estos cambios están causados por los genes del gusano parásito como hábil estratagema para reproducirse. El gusano altera la apariencia y comportamiento de la hormiga para que se anuncie a las aves como si fuera una deliciosa baya, sellando su propia muerte. El abdomen rojo de la hormiga se alza para que todos los pájaros puedan verlo y confundirlo por una baya, que arrancan con facilidad gracias a que la hormiga apenas puede moverse y la unión entre el abdomen y el resto del cuerpo ha quedado debilitada. Así que las aves se hartan de comer estos abdómenes, que van llenos de huevos del gusano. Los pájaros pasan entonces los huevos a sus deyecciones, que las hormigas buscan para llevárselas al nido como alimento para sus larvas. Los huevos del gusano eclosionan dentro de la larva de hormiga y crecen. Cuando la larva de hormiga se convierte en una crisálida, los gusanos migran al abdomen de la hormiga, donde se aparean y producen más huevos. Así comienza el ciclo de nuevo.

Son las adaptaciones portentosas como éstas, la infinidad de maneras en que los parásitos controlan a sus vectores sólo para transmitir sus genes, lo que excita la mente de los evolucionistas.²⁷ La acción de la selección natural sobre un simple gusano ha hecho que logre gobernar la apariencia, el comportamiento y la estructura de su huésped, convirtiéndolo en una tentadora baya de mentira.²⁸

²⁷ En *Parasite Rex*, Carl Zimmer explica muchas otras fascinantes (y horripilantes) maneras en que han evolucionado los parásitos para manipular a sus huéspedes.

²⁸ Hay otro aspecto de esta historia que es casi igual de fascinante: las hormigas, que pasan buena parte de su tiempo en los árboles, han adquirido mediante la evolución la capacidad de planear. Cuando caen de una rama, pueden maniobrar en el aire de manera que, en lugar de caer en el hostil suelo del bosque, caigan de nuevo en la

La lista de adaptaciones como éstas es inacabable. Hay adaptaciones que hacen que un animal parezca una planta, camuflándose así entre el follaje para ocultarse a sus enemigos. Por ejemplo, algunos tetigónidos (saltamontes de antenas largas) se parecen tanto a unas hojas que incluso tienen los dibujos de los nervios y unos «puntos marchitos» que parecen agujeros en las hojas. El mimetismo es tan preciso que cuesta encontrar los insectos en una pequeña jaula llena de plantas, cuanto más en su propio entorno.

También se da lo contrario: plantas que parecen animales. Algunas especies de orquídea tienen flores que se parecen superficialmente a las abejas y las avispas, con sus falsas manchas oculares y pétalos en forma de alas. El parecido es lo bastante bueno como para engañar a muchos machos miopes, que se posan en la flor con toda la intención de aparearse. Mientras lo intentan, los sacos de polen de la orquídea se pegan a la cabeza del insecto. Cuando el frustrado insecto se marcha sin haber consumado su pasión, sin saberlo se lleva el polen a la siguiente orquídea, a la cual fecunda durante su siguiente e infructuosa «pseudocópula». La selección natural ha moldeado la orquídea hasta convertirla en un falso insecto porque los genes que mediante esta treta logran atraer polinizadores tienen mayores posibilidades de transmitirse hasta la siguiente generación. Algunas orquídeas llegan al extremo de seducir a sus polinizadores con sustancias químicas que huelen como las feromonas sexuales de las abejas.

La búsqueda de comida induce adaptaciones tan complejas como la búsqueda de pareja. El pito crestado, el pájaro carpintero más grande de América del Norte, se gana la vida barrenando los troncos de los árboles para sacar de la madera insectos como los escarabajos y las hormigas. Además de su soberbia capacidad para detectar a sus presas bajo la corteza (probablemente escuchando o sintiendo sus movimientos, no lo sabemos con certeza), el picamaderos tiene todo un conjunto de caracteres que lo ayudan a cazar y hacer agujeros. Quizá el más notable sea su lengua, larga hasta el ridículo.²⁹ La base de la lengua se une al hueso de la mandíbula, luego la lengua sube por una de las narinas, da una vuelta completa a la

seguridad del tronco. Se desconoce todavía cómo una hormiga en caída libre logra controlar la dirección de planeo, pero pueden verse videos de este peculiar comportamiento en <http://www.canopyants.com/video1.html>.

²⁹ Los creacionistas a veces citan esta lengua como ejemplo de un carácter que no puede haber evolucionado porque los estadios intermedios de su evolución supuestamente hubieran sido malas adaptaciones. Esta afirmación carece de fundamento. Para una descripción de la larga lengua y la posible vía de evolución por selección natural, véase <http://www.talkorigins.org/faqs/woodpecker/woodpecker.html>.

cabeza hasta la nuca y entra de nuevo en el pico por abajo. La mayor parte del tiempo la lengua está retraída, pero puede extenderse para penetrar profundamente en el interior de un tronco en busca de hormigas y escarabajos. Es puntiaguda y está recubierta de saliva pegajosa para facilitar la extracción de los sabrosos insectos de sus agujeros. Los pitos crestados también utilizan sus picos para excavar unas grandes cavidades donde nidifican y para tamborilear en los árboles para atraer parejas y defender su territorio.

Los pájaros carpinteros son una versión biológica de los martillos neumáticos. Esto plantea un problema: ¿cómo puede una criatura tan delicada taladrar una madera tan dura sin lastimarse? (Piénsese en la fuerza necesaria para clavar un clavo en una plancha de madera.) El cráneo del pito crestado recibe un castigo tremendo: cuando tamborilea para comunicarse, este pájaro carpintero puede golpear la madera hasta quince veces *por segundo*, y cada golpe genera una fuerza equivalente a que nosotros nos golpeáramos la cabeza contra un muro a veinticinco kilómetros por hora. Ésta es una velocidad que puede abollar un coche. Existe un auténtico peligro de que el pito dañe su cerebro, o incluso de que haga saltar los ojos fuera de sus cuencas bajo una fuerza tan extrema.

Para impedir los daños al cerebro, el cráneo del pito tiene una forma especial y huesos reforzados. El pico descansa sobre un amortiguador de cartílago, y los músculos que rodean el pico se contraen un instante antes de cada impacto para desviar la fuerza del golpe lejos del cerebro, dirigiéndola a la base reforzada del cráneo. A cada golpe, los párpados del ave se cierran para evitar que salten los ojos. Hay incluso un delicado abanico de plumas que cubren las narinas e impiden que el ave inhale serrín o astillas mientras golpea la madera. Además, el pájaro utiliza una serie de plumas rectrices (en la cola) especialmente duras para apuntalarse contra el tronco del árbol, y tiene pies con cuatro dedos en forma de X (dos hacia delante y dos hacia atrás) para agarrarse con seguridad al tronco.

Miremos donde miremos en la naturaleza, vemos animales que *parecen* estar bellamente diseñados para ajustarse a su entorno, tanto si ese entorno es el constituido por las circunstancias físicas de su vida, como la temperatura y la humedad, como de otros organismos (competidores, depredadores y presas) con los que cada organismo tiene que interactuar. No debe sorprender que los

primeros naturalistas creyeran que los animales eran el producto de un diseño celestial, que habían sido creados por Dios para realizar su función.

Darwin corrigió esta idea en *El origen*. En un solo capítulo, reemplazó varios siglos de certeza sobre el diseño divino con la idea de la selección natural, un proceso materialista y ciego que podía producir los mismos resultados. Es difícil exagerar el efecto que esta concepción tuvo no ya en la biología, sino en la concepción del mundo. Muchos todavía no se han recuperado del golpe, y la idea de la selección natural todavía incita una oposición feroz e irracional.

Pero la selección natural también planteaba cierto número de problemas a la biología. ¿Qué pruebas tenemos de que actúe en la naturaleza? ¿Puede realmente explicar las adaptaciones, incluidas las más complejas? Darwin utilizó sobre todo la analogía para defender sus ideas: el bien conocido éxito de los criadores a la hora de transformar animales y plantas en organismos adecuados como alimento, mascota u ornamento. En su época no disponía de pruebas directas de que la selección natural actuara en las poblaciones naturales. Y puesto que, tal como propuso, la selección era extraordinariamente lenta, alterando las poblaciones sólo en el curso de miles o millones de años, se hacía difícil observarla durante la vida de una persona.

Por suerte, gracias a los esfuerzos de biólogos de campo y de laboratorio, hoy disponemos de esas pruebas empíricas y en abundancia.

Hemos descubierto que la selección natural aparece por todos lados inspeccionando los individuos, eliminando a los inadecuados y promoviendo los genes de los más adecuados. Puede crear intrincadas adaptaciones, a veces en un tiempo sorprendentemente corto.

La selección natural es la parte del darwinismo que peor se entiende. Para ver cómo funciona, fijémonos primero en una adaptación sencilla: el color del pelaje de los ratones salvajes. Los ratones de color normal, los «ratones de campo» de América del Norte (*Peromyscus polionotus*), tienen el pelaje pardo y excavan sus madrigueras en suelos oscuros. Pero en las dunas de arena de la costa del golfo de México, en Florida, habita una raza de la misma especie de color claro, el llamado «ratón de playa», que tiene el pelaje casi blanco salvo por una débil banda pardusca que le recorre la espalda. Este color claro es una adaptación para camuflar al ratón

de sus depredadores, como las rapaces diurnas y nocturnas y las garzas, que cazan entre las blancas dunas. ¿Cómo sabemos que se trata de una adaptación? Un experimento sencillo (aunque algo sangriento) realizado por Donald Kaufman, de la Universidad de Kansas, demostró que los ratones sobreviven mejor cuando el color de su pelaje se parece al del suelo donde viven. Kaufman levantó unos grandes cercados en el exterior, unos con suelo de color claro y otros con suelo de color oscuro. En cada uno de estos cercados colocó un número igual de ratones de pelaje oscuro y de pelaje claro. Luego soltó en cada cercado una lechuza muy hambrienta, y regresó al cabo de un tiempo para ver qué ratones habían sobrevivido. Como era de esperar, los ratones con el pelaje más contrastado con el suelo habían sido capturados en mayor número, con lo que quedaba demostrado que los ratones camuflados sobrevivían mejor. Este experimento también explica una correlación que se observa en la naturaleza: en los suelos más oscuros habitan ratones más oscuros.

Como el color blanco sólo se encuentra en los ratones de playa, cabe suponer que evolucionaron a partir de los ratones pardos de las tierras del continente hace tan sólo unos seis mil años, cuando las islas de barrera con sus blancas dunas quedaron separadas del continente. Aquí es donde interviene la selección. Los ratones de campo varían en el color del pelaje, y entre los que invadieron las dunas, los de pelaje más claro debían de tener una mayor probabilidad de sobrevivir que los de pelaje oscuro, que los depredadores debían localizar con facilidad. Sabemos además que existe una diferencia genética entre las formas claras y las oscuras; los ratones de playa son portadores de las formas «claras» de varios genes de la pigmentación que conjuntamente les dan el pelaje claro. Los ratones de campo más oscuros llevan la alternativa «oscura» de esos mismos genes. Con el tiempo, a causa de la depredación diferencial, las formas claras debieron dejar más copias de sus genes claros (pues tenían una mayor probabilidad de sobrevivir hasta reproducirse) y, como este proceso prosiguió generación tras generación, la población de ratones de playa debió ir evolucionando de la forma oscura a la forma clara.

¿Qué es lo que ha ocurrido aquí? Sencillamente, al actuar sobre el color del pelaje, la selección natural ha ido modificando la composición genética de una población, aumentando la proporción de aquellas variantes genéticas que incrementan la

supervivencia y la reproducción (es decir, los genes del color claro). Y aunque acabo de decir que la selección natural *actúa*, la expresión no es del todo precisa. La selección no es un mecanismo que se imponga a una población desde fuera, sino un *proceso*, una descripción de cómo los genes que producen mejores adaptaciones se hacen más frecuentes con el tiempo. Cuando los biólogos dicen que la selección actúa «sobre» un carácter, sólo usan un atajo verbal para decir que un determinado carácter está experimentando un proceso. En el mismo sentido, las especies no intentan adaptarse a su entorno. Aquí no interviene ninguna voluntad, ningún esfuerzo consciente. La adaptación al medio es inevitable si una especie posee la variación genética adecuada.

Son tres los elementos implicados en la creación de una adaptación por medio de la selección natural. En primer lugar, la población inicial tiene que ser *variable*: los ratones de una población tienen que mostrar variaciones en el color del pelaje. De no ser así, el carácter no puede evolucionar. En el caso de los ratones, sabemos que esto se cumple porque los ratones del continente presentan variaciones en el color del pelaje.

En segundo lugar, alguna proporción de esa variación tiene que provenir de cambios en las formas de los genes, es decir, la variación ha de tener alguna base genética (lo que llamamos *heredabilidad*). Si no existieran diferencias genéticas entre los ratones claros y los oscuros, los claros todavía sobrevivirían mejor en las dunas, pero la diferencia en el color del pelaje no se transmitiría a la siguiente generación, y por consiguiente no se produciría ningún cambio evolutivo. Sabemos que en el caso de los ratones este requisito también se satisface. De hecho, sabemos exactamente qué dos genes tienen el mayor efecto sobre la diferencia de color del pelaje. Uno de ellos recibe el nombre de *Agouti*, el mismo gen cuyas mutaciones producen el color negro en los gatos domésticos. El otro se llama *Mc1r*, y una de sus formas mutantes en los humanos, que es especialmente frecuente en las poblaciones irlandesas, produce pecas y pelo rojo.³⁰

¿De dónde procede esta variación genética? Procede de las *mutaciones*, cambios accidentales en la secuencia de ADN que por lo general se producen por errores de copia de esta molécula durante la división celular. La variación genética que

³⁰ Mientras escribo esto ha aparecido un informe que muestra que el ADN extraído de los huesos de neandertales contiene otra forma clara del gen. Es probable, pues, que algunos neandertales fueran pelirrojos.

generan las mutaciones es abundante; a modo de ejemplo, son formas mutantes de genes lo que explica en los humanos las variaciones en el color de los ojos, el grupo sanguíneo y buena parte de la variación (en muchas especies) de la altura, el peso, la bioquímica y muchos otros caracteres.

Gracias a un gran número de experimentos de laboratorio, los científicos han llegado a la conclusión de que las mutaciones se producen de manera aleatoria: al azar. El término «aleatorio» tiene aquí un significado específico que a menudo se malinterpreta, incluso por parte de biólogos. Lo que significa es que *las mutaciones se producen con independencia de si resultarán útiles para el individuo*. Las mutaciones no son más que errores durante la replicación del ADN. En su mayoría son perjudiciales o neutrales, pero unas pocas resultan útiles. Estas pocas mutaciones útiles constituyen la materia prima de la evolución. Pero no existe ningún mecanismo biológico conocido que sirva para aumentar la probabilidad de que una mutación satisfaga las actuales necesidades adaptativas del organismo. Aunque para un ratón que vive en las dunas sea mejor tener un pelaje claro, la probabilidad de que experimente esa útil mutación es la misma que tiene un ratón que viva sobre un suelo oscuro. Así que más que «aleatorias», quizá fuera mejor llamarlas «indiferentes»: la probabilidad de que surja una mutación es indiferente al beneficio o perjuicio que pueda causarle al individuo.

El tercer y último aspecto de la selección natural es que la variación genética tiene que afectar la probabilidad de que los individuos dejen descendencia. En el caso de los ratones, los experimentos de depredación de Kaufman demuestran que los ratones mejor camuflados podían dejar más copias de sus genes. El color blanco de los ratones de playa satisface, por tanto, todos los criterios para haber evolucionado como un carácter adaptativo.

La evolución por selección es, pues, una combinación de azar y necesidad. Hay primero un proceso «aleatorio» (o «indiferente»): la aparición de mutaciones que generen un abanico de variantes genéticas, tanto buenas como malas (en el ejemplo del ratón, variación en el color de pelaje); y luego un proceso «necesario», una «ley»: la selección natural, que tamiza aquella variación, preservando lo bueno y desechando lo malo (en las dunas, los genes de pelaje claro aumentan a expensas de los de color oscuro).

Esto trae a colación lo que seguramente es el aspecto peor entendido del darwinismo: la idea de que, en la evolución, «todo ocurre por azar» (o, también, que «todo ocurre por accidente»). Esta afirmación tan corriente es radicalmente errónea. Ningún evolucionista, y ciertamente tampoco Darwin, ha sostenido nunca que la selección se base únicamente en el azar. Bien al contrario. ¿Acaso un proceso puramente aleatorio podría producir, por sí solo, el martilleante pito crestado, la engañosa orquídea o los saltamontes y ratones camuflados? Desde luego que no. Si de repente la evolución se viera forzada a depender únicamente de las mutaciones al azar, las especies no tardarían en degenerar y extinguirse. El azar no puede explicar por sí solo la maravillosa adecuación entre los individuos y su medio.

Y no lo hace. Cierto es que la materia prima de la evolución, que son las variaciones entre individuos, surgen de mutaciones al azar. Estas mutaciones ocurren sea como sea, con independencia de si son buenas o malas para el individuo. Pero es *el tamizado de esa variación por la selección* lo que produce las adaptaciones, y la selección natural es un proceso manifiestamente no aleatorio. Es una poderosa fuerza de moldeado que acumulan los genes que aportan una probabilidad de ser transmitidos mayormente que otros y que, al hacerlo, hace que los individuos sean cada vez más capaces de enfrentarse a su medio. Es, por tanto, la combinación única de mutación y selección, de azar y necesidad, lo que nos dice cómo se adaptan los organismos. Richard Dawkins nos ofrece la definición más concisa de la selección natural: es «la supervivencia no aleatoria de variantes aleatorias».

La teoría de la selección natural tiene una gran tarea que acometer, la mayor de toda la biología: explicar cómo evolucionó *cada* adaptación, paso a paso, a partir de los rasgos que la precedieron. Esto incluye no sólo la forma corporal y el color, sino también los caracteres moleculares que subyacen a todos los otros. La selección debe explicar la evolución de complejos caracteres fisiológicos: la coagulación de la sangre, los sistemas metabólicos que transforman la comida en energía, el prodigioso sistema inmunitario que puede reconocer y destruir miles de proteínas extrañas. ¿Y qué de los detalles de la propia genética? ¿Por qué se separan los pares de cromosomas cuando se forman los óvulos y espermatozoides? En último término, ¿por qué nos reproducimos sexualmente en lugar de producir yemas y clones, como hacen algunas especies? La selección tiene que explicar los

comportamientos, tanto los cooperativos como los antagónicos. ¿Por qué los leones cooperan para cazar en grupo y, en cambio, cuando unos machos intrusos desplazan a los machos residentes de un grupo social, los intrusos matan a todos los cachorros lactantes?

Además, la selección tiene que moldear estos caracteres de un modo especial. En primer lugar, tiene que crearlos, por lo general de forma gradual, paso a paso, a partir de sus precursores. Como ya hemos visto, cada nuevo carácter que evoluciona comienza como una modificación de un carácter existente. Las extremidades de los tetrápodos, por ejemplo, no son más que aletas modificadas. Y cada paso del proceso, cada elaboración de una adaptación, tiene que conferir un beneficio reproductivo a los individuos que lo posean. Si no es así, no hay evolución. ¿Qué ventajas confería cada uno de los pasos de la transición de una aleta nadadora a una pata caminadora? ¿O de un dinosaurio sin plumas a otro con plumas y alas? No hay forma de «ir hacia abajo» en la evolución de una adaptación, pues la selección no puede, por su propia naturaleza, crear un paso que no beneficie a quien lo posee. En el mundo de la adaptación, nunca vemos esa señal que es la cruz de los conductores: «una molestia temporal para una mejora permanente».

Si un carácter «adaptativo» es el resultado de la selección natural y no de un acto de creación, podemos hacer algunas predicciones. En primer lugar, deberíamos poder imaginar en principio una trayectoria plausible de los pasos por los que puede haber pasado la evolución de ese carácter, en la que cada paso aumente la eficacia biológica (es decir, el número promedio de descendientes) de quien lo posee. Es fácil hacerlo para algunos caracteres, como en el caso de la modificación gradual del esqueleto que convirtió a unos animales terrestres en ballenas. Para otros es más difícil, en especial para las vías bioquímicas que no dejan traza en el registro fósil. Quizá nunca tengamos la información suficiente para reconstruir la evolución de muchos caracteres, ni siquiera, en el caso de especies extintas, de llegar a entender de manera precisa cómo funcionaban esos caracteres. (¿Para qué servían realmente las placas óseas de la espalda de *Stegosaurus*?) Dice mucho, no obstante, que los biólogos no hayan encontrado una sola adaptación cuya evolución *requiera* de manera ineludible un paso intermedio que redujera la eficacia biológica de los individuos.

Hete aquí otro requisito. A lo largo de su evolución, una adaptación tiene que aumentar la *producción reproductora de quien la posea*. Y es que al final es la reproducción, no la supervivencia, lo que determina qué genes pasan a la siguiente generación y causan la evolución. Naturalmente, para transmitir un gen primero hay que sobrevivir hasta la edad en que se pueda dejar descendencia. Por otro lado, un gen que lleve a la muerte del individuo después del período reproductor no supone ninguna desventaja evolutiva. Quedará para siempre en el acervo genético. De ello se sigue que un gen se verá favorecido si ayuda a la reproducción durante la juventud aunque mate a los individuos viejos. La acumulación de estos genes por la selección natural es, de hecho, una de las explicaciones más seriamente contempladas de nuestro deterioro («senescencia») durante la vejez. Es posible que los mismos genes que nos ayudan a retozar de jóvenes nos produzcan arrugas o engrosamiento de la próstata de viejos.

Tal como funciona la selección natural, no debería producir adaptaciones que ayuden a un individuo a sobrevivir sin promover al mismo tiempo la reproducción. Un ejemplo sería un gen que ayudase a las mujeres a sobrevivir tras la menopausia. Tampoco cabe esperar encontrar adaptaciones en una especie que beneficien únicamente a los miembros de otra especie.

Podemos poner a prueba esta última predicción examinando caracteres de una especie que resulten de utilidad para los miembros de otra especie. Si esos caracteres surgieron por selección, podemos predecir que también serán útiles para la primera especie. Veamos el caso de las acacias, que tienen unas espinas hinchadas y huecas que sirven de abrigo para las colonias de unas hirientes y feroces hormigas. Los árboles también secretan néctar y producen en sus hojas unos cuerpos ricos en proteína que proporcionan alimento a las hormigas. Da toda la impresión de que el árbol esté dando abrigo y alimento a las hormigas a costa propia. ¿Se viola aquí nuestra predicción? Para nada. En realidad, dar cobijo a las hormigas le reporta al árbol enormes beneficios. En primer lugar, los insectos y mamíferos herbívoros que se paran a comer una tapita de hoja son repelidos por una furiosa horda de hormigas, como yo mismo descubrí, para mi desgracia, cuando por accidente rocé una acacia en Costa Rica. Las hormigas también se ocupan de cortar los plantones que puedan nacer alrededor de la base del árbol y que, si

llegaran a desarrollarse, competirían con éste por los nutrientes y la luz. Es fácil ver que las acacias que lograban reclutar hormigas para defenderse de depredadores y competidores debían producir más semillas que las acacias que carecían de esta habilidad. En todos los casos, cuando una especie hace algo para ayudar a otra, también se ayuda a sí misma. Ésta es una predicción directa de la evolución que, en cambio, no se sigue de la idea de la creación especial o del diseño inteligente.

Además, las adaptaciones siempre aumentan la eficacia biológica del *individuo*, no necesariamente del grupo o de la especie. La idea de que la selección natural actúa «por el bien de la especie», aunque muy corriente, es errónea. En realidad, la selección puede producir características que, aunque ayuden al individuo, sean perjudiciales para el conjunto de la especie. Cuando un grupo de machos de león desplaza a los machos residentes de una manada, suele producirse una sangrienta matanza de los cachorros lactantes. Este comportamiento es malo para la especie porque reduce el número total de leones, aumentando así la probabilidad de extinción. Pero es bueno para los leones invasores, pues entonces pueden fecundar a las hembras (que al no amamantar a los cachorros entran de nuevo en celo) y reemplazan los cachorros que mataron con sus propios descendientes. Es fácil, aunque inquietante, ver cómo un gen que causa el infanticidio puede extenderse a expensas de unos genes más «buenos» que llevarían a los machos invasores a hacer de canguros de unos cachorros con los que no guardan ningún parentesco. Tal como predice la evolución, nunca vemos adaptaciones que beneficien a la especie a expensas del individuo, algo que podríamos esperar si los organismos hubieran sido diseñados por un creador benévolo.

1. La evolución sin selección

Hagamos aquí una pequeña digresión, porque es importante entender que la selección natural no es el único proceso de cambio evolutivo. La mayoría de los biólogos definen la evolución como un cambio en la proporción de *alelos* (formas distintas de un gen) en una población. Así, a medida que la frecuencia de formas de «color claro» del gen *Agouti* aumentan en una población de ratón, decimos que la población y el color de su pelaje evolucionan. Pero estos cambios pueden ocurrir también de otras maneras. Cada individuo posee dos copias de un gen, que pueden

ser idénticas o diferentes. Cada vez que hay una reproducción sexual, un miembro de cada par de genes de uno de los progenitores pasa a uno de los descendientes, que recibe otra copia del otro progenitor. Cuál de los dos alelos de cada progenitor acaba en un descendiente es una lotería. Si uno tiene sangre del grupo AB (es decir, un alelo «A» y el otro «B»), y tiene un solo hijo, hay una probabilidad del 50 por 100 de que reciba el alelo «A» y 50 por 100 de que reciba el alelo «B». Si esta persona tiene una familia con un único hijo, con certeza uno de sus alelos se perderá. El resultado es que, en cada generación, los genes de los progenitores juegan a una lotería en la que el premio es su representación en la generación siguiente. Como el número de descendientes es finito, las frecuencias de los genes presentes en la descendencia no se corresponderán exactamente con las frecuencias que tienen en los progenitores. Este «muestreo» de genes es como tirar una moneda al aire. Aunque haya un 50 por 100 de probabilidades de que salga cara en una tirada, si sólo se hacen unas cuantas tiradas, hay una probabilidad considerable de que el resultado se desvíe de lo esperado (en cuatro tiradas, por ejemplo, hay una probabilidad del 12 por 100 de que salgan siempre caras o siempre cruces). Así que, sobre todo en las poblaciones pequeñas, la proporción de los distintos alelos puede cambiar con el tiempo única y exclusivamente por efecto del azar. En esta lotería pueden entrar a jugar nuevas mutaciones que también pueden aumentar o disminuir su frecuencia a causa de este muestreo aleatorio. Este «camino aleatorio» puede conducir al final a que algunos genes queden *fijados* en la población (es decir, que alcancen una frecuencia del 100 por 100) o, alternativamente, a que se pierdan del todo.

Estos cambios al azar en la frecuencia de los genes con el tiempo se denomina *deriva genética*, y es una forma legítima de evolución, pues comporta cambios en las frecuencias de los alelos con el tiempo, por mucho que esos cambios no sean consecuencia de la selección natural. Un ejemplo de evolución por deriva podría ser las inusuales frecuencias de los grupos sanguíneos (como en el caso del sistema ABO) en las comunidades religiosas Dunker y Amish del Antiguo Orden en América. Éstos son grupos religiosos pequeños y aislados cuyos miembros se casan entre sí, justamente las condiciones que favorecen una evolución rápida por deriva genética.

Los accidentes de muestreo también pueden producirse cuando una población es fundada por unos pocos inmigrantes, como ocurre cuando unos pocos individuos colonizan una isla o una nueva área. La ausencia casi completa de genes que producen el grupo sanguíneo B en las poblaciones de nativos americanos, por ejemplo, podría reflejar la pérdida de este gen en la pequeña población de humanos que colonizaron América del Norte desde Asia hace unos doce mil años.

Tanto la deriva genética como la selección natural pueden producir el cambio genético que identificamos como evolución. Pero existe una diferencia importante. La deriva es un proceso aleatorio mientras que la selección es la antítesis de la aleatoriedad. La deriva genética puede cambiar las frecuencias de los alelos con independencia de la utilidad que puedan tener para quienes los portan. La selección, en cambio, siempre se deshace de los alelos perjudiciales y aumenta las frecuencias de los beneficiosos.

En tanto que proceso puramente aleatorio, la deriva genética no puede conducir a la evolución de adaptaciones. Nunca podría producir un ala o un ojo. Para eso hace falta la selección natural. Lo que la deriva *sí* puede hacer es llevar a la evolución de caracteres que no sean ni útiles ni perjudiciales para el organismo. Con su habitual presciencia, el propio Darwin abordó esta idea en *El origen*:

A esta conservación de las diferencias y variaciones individualmente favorables y la destrucción de las que son perjudiciales la he llamado yo selección natural. En las variaciones ni útiles ni perjudiciales no influiría la selección natural, y quedarían abandonadas como un elemento fluctuante, como vemos quizá en ciertas especies polimorfos.

De hecho, la deriva genética no es sólo impotente a la hora de crear adaptaciones, sino que puede incluso *sofocar* a la selección natural. Especialmente en poblaciones pequeñas, el efecto del muestreo puede ser tan importante que aumente la frecuencia de genes perjudiciales aunque la selección natural actúe en el sentido contrario. Ésta es casi con toda seguridad la razón de que observemos una elevada incidencia de enfermedades congénitas en comunidades humanas aisladas, como en el caso de la enfermedad de Gaucher en los suecos del norte, la de Tay-Sachs en

los cajunes de Luisiana y la retinitis pigmentaria en los habitantes de la isla de Tristán da Cunha.

Puesto que ciertas variaciones del ADN o de secuencias de proteínas puede ser, tal como decía Darwin, «ni útiles ni perjudiciales» (o «neutrales», como las llamamos hoy), estas variantes son especialmente propensas a evolucionar por deriva. Por ejemplo, algunas mutaciones de un gen no afectan a la secuencia de la proteína que produce y, por tanto, no alteran la eficacia biológica de su portador. Lo mismo puede decirse de las mutaciones de pseudogenes no funcionales, restos antiguos de genes que todavía andan dando vueltas por el genoma. Las mutaciones de estos genes no tienen ningún efecto sobre el organismo y, por tanto, pueden evolucionar únicamente por deriva genética.

Muchos aspectos de la evolución molecular, como ciertos cambios en la secuencia de ADN, podrían ser un reflejo de la deriva y no de la selección. Es asimismo posible que muchos caracteres visibles en el exterior de los organismos hayan evolucionado por deriva genética, sobre todo si no afectan a la reproducción. La distinta forma de las hojas en distintas especies de árbol (por ejemplo, entre los arces y los robles) se ha propuesto alguna vez como ejemplo de caracteres «neutrales» que evolucionaron por deriva genética. Pero es difícil demostrar que un carácter no tiene absolutamente *ninguna* ventaja selectiva. La más pequeña de las ventajas, minúscula hasta el punto de que los biólogos no puedan observarla o medirla en tiempo real, puede producir cambios evolutivos importantes a lo largo de miles o millones de años.

La importancia relativa que en la evolución tiene la deriva genética respecto a la selección sigue siendo un tema de debate candente entre los biólogos. Cada vez que vemos una adaptación obvia, como la joroba del camello, vemos con claridad una manifestación de la selección. Pero los caracteres cuya evolución no entendemos podrían ser el reflejo de nuestra ignorancia más que de la deriva genética. Con todo, sabemos que la deriva genética *tiene* que producirse, pues en toda población de tamaño finito se producen siempre efectos de muestreo durante la reproducción. Y la deriva probablemente haya desempeñado un papel de peso en la evolución de las poblaciones pequeñas, aunque no podamos aducir más que unos pocos ejemplos.

2. Cría de plantas y animales

La teoría de la selección natural predice qué tipos de adaptaciones cabe esperar encontrar y, lo que es más importante, *no* encontrar en la naturaleza. Estas predicciones se han satisfecho. Pero muchas personas quieren más: quieren *ver* la selección natural en acción, ser testigos del cambio evolutivo durante su vida. No es difícil aceptar la idea de que la selección natural podría causar, pongamos por caso, la evolución de las ballenas a partir de los animales terrestres a lo largo de millones de años, pero de algún modo la idea de la selección gana fuerza cuando vemos con nuestros propios ojos cómo actúa.

Esta exigencia de ver la selección y la evolución en tiempo real es, aunque comprensible, curiosa. Después de todo, no nos cuesta nada aceptar que el Gran Cañón es el resultado de millones de años de erosión lenta e imperceptible por el río Colorado, por mucho que no podamos ver durante nuestra propia vida cómo se hace más hondo el cañón. Pero para algunas personas esta capacidad para extrapolar el tiempo para las fuerzas geológicas no se aplica a la evolución. ¿De qué modo podemos determinar entonces si la selección ha sido una causa importante de la evolución? Obviamente, no podemos reproducir la evolución de las ballenas para ver las ventajas evolutivas de cada pequeño paso en su camino de la tierra al mar. Pero si pudiéramos ver cómo la selección causa pequeños cambios en unas pocas generaciones, quizá nos resultara más fácil aceptar que, a lo largo de millones de años, formas de selección parecidas podrían causar los grandes cambios adaptativos que quedan documentados por los fósiles.

Las pruebas de la selección proceden de muchas áreas. La más obvia es la selección artificial, la cría y mejora de variedades de animales y plantas, que el propio Darwin vio como un buen paralelo de la selección natural. Sabemos que los criadores han logrado auténticas maravillas transformando plantas y animales salvajes en formas completamente distintas que son buenas para comer o para satisfacer nuestras necesidades estéticas. Y sabemos que todo ello se ha conseguido seleccionando la variación presente en sus antepasados salvajes. También sabemos que la cría ha conseguido grandes cambios en períodos de tiempos notablemente cortos, pues la

cría de animales y plantas sólo se viene haciendo desde hace unos pocos miles de años.

Tomemos el caso del perro doméstico (*Canis lupus familiaris*), una única especie que se presenta en todo tipo de formas, tamaños, colores y temperamentos. Todos y cada uno de ellos, pura raza o simple chucho, descienden de una única especie ancestral, con toda probabilidad el lobo común de Eurasia, que los humanos comenzaron a seleccionar hace unos diez mil años. El Club Canino de Estados Unidos reconoce 150 razas distintas, de las que todos hemos vistos muchas: el pequeño y nervioso chihuahua, criado quizá por los toltecas de México para comerlo; el robusto San Bernardo, de grueso pelaje y capaz de llevar barriles de coñac a los viajeros atrapados por la nieve; el galgo, criado para correr con sus largas patas y forma aerodinámica; el alargado y paticorto dachshund (el perro salchicha), ideal para sacar a los tejones de sus madrigueras; los perros cobradores, criados para recoger la piezas de caza del agua; y el lulú de Pomerania, de pelo sedoso, criado como amable perro faldero. Los criadores literalmente han esculpido estos perros a su gusto, cambiando el color y grosor de su pelaje, la longitud y forma de las orejas, el tamaño y conformación de su esqueleto, las peculiaridades de su carácter y temperamento, y casi todo lo imaginable.

¡Qué gran diversidad veríamos si pusiéramos a todos estos perros uno al lado del otro! Si por alguna razón las razas reconocidas existieran únicamente como fósiles, los paleontólogos no dudarían en considerarlos no una, sino muchas especies, ciertamente más de las treinta y seis especies de perros salvajes que viven en la naturaleza en la actualidad.³¹ De hecho, la variación entre los perros domésticos supera en mucho la de las especies de perros salvajes. Fijémonos tan sólo en un carácter: el peso. Los perros domésticos varían entre el kilo de un chihuahua y los 80 kilos del mastín inglés, mientras que el peso de las especies de perros salvajes varía más o menos entre 1 y 30 kilos. Y desde luego no existe ninguna especie de perro salvaje con la forma de un perro salchicha o el rostro de un pug.

El éxito de los criadores de perros valida dos de los tres requisitos de la evolución por medio de la selección. El primero es que había en el linaje ancestral de los

³¹ Las distintas razas se consideran todas miembros de la especie *Canis lupus familiaris* porque pueden cruzarse entre sí con éxito. Si sólo las conociéramos como fósiles, las considerables diferencias que presentan nos llevarían a la conclusión de que existía alguna barrera genética que impedía que se cruzaran, y que por lo tanto eran especies distintas.

perros una gran variación en el color, tamaño, forma y comportamiento que permitió la creación de todas las razas. El segundo, que parte de esa variación estaba producida por mutaciones genéticas que podían heredarse, pues en caso contrario los criadores no hubieran conseguido nada. Lo más sorprendente de la cría de perros es la enorme rapidez con la que se obtuvieron resultados. Todas esas razas se seleccionaron en menos de diez mil años, sólo un 0,1 por 100 del tiempo que tardaron las especies de perros salvajes en diversificarse a partir de su antepasado común en la naturaleza. Si la selección *artificial* puede producir tal diversidad canina en tan poco tiempo, debería resultar más fácil aceptar que la menor diversidad de los perros salvajes haya surgido de la actuación de la selección *natural* durante un tiempo mil veces mayor.

En realidad, sólo existe una diferencia entre la selección artificial y la natural. En la selección artificial es el criador en lugar de la naturaleza quien decide qué variantes son «buenas» o «malas». En otras palabras, el criterio del éxito reproductor es el deseo humano y no la adaptación a un medio natural. Algunas veces estos dos criterios coinciden. Véase, por ejemplo, el galgo, que fue seleccionado para la velocidad, y acabó con una forma parecida a la del guepardo. Éste es un ejemplo de evolución convergente: las presiones selectivas parecidas producen resultados parecidos.

El perro sirve de paradigma del éxito de otros programas de cría. Como Darwin observó: «Los criadores hablan habitualmente de la organización de un animal como de algo plástico que pueden modelar casi como quieren». Las vacas, las ovejas, los cerdos, las flores, las verduras, etc., todos provienen de la selección hecha por el hombre entre las variaciones presentes en antepasados salvajes, o las variantes que aparecieron por mutaciones durante la domesticación. Por medio de la selección, el esbelto pavo salvaje se convirtió en nuestro dócil, sustancioso y virtualmente insípido monstruo del Día de Acción de Gracias, con pechugas tan grandes que los machos de los pavos domésticos ya no pueden montar a las hembras, que tienen que ser inseminadas artificialmente. El propio Darwin se dedicó a la cría de palomas, y describe la enorme variedad de comportamiento y aspecto de las distintas razas, todas ellas seleccionadas a partir de la ancestral paloma bravía. Nos costaría reconocer al antepasado de nuestro maíz, que era una humilde

hierba. El tomate ancestral apenas pesaba unos pocos gramos, pero en la actualidad se ha llevado hasta un monstruo de 90 gramos (también insípido) con un dilatado período de caducidad. La col salvaje ha dado origen a cinco verduras distintas: el brécol, el repollo, el colirrábano, las coles de Bruselas y la coliflor, cada una seleccionada para modificar una parte distinta de la planta (el brécol, por ejemplo, no es más que una cabeza floral grande con las flores apretadas). Y la domesticación de *todas* las plantas de cultivo se ha producido durante los últimos doce mil años

No debe sorprender, entonces, que Darwin no comenzara *El origen* con una discusión sobre la selección natural o la evolución en la naturaleza, sino con un capítulo titulado «Variación en estado doméstico» que trata sobre la cría de animales y plantas. Sabía que si la gente podía aceptar la selección artificial (y tenían que hacerlo, porque su éxito era evidente), no les resultaría tan difícil dar el salto a la selección *natural*. Como él mismo argumentó:

En domesticidad, puede decirse que toda la organización se hace plástica en alguna medida... ¿puede, entonces, tenerse por improbable, a la vista de las variaciones útiles al hombre que sin duda se han producido, que otras variaciones útiles de alguna manera para cada ser en la grande y compleja batalla de la vida, tengan que presentarse a veces en el transcurso de miles de generaciones?

Puesto que la domesticación de las especies salvajes se produjo en un período de tiempo relativamente corto desde que dio comienzo la civilización humana, Darwin sabía que no había que dar un gran salto para aceptar que la selección natural podía crear una diversidad mucho mayor durante un tiempo mucho más dilatado.

3. La evolución en el tubo de ensayo

Todavía podemos dar un paso más. En lugar de dejar que unos criadores escojan las variantes que prefieran, podemos dejar que esto se produzca de manera «natural» en el laboratorio, exponiendo una población cautiva a un desafío ambiental nuevo para ella. Esto es fácil de hacer con microbios como las bacterias,

que pueden dividirse en tan sólo veinte minutos, lo cual nos permite observar en tiempo real cambios evolutivos que se producen en miles de generaciones. Y lo que se observa es un cambio evolutivo *auténtico*, que cumple con los tres requisitos de la evolución por medio de la selección: variación, heredabilidad, y supervivencia y reproducción diferencial de las variantes. Aunque el desafío ambiental lo creemos nosotros, este tipo de experimentos son más naturales que la selección artificial porque no escogemos los individuos que habrán de reproducirse.

Comencemos con una adaptación simple. Los microbios pueden adaptarse prácticamente a todo lo que los científicos les echen en el laboratorio: temperaturas altas o bajas, antibióticos, toxinas, inanición, nuevos nutrientes, o sus enemigos naturales, los virus. Probablemente, el estudio más largo de este tipo es el realizado por Richard Lenski, de la Universidad Estatal de Michigan. En 1988 Lenski puso unas cepas genéticamente idénticas de una bacteria común del intestino, *E. coli*, en unas condiciones tales que su fuente de alimento, el azúcar glucosa, se dejaba agotar cada día y se reponía al siguiente. Este experimento constituía, pues, un ensayo de la capacidad del microbio para adaptarse a un entorno con ciclos de carestía y abundancia. A lo largo de los dieciocho años siguientes (cuarenta mil generaciones bacterianas), las bacterias siguieron acumulando nuevas mutaciones que las adaptaban a este nuevo entorno. En estas condiciones de disponibilidad variable de alimento, crecen ahora un 70 por 100 más rápido que la cepa original no seleccionada. Las bacterias siguen evolucionando, y Lenski y sus colegas han identificado al menos nueve genes cuya mutación ha dado como resultado una adaptación.

Pero las adaptaciones de «laboratorio» pueden ser más complejas, hasta el punto de comportar la evolución de nuevos sistemas bioquímicos. Quizá el reto mayor sería eliminar un gen que un microbio necesita para sobrevivir en un determinado ambiente para ver cómo responde. ¿Se puede esquivar este problema por medio de la evolución? La respuesta suele ser que sí. En un vistoso experimento, Barry Hall y sus colegas de la Universidad de Rochester iniciaron un estudio borrando un gen de *E. coli*. Este gen produce una enzima que permite a las bacterias romper el azúcar lactosa en subunidades que puede utilizar como alimento. Las bacterias sin este gen se colocaron entonces en un medio que contenía lactosa como única fuente de

alimento. Al principio, como era de esperar, carecían del gen y no podían crecer. Pero tras un corto período de tiempo, la función del gen faltante fue adoptada por otra enzima que antes no podía romper la lactosa, pero ahora tenía una débil capacidad para hacerlo gracias a una mutación. Con el tiempo se produjo una nueva mutación que aumentó la *cantidad* de la nueva enzima, de modo que podía utilizar más lactosa. Por último, una tercera mutación en un gen distinto permitió a las bacterias captar lactosa del medio con mayor facilidad. En conjunto, este experimento muestra la evolución de una vía bioquímica compleja que permitió a unas bacterias crecer con una sustancia que al principio no podían utilizar como alimento. Aparte de demostrar la evolución, este experimento contiene dos valiosas lecciones. La primera, que la selección natural puede promover la evolución de sistemas bioquímicos complejos e interconectados en los que todas las partes son codependientes, en contra de las afirmaciones en sentido contrario de los creacionistas. La segunda, que como hemos visto repetidas veces, la evolución no crea nuevos caracteres de la nada, sino que produce adaptaciones «nuevas» mediante la modificación de caracteres preexistentes.

Podemos ver incluso el origen de especies bacterianas nuevas y ecológicamente diversas dentro del mismo matraz de laboratorio. Paul Rainey y sus colegas de la Universidad de Oxford colocaron una cepa de la bacteria *Pseudomonas fluorescens* en un pequeño recipiente que contenía un caldo de nutrientes, y se limitaron a observar. (Por sorprendente que parezca, un recipiente de este tipo contiene ambientes diversos. Por ejemplo, la concentración de oxígeno es mayor cerca de la superficie e inferior en el fondo.) Al cabo de diez días, apenas unos pocos cientos de generaciones, la bacteria ancestral, a la que llamaban «smooth» («lisa») y flotaba por todo el medio, había evolucionado dando lugar a dos nuevas formas que ocupaban partes distintas del matraz. Una, llamada «wrinkly spreader» («que se extiende formando arrugas»), formaba un tapiz sobre el caldo. La otra, llamada «fuzzy spreader» («que se extiende de forma difusa»), tapizaba el fondo. El tipo liso ancestral se mantuvo en el interior del medio líquido. Cada una de las dos nuevas formas era genéticamente distinta de su antecesora, de la que habían evolucionado por mutación y selección natural hasta reproducirse mejor en sus ambientes respectivos. Lo que ocurre en este caso en el laboratorio ya no es sólo evolución,

sino también especiación: la forma ancestral había producido dos formas descendientes ecológicamente distintas con las que coexistía, y en las bacterias las formas con estas características se consideran especies distintas. Tras un período de tiempo corto, la selección natural sobre *Pseudomonas* había producido una «radiación adaptativa» a pequeña escala, el equivalente de cómo las plantas o los animales forman especies cuando se enfrentan a nuevos ambientes en una isla oceánica.

4. Resistencia a fármacos y venenos

Cuando se introdujeron los antibióticos durante la década de 1940, todos creían que resolverían para siempre el problema de las enfermedades infecciosas causadas por bacterias. Estos fármacos funcionaban tan bien que casi todos los afectados de tuberculosis, faringitis estreptocócica o neumonía podían curarse con un par de inyecciones o un frasco de pastillas. Pero nos habíamos olvidado de la selección natural. Con sus enormes tamaños poblacionales y cortos tiempos de generación, precisamente las características que hacen a las bacterias ideales para los estudios de evolución en el laboratorio, hay una elevada probabilidad de que aparezca una mutación que confiera resistencia a un antibiótico. Las bacterias resistentes al fármaco serán justamente las que sobrevivirán y dejarán descendientes genéticamente idénticos que también serán resistentes al antibiótico. Con el tiempo, el fármaco pierde efectividad y volvemos a tener un problema médico. Esto ha producido crisis graves para algunas enfermedades. Existen hoy cepas de la bacteria de la tuberculosis que han evolucionado hasta el punto de ser resistentes a todos los antibióticos que los médicos han venido utilizando contra ellas. Tras un largo período de curas y optimismo médico, la tuberculosis se está convirtiendo de nuevo en una enfermedad mortal.

Esto es selección natural pura y dura. Todos sabemos de la resistencia a los fármacos, pero no siempre nos damos cuenta de que este es uno de los mejores ejemplos que tenemos de la selección en acción. (Si este fenómeno hubiera existido en tiempos de Darwin, seguro que le hubiera reservado un lugar central en *El origen*.) Una creencia bastante extendida es que la resistencia a los fármacos se produce porque, de algún modo, los pacientes cambian de manera que el fármaco

pierde efectividad. No es así: la resistencia proviene de la evolución del microbio, no de la habituación de los pacientes.

Otro de los mejores ejemplos de selección es la resistencia a la penicilina. Cuando se introdujo a principios de la década de 1940, la penicilina era un fármaco milagroso, especialmente efectivo contra las infecciones causadas por la bacteria *Staphylococcus aureus*. En 1941, el antibiótico podía acabar con cualquiera de las cepas de estafilococo del mundo. Hoy, setenta años más tarde, más del 95 por 100 de las cepas de estafilococo son resistentes a la penicilina. Lo que ha pasado es que aparecieron en algunas bacterias mutaciones que les otorgaban resistencia al antibiótico, y como es natural, estas mutaciones se extendieron por todo el mundo. En respuesta a ello, la industria farmacéutica desarrolló un nuevo antibiótico, la meticilina, pero también está perdiendo utilidad por culpa de nuevas mutaciones. En ambos casos, los científicos han identificado los cambios precisos en el ADN bacteriano que confieren resistencia a los antibióticos.

Los virus, que son la forma de vida de menor tamaño capaz de evolucionar, también han adquirido por medio de la evolución resistencia a los fármacos antivirales, en particular a la AZT (azidotimidina), diseñada para impedir que el virus HIV se replique en un cuerpo infectado. La evolución se produce incluso en el cuerpo de un solo paciente, pues el virus muta a una velocidad de vértigo, y tarde o temprano obtiene una resistencia que hace que la AZT sea ineficaz. En la actualidad el sida se mantiene a raya con un cóctel diario de tres fármacos, y si la historia sirve de guía, también éste dejará de funcionar con el tiempo.

La evolución de la resistencia a las drogas crea una carrera armamentista entre los humanos y los microorganismos que no ganan sólo las bacterias, sino también la industria farmacéutica, que constantemente tiene que diseñar nuevos fármacos para reemplazar a los que van perdiendo eficacia. Por suerte, hay algunos casos espectaculares de microorganismos que no han logrado adquirir resistencia mediante la evolución. (Debemos recordar que la teoría de la evolución no predice que todo vaya a evolucionar; si las mutaciones necesarias no pueden aparecer o no aparecen, no se produce evolución.) Una forma de *Streptococcus*, por ejemplo, produce la faringitis estreptocócica, común en niños. Estas bacterias no han logrado evolucionar hasta adquirir siquiera la más leve resistencia a la penicilina, que sigue

siendo el tratamiento preferido. Y, a diferencia del virus de la gripe, los virus de la polio y del sarampión no han conseguido adquirir por evolución resistencia a las vacunas, que se vienen utilizando desde hace más de cincuenta años.

Otras especies han conseguido adaptarse también por medio de la selección a cambios provocados por el hombre en su medio. Algunos insectos se han vuelto resistentes al DDT y a otros plaguicidas, algunas plantas se han adaptado a los herbicidas, y algunos hongos, gusanos y algas han adquirido por medio de la evolución resistencia a los metales pesados que contaminan su entorno. Parece que casi siempre hay algunos individuos con suerte con mutaciones que les permiten sobrevivir y reproducirse, haciendo que una población sensible evolucione con rapidez hacia una población resistente. Podemos realizar una inferencia razonable: cuando una población encuentre una presión que *no* provenga del hombre, como un cambio de la salinidad, la temperatura o la precipitación, la selección natural con frecuencia producirá una respuesta adaptativa.

5. La selección en la naturaleza

Las respuestas que hemos visto a las presiones y sustancias químicas impuestas por el hombre constituyen ejemplos de selección natural con pleno derecho. Aunque los agentes selectivos hayan sido concebidos por los humanos, la respuesta es del todo natural y, como hemos visto, puede ser bastante compleja. Pero quizá resultara todavía más convincente que pudiéramos observar el proceso entero en marcha en la naturaleza, sin intervención humana. Es decir, queremos saber cuál es el reto al que se enfrenta una población y queremos ver cómo evoluciona ante nuestros ojos. No podemos esperar que estas circunstancias sean comunes. De entrada, la selección natural en la naturaleza suele ser increíblemente lenta. La evolución de las plumas, por ejemplo, probablemente haya llevado cientos de miles de años. Aunque estuvieran evolucionando en la actualidad, sería simplemente imposible ver cómo ocurre esto en tiempo real, y más aún medir el tipo de selección, fuera el que fuera, que estuviera haciendo las plumas más largas. Si queremos ver la selección natural en marcha, tendrá que ser selección *fuerte*, que causa cambios rápidos, y lo mejor será que nos centremos en animales o plantas con tiempos de generación cortos de manera que podamos ver los cambios evolutivos a lo largo de varias generaciones.

Y mejor que sea algo más grande que una bacteria: la gente quiere ver la selección en los organismos llamados «superiores», en animales o plantas.

Además, no deberíamos esperar ver más que cambios pequeños en uno o unos pocos caracteres de una especie, lo que se conoce como cambios *microevolutivos*. Dado el ritmo gradual de la evolución, no cabe esperar que veamos cómo un «tipo» de planta o animal se convierte en otro, lo que conocemos como *macroevolución*, durante el transcurso de una vida humana. Aunque la macroevolución sigue produciéndose en la actualidad, sencillamente no estamos por aquí el tiempo suficiente para verla. Recordemos que la cuestión no es si se *produce* cambio macroevolutivo, pues ya sabemos que es así gracias al registro fósil, sino si ese cambio fue el resultado de la selección natural y si ésta puede construir caracteres y organismos complejos.

Otro de los factores que hacen que sea difícil ver la selección natural en tiempo real es que un tipo muy común de selección natural no hace que las especies cambien. Todas las especies están bastante bien adaptadas, lo que significa que la selección ya las ha adecuado a su entorno. Los episodios de cambio que se producen cuando una especie se enfrenta a un nuevo reto ambiental probablemente sean raras en comparación con los períodos durante los cuales no hay nada nuevo a lo que adaptarse. Pero eso no significa que no se esté produciendo selección. Si una especie de ave, por ejemplo, ha evolucionado hasta tener el tamaño corporal óptimo para su medio, y ese medio no cambia, la selección sólo actuará en el sentido de eliminar las aves que sean más grandes o más pequeñas que el óptimo. Pero este tipo de evolución, que recibe el nombre de *selección estabilizadora*, no cambiará el tamaño medio del cuerpo: si se mira la población de una generación a la siguiente, apenas habrá cambiado en nada (aunque se habrán eliminado tanto genes que den un cuerpo mayor como genes que produzcan uno menor). Podemos ver esto, por ejemplo, en el peso en el momento del nacimiento en los bebés humanos. Las estadísticas de los hospitales muestran de manera sistemática cómo los bebés que al nacer tienen un peso medio, alrededor de 3,4 kilos en Estados Unidos y Europa, sobreviven mejor que los más pequeños (nacidos prematuramente o de madres malnutridas) o mayores (que tienen dificultades para nacer).

Así pues, si queremos ver la selección en acción deberemos fijarnos en especies que tengan tiempos de generación cortos y que estén adaptándose a un nuevo ambiente. Esto es más probable que ocurra cuando una especie invade un nuevo hábitat o experimenta un cambio ambiental severo. Y, en efecto, ahí es donde encontramos los ejemplos.

El más célebre de todos, que no elaboraré aquí en detalle porque ya ha sido descrito a fondo (por ejemplo, en el soberbio libro de Jonathan Weiner, *The Beak of the Finch: A Story of Evolution in Our Time*), es la adaptación de un ave a un cambio de clima anómalo. El pinzón de Darwin (*Geospiza fortis*) de las islas Galápagos ha sido estudiado durante varias décadas por Peter y Rosemary Grant, de la Universidad de Princeton, y sus colaboradores. En 1977, una fuerte sequía en las Galápagos redujo de manera drástica la disponibilidad de semillas en la isla Daphne Mayor. Este pinzón, que normalmente prefiere comer semillas pequeñas y blandas, se vio forzado a recurrir a semillas más grandes y más duras. Varios experimentos han mostrado que sólo las aves más grandes, con un pico más grande y robusto, pueden romper con facilidad las semillas duras. El resultado fue que sólo los individuos de pico grande pudieron alimentarse adecuadamente, mientras que los de pico pequeño murieron de inanición o quedaron demasiado débiles para reproducirse. Los supervivientes de pico grande dejaron más descendientes, y a la siguiente generación la selección natural había incrementado el tamaño medio del pico en un 10 por 100 (el tamaño corporal también aumentó). Esta tasa de evolución es vertiginosa, mucho más rápida que nada que hayamos visto en el registro fósil. En comparación, el tamaño del cerebro humano aumentó en el linaje humano alrededor de un 0,001 por 100 por generación. Todo lo que requiere la evolución por medio de la selección natural había quedado documentado a satisfacción por los Grant en estudios previos: los individuos de la población original variaban en la profundidad del pico, una gran proporción de esa variación era genética y los individuos con picos distintos dejaron un número de descendientes distinto *en la dirección predicha*.

Dada la importancia del alimento para la supervivencia, la capacidad para recolectar, comer y digerirla con eficiencia es una fuerza de selección fuerte. Muchos insectos tienen un hospedador específico: se alimentan y ponen sus huevos

en sólo una o unas pocas especies de plantas. En tales casos, el insecto necesita adaptaciones que le permitan utilizar la planta, entre ellas un aparato bucal que le dé acceso a los nutrientes de la planta, un metabolismo que detoxifique cualquier tóxico que contenga la planta y un ciclo reproductor que produzca las larvas cuando tengan comida a disposición (durante el período vegetativo de la planta). Puesto que hay muchos pares de insectos estrechamente emparentados que utilizan como hospedador a plantas diferentes, deben de haberse producido muchos cambios de una planta a otra a lo largo de la evolución. Estos cambios, que equivalen a colonizar un hábitat distinto, deben haber ido acompañados de una selección fuerte. De hecho, hemos visto cómo ocurre algo semejante a lo largo de las últimas décadas en la chinche del jabonero (*Jadera haematoloma*) del Nuevo Mundo. *Jadera* vive en dos plantas autóctonas de distintas partes de Estados Unidos: el jabonero, un arbusto del sur y centro de Estados Unidos, y una liana perenne del género *Cardiospermum* en el sur de Florida. Con su pico largo como una aguja, la chinche penetra en el interior de los frutos de estas plantas y consume las semillas que guarda en su interior, licuando su contenido antes de absorberlo. Pero durante los últimos cincuenta años, esta chinche ha colonizado otras tres plantas introducidas en su área de distribución. Los frutos de estas plantas son muy distintos en tamaño respecto a los de su hospedador autóctono: los de dos de estas especies son mucho más grandes y los de la otra más pequeños.

Scott Carroll y sus colegas predijeron que este cambio de hospedador provocaría la selección natural de cambios en el tamaño del pico. Las chinches que colonizaban las especies de frutos más grandes evolucionarían hacia picos más largos que les permitieran penetrar los frutos y alcanzar las semillas, mientras que las que colonizaban los frutos más pequeños evolucionarían en la dirección opuesta. Esto es justamente lo que ocurrió: la longitud del pico cambió en hasta un 25 por 100 en unas pocas décadas. Esto quizá no parezca mucho, pero lo es en comparación con las tasas habituales, sobre todo en el plazo de un centenar de generaciones.³² Para ponerlo en perspectiva, si esta tasa de evolución del pico se mantuviera durante tan sólo diez mil generaciones (cinco mil años), los picos aumentarían de tamaño en un

³² Los insectos también se adaptaron a la distinta composición química de cada una de las especies de plantas, hasta el punto de que en la actualidad cada nueva forma de la chinche sólo crece bien en la planta introducida y no en el jabonero autóctono.

factor de aproximadamente cinco mil millones, alcanzando una longitud de 2.900 kilómetros, suficiente para penetrar en un fruto del tamaño de ¡la luna! Presentar esta cifra tan ridícula y nada realista no tiene otro propósito, desde luego, que poner de manifiesto la potencia acumulada que pueden llegar a tener unas tasas de cambio en apariencia tan minúsculas.

He aquí otra predicción: en un régimen de sequía prolongado, la selección natural conducirá a la evolución de plantas que florezcan más temprano que sus antepasados. La razón es que durante una sequía, los suelos se secan rápidamente después de las lluvias. Una planta que no saque la flor y produzca semillas con rapidez en una sequía no deja descendencia. En condiciones normales del clima, en cambio, resulta beneficioso retardar la floración para crecer más y poder producir más semillas.

Esta predicción fue contrastada durante un experimento natural en el nabo silvestre (*Brassica rapa*), introducido en California hace unos trescientos años. A partir del año 2000, el sur de California sufrió una fuerte sequía que duró cinco años. Arthur Weis y sus colegas de la Universidad de California midieron el tiempo de floración de los nabos al principio y al final de este período. Tal como esperaban, la selección natural había modificado el tiempo de floración precisamente en el modo predicho: tras la sequía, las plantas comenzaron a florecer una semana antes que sus antepasados.

Hay muchos otros ejemplos, pero todos demuestran lo mismo: podemos presenciar con nuestros propios ojos cómo la selección natural conduce a una mejor adaptación. *Natural Selection in the Wild*, un libro escrito por el biólogo John Endler, documenta más de 150 casos de evolución, y en aproximadamente una tercera parte de estos tenemos una buena idea de cómo actuó la selección natural. Vemos moscas de la fruta que se adaptan a temperaturas extremas, abejas que se adaptan a sus competidores y unos peces, los gupis (*Poecilia reticulata*), que pierden colorido para no llamar la atención de sus depredadores. ¿Cuántos ejemplos más necesitamos?

6. ¿Puede la selección producir complejidad?

Pero aunque nos pongamos de acuerdo en que la selección natural actúa en la naturaleza, ¿hasta dónde puede llegar *realmente*? Vale que la selección puede cambiar los picos de las aves o el período de floración de las plantas, pero ¿puede producir *complejidad*? ¿Qué podemos decir de los caracteres intrincados como los miembros de los tetrápodos; o de las adaptaciones bioquímicas exquisitas como la coagulación de la sangre, que requiere una secuencia precisa de pasos en la que intervienen muchas proteínas; o incluso del aparato más complicado que haya evolucionado nunca, el cerebro humano?

Aquí jugamos con una suerte de desventaja porque, como sabemos, los caracteres complejos tardan mucho tiempo en evolucionar, así que la mayoría lo hicieron en el pasado distante y desde luego no estábamos allí para ver cómo ocurría. Entonces, ¿cómo podemos estar seguros de que la selección natural intervino? ¿Cómo sabemos que los creacionistas se equivocan cuando dicen que la selección puede hacer pequeños cambios en los organismos pero es impotente frente a los grandes cambios?

Pero primero debemos preguntarnos: ¿cuál es la teoría alternativa? No sabemos de ningún otro proceso que pueda construir una adaptación compleja. La alternativa que con más frecuencia se propone nos lleva directamente al dominio de lo sobrenatural. Esto, como es obvio, es creacionismo, que en su reencarnación más reciente se conoce como «diseño inteligente». Los defensores del DI sugieren que un diseñador sobrenatural ha intervenido en diversos momentos durante la historia de la vida, bien sea trayendo instantáneamente a la existencia las adaptaciones complejas que la selección natural presuntamente no puede hacer, bien sea produciendo «mutaciones milagrosas» que no pueden ocurrir al azar. (Algunos defensores del DI van aún más lejos: son los creacionistas extremos de la «tierra joven», que creen que nuestro planeta sólo tiene unos seis mil años y que la vida no tiene ninguna historia evolutiva.)

En su mayor parte, el DI no es ciencia, pues sobre todo consiste en un conjunto de afirmaciones no contrastables. ¿Cómo podemos determinar, por ejemplo, si las mutaciones fueron meros accidentes de la replicación del ADN o nacieron de la voluntad de un creador? Pero podemos preguntarnos si existen adaptaciones *que no pueden haber sido construidas por la selección* y que, por consiguiente, nos obligan

a pensar en otro mecanismo. Los defensores del DI han propuesto varias adaptaciones de este tipo, como el flagelo bacteriano (un pequeño aparato en forma de cabello con un complejo motor molecular, que algunas bacterias utilizan para desplazarse) y el mecanismo de la coagulación de la sangre. Éstos son sin duda caracteres complejos: el flagelo, por ejemplo, está compuesto por docenas de proteínas distintas, todas las cuales tienen que trabajar de manera concertada para que esta «hélice» en forma de pelo se mueva.

Los defensores del DI argumentan que este tipo de caracteres, que consisten en muchas piezas distintas que tienen que cooperar para que el carácter funcione, desafían la explicación darwinista. Por tanto, por defecto, deben haber sido diseñadas por un agente sobrenatural. Éste es el tipo de argumentación que suele conocerse como «Dios en las lagunas», pues es una argumentación que nace de la ignorancia. Lo que realmente dice es que si no entendemos *todo* sobre cómo construyó la selección natural un carácter, esta falta de conocimiento constituye en sí misma una prueba de la creación sobrenatural.

Es fácil ver por qué este argumento no se sostiene. Nunca seremos capaces de reconstruir el proceso por el cual la selección natural construyó todos y cada uno de los caracteres; la evolución ocurrió antes de que estuviéramos en escena, así que algunas cosas nunca llegarán a ser conocidas. Pero la biología evolutiva es como toda ciencia: tiene misterios, y muchos acaban por resolverse, uno tras otro. Sabemos, por ejemplo, de dónde vienen las aves: no salieron de la nada (como solían decir los creacionistas), sino que evolucionaron de manera gradual a partir de los dinosaurios. Cada vez que se resuelve un misterio, el DI se ve forzado a retirarse. Como el DI no propone ningún enunciado científico contrastable, sino que se limita a ofrecer críticas mal pertrechadas del darwinismo, su credibilidad se va apagando poco a poco con cada avance de nuestro conocimiento. Además, la propia explicación que ofrece el DI de los caracteres complejos (el capricho de un diseñador sobrenatural) puede explicar *cualquier* observación imaginable de la naturaleza. Hasta quizá haya tenido el creador el capricho de hacer que la vida parezca haber evolucionado (al parecer muchos creacionistas así lo creen, aunque pocos lo admiten). Pero si uno no puede concebir una sola observación que pueda refutar una teoría, esa teoría sencillamente no es científica.

Pero ¿cómo podemos refutar la afirmación del DI de que algunos caracteres desafían *cualquier* origen por selección natural? En tales casos la responsabilidad no recae en los biólogos evolutivos, que no tienen que describir punto por punto una hipótesis documentada del proceso exacto de evolución de un carácter complejo. Eso nos obligaría a conocer todo lo que ocurrió cuando no estábamos, lo cual es imposible para la mayoría de los caracteres y para prácticamente todas las vías bioquímicas. Como los bioquímicos Ford Doolittle y Olga Zhaxbayeva sostuvieron al responder a la afirmación del DI de que los flagelos no podían haber evolucionado, «los evolucionistas no necesitan acometer el reto imposible de descubrir el más mínimo detalle de la evolución flagelar. Basta con mostrar que ese desarrollo, realizado con procesos y constituyentes no muy distintos de los que ya conocemos y sobre los que estamos de acuerdo, es factible». Por «factible» lo que quieren decir es que debe haber precursores evolutivos para cada nuevo carácter, y que la evolución de ese carácter no viola el requisito darwinista de que cada paso en la construcción de una adaptación debe beneficiar a quien lo posee.

En realidad, no conocemos ninguna adaptación cuyo origen *no* pueda haber implicado a la selección natural. ¿Cómo podemos estar tan seguros? Para los rasgos anatómicos, podemos sencillamente seguir su evolución (cuando sea posible) en el registro fósil, y ver en qué orden tuvieron lugar los distintos cambios. Podemos entonces determinar si las secuencias de cambios por lo menos se ajustan a un proceso adaptativo paso a paso. Y en cada caso, podemos encontrar al menos una explicación darwinista factible. Hemos visto esto en la evolución de los animales terrestres desde unos peces, de las ballenas desde animales terrestres y de las aves desde unos reptiles. No tenía por qué haber sido de ese modo. El movimiento de las narinas a la parte superior de la cabeza en las ballenas ancestrales, por ejemplo, podía haber precedido a la evolución de las aletas. Eso podría haber sido un acto providencial de un creador, pero no habría podido evolucionar por selección natural. Sin embargo, siempre vemos un orden evolutivo que tiene sentido a la luz del darwinismo.

La evolución de las vías y caracteres bioquímicos complejos no es tan fácil de entender, porque no dejan traza en el registro fósil. Su evolución tiene que reconstruirse de forma más especulativa, intentando ver cómo podían componerse

esas vías a partir de precursores bioquímicos más sencillos. Nos gustaría, además, conocer los pasos de ese proceso para ver si cada novedad podía aportar una mejora en la eficacia biológica.

Aunque los defensores del DI afirman que detrás de esas vías bioquímicas hay una mano sobrenatural, empezamos a obtener resultados de la obstinada investigación científica en forma de hipótesis plausibles (y contrastables) de cómo pudieron evolucionar. Tomemos el caso de la vía de la coagulación de la sangre en los vertebrados. Este proceso depende de una secuencia de eventos que comienza cuando una proteína se une a otra en la vecindad de una herida abierta. Esto dispara una complicada reacción en cadena de dieciséis pasos, cada uno de los cuales precisa de la interacción entre un par distinto de proteínas, que culmina en la formación del coágulo. En conjunto son más de veinte proteínas las que intervienen. ¿Cómo puede haber evolucionado algo así?

No lo sabemos con seguridad pero tenemos indicios de que el sistema podría haberse erigido de forma adaptativa a partir de precursores más simples. Muchas de las proteínas de la coagulación de la sangre están hechas por genes relacionados que aparecieron por duplicación, una forma de mutación en la que un gen ancestral, y más tarde sus descendientes, queda duplicado al completo en una hebra de ADN a causa de un error durante la división celular. Una vez aparecidos, los genes duplicados pueden evolucionar por caminos distintos, hasta que al cabo de un tiempo pueden realizar funciones distintas, como ahora hacen en la coagulación de la sangre. Además, sabemos que otras proteínas y enzimas de la vía desempeñaban funciones distintas en otros grupos que evolucionaron antes que los vertebrados. Por ejemplo, una proteína clave en la vía de la coagulación es el fibrinógeno, que se halla disuelto en el plasma sanguíneo. En el último paso de la coagulación de la sangre, esta proteína es dividida por una enzima, y las proteínas más cortas, las fibrinas, se pegan unas a otras y se hacen insolubles, formando el coágulo. Como el fibrinógeno está en todos los vertebrados como proteína de la coagulación de la sangre, cabe suponer que evolucionó a partir de una proteína que cumplía una función distinta en unos invertebrados ancestrales que aparecieron antes pero carecían de una vía de coagulación de la sangre. Aunque un diseñador inteligente

podría inventar una proteína adecuada, la evolución no funciona así. Tiene que haber existido una proteína ancestral a partir de la cual evolucionó el fibrinógeno.

Rusell Doolittle, de la Universidad de California, predijo que encontraríamos esa proteína, y, en efecto, en 1990 él y su colega Xun Xu la descubrieron en el cohombro de mar, un invertebrado que se utiliza a veces en la gastronomía china. Los cohombros de mar (holoturias) son una rama que se separó del linaje de los vertebrados hace al menos 500 millones de años, y sin embargo poseen una proteína que, estando claramente relacionada con las proteínas de la coagulación en los vertebrados, no se utiliza para la coagulación de la sangre. Esto significa que el antepasado común de las holoturias y los vertebrados poseía un gen que los vertebrados más tarde requisaron para una nueva función, precisamente como predice la evolución. Desde entonces, tanto Doolittle como el biólogo celular Ken Miller han elaborado una secuencia plausible y adaptativa de la evolución de toda la cascada de la coagulación de la sangre desde partes de proteínas precursoras. Todos estos precursores se encuentran en invertebrados, donde tienen otras funciones no relacionadas con la coagulación, y en los vertebrados la evolución las llevó a adoptar una función dentro del sistema de coagulación. En cuanto a la evolución del flagelo bacteriano, aunque todavía no se entiende completamente, se sabe ya que implica muchas proteínas tomadas de otras vías bioquímicas.³³

Los problemas difíciles a menudo ceden ante la ciencia, y aunque todavía no sepamos cómo evolucionaron todos los sistemas bioquímicos complejos, cada día aprendemos algo nuevo. Al fin y al cabo, la evolución química es un campo de investigación que todavía está en pañales. Si algo nos enseña la historia de la ciencia, es que lo que conquista nuestra ignorancia es la investigación, y no rendirse para atribuir nuestra ignorancia a la obra milagrosa de un creador. Cuando el lector oiga que alguien afirma lo contrario, conviene que recuerde estas palabras de Darwin: «La ignorancia engendra confianza más a menudo que el conocimiento: son quienes saben poco, y no quienes saben mucho, los que afirman con seguridad que tal o cual problema no será nunca resuelto por la ciencia».

³³ El lector interesado encontrará una descripción de cómo la coagulación de la sangre y el flagelo podrían haber evolucionado por selección natural en el libro de Kenneth Miller *Only a Theory*, así como en M. J. Pallen y N. J. Matzke (2006).

Así que, en principio, no parece que haya ningún problema real con que la evolución haya construido sistemas bioquímicos complejos. Pero ¿y el *tiempo*? ¿Ha habido realmente tiempo suficiente para que la selección natural creara adaptaciones complejas además de la diversidad de formas de vida? Sabemos que ha habido tiempo suficiente para que los organismos evolucionaran, pues nos lo dice el registro fósil, pero ¿fue la selección natural lo bastante fuerte como para impulsar esos cambios?

Una manera de abordar el problema consiste en comparar las tasas de evolución derivadas del registro fósil con las que vemos en los experimentos de laboratorio, o con datos históricos de los cambios evolutivos ocurridos después de que una especie colonizara un nuevo hábitat en tiempos históricos. Si la evolución en el registro fósil fuera mucho más rápida que en los experimentos de laboratorio o los sucesos de colonización, que en ambos casos están impulsados por una selección muy fuerte, tendríamos que volver a pensar si la selección puede realmente explicar los cambios en los fósiles. Pero los resultados nos dicen justo lo contrario. Philip Gingerich, de la Universidad de Michigan, mostró que las tasas de cambio de la forma y tamaño de los animales en experimentos de laboratorio y estudios de colonización eran *mucho más rápidos* que las tasas de cambio de los fósiles: de unas quinientas veces más rápidas (selección durante las colonizaciones) a casi un millón de veces más rápidas (experimentos de selección en laboratorio). Incluso las tasas de evolución del registro fósil son todavía más lentas que las tasas más lentas que observamos en los experimentos de laboratorio. Además, las tasas *medias* de evolución que se observan en los estudios de colonización son lo bastante grandes como para hacer que un ratón alcance el tamaño de un elefante en tan sólo ¡diez mil años!

La lección es, por tanto, que la selección es perfectamente adecuada para explicar los cambios que vemos en el registro fósil. Una razón por la que la gente plantea esta pregunta es que no pueden (o no quieren) darse cuenta de la magnitud de los lapsos de tiempo con los que ha trabajado la evolución. Después de todo, hemos evolucionado para ocuparnos de lo que ocurre a la escala de nuestras vidas, o sea unos treinta años durante la mayor parte de nuestra evolución. Un lapso de 10 millones de años queda fuera de nuestra intuición.

Por último, ¿es la selección natural suficiente para explicar un órgano *realmente* complejo como el ojo? El ojo de «cámara» de los vertebrados (y moluscos como el calamar y el pulpo) fue en otro tiempo un favorito de los creacionistas. Tras observar la compleja disposición del iris, el cristalino, la retina, la córnea, etc., todos los cuales tienen que trabajar conjuntamente para producir una imagen, los oponentes de la selección natural afirmaron que el ojo no podía formarse por medio de pasos graduales. ¿Cómo iba a servir de algo «medio ojo»?

Darwin abordó y refutó con brillantez este argumento en *El origen*. Hizo un repaso de las especies *existentes* para ver si podía encontrar ojos funcionales pero menos complejos que no sólo fueran útiles, sino que pudieran ordenarse en una secuencia hipotética que mostrara la posible evolución del ojo de cámara. Si pudiera hacerse esto (y puede hacerse), el argumento de que la selección natural nunca podría producir un ojo se desmorona, pues los ojos de las especies existentes son obviamente útiles. Cada mejora del ojo podía conferir beneficios evidentes, pues haría que el individuo fuera más capaz de encontrar alimento, evitar a sus depredadores y moverse por su entorno.

Una secuencia posible de estos cambios comienza con simples manchas oculares compuestas por pigmentos sensibles a la luz, como las que encontramos en los platelmintos. Luego la piel produce un pliegue, formando un foso en forma de copa que protege la mancha ocular y la ayuda a localizar la fuente de luz. Las lapas tienen ojos como éstos. En el nautilo la abertura del foso se cierra más, produciendo una imagen mejorada, y en los poliquetos *Nereis*, queda tapado por una cubierta transparente que protege la abertura. En los abulones, parte del fluido del ojo se ha coagulado formando un cristalino, una lente que ayuda a enfocar, y en muchas especies, incluidos los mamíferos, se modificaron algunos de los músculos cercanos para mover el cristalino y enfocar la imagen. La evolución de la retina, un nervio óptico y todo el resto se sigue de la selección natural. Cada paso de esta hipotética «serie» de transición aumentó la adaptación de quien la poseía, porque permitía al ojo recoger más luz o formar mejores imágenes, dos cosas que ayudan a la supervivencia y la reproducción. Además, cada paso de este proceso es factible porque se encuentra en los ojos de una especie viva distinta. Al final de la secuencia tenemos el ojo de cámara, cuya evolución adaptativa parece de una complejidad

imposible. Pero la complejidad del ojo último puede descomponerse en una serie de pasos más pequeños, todos adaptativos.

Pero podemos ir más lejos que alinear en una serie adaptativa los ojos de especies existentes. Podemos elaborar un modelo de la evolución del ojo para ver si, a partir de un precursor simple, la selección puede convertir ese precursor simple en un ojo más complejo en un lapso de tiempo razonable. Dan-Eric Nilsson y Susanne Pelger, de la Universidad de Lund, en Suecia, han elaborado justamente este tipo de modelo matemático, que comienza con una mancha de células sensibles a la luz y, detrás de ella, una capa pigmentaria (una retina). Dejaron entonces que los tejidos que rodeaban esta estructura se deformasen al azar, limitando la cantidad de deformación a sólo el 1 por 100 del tamaño o el grosor en cada paso. Para reproducir la selección natural, el modelo aceptaba únicamente las «mutaciones» que mejoraban la agudeza visual, y rechazaba las que la disminuían.

En un período de tiempo sorprendentemente corto, el modelo produjo un ojo complejo después de pasar por estadios parecidos a los observados en la serie real de ojos de animales descrita más arriba. El ojo formó primero un pliegue en forma de copa, la copa quedó cubierta por una superficie transparente y el interior de la copa se tomó gelatinoso para formar no ya una lente, sino una lente con las dimensiones que producían la mejor de las imágenes posible.

Así pues, a partir de una mancha ocular como la de un platelminto, el modelo había producido algo parecido al ojo complejo de los vertebrados, y todo ello por medio de una serie de pequeños pasos adaptativos, 1.829 pasos para ser exactos. Pero Nilsson y Pelger también calcularon cuánto tiempo requeriría este proceso. Para ello partieron de algunas suposiciones sobre cuánta variación genética para la forma del ojo existía en la población que comenzaba a experimentar selección natural, y sobre lo fuerte que debía ser la selección a favor de un paso que mejorara la utilidad del ojo. De manera deliberada escogieron para estos términos valores bajos, suponiendo una cantidad razonable pero no grande de variación genética y que la selección natural era débil. Aun así, el ojo evolucionó muy rápido: todo el proceso desde la rudimentaria mancha ocular hasta el ojo de cámara transcurrió en menos de 400.000 años. Puesto que los primeros animales con ojos datan de hace 550 millones de años, hubo, de acuerdo con este modelo, tiempo suficiente para que los

ojos complejos evolucionasen más de mil quinientas veces. En la realidad, los ojos han evolucionado de manera independiente en al menos cuarenta grupos de animales. Como Nilsson y Pelger observan con ironía en su artículo, «está claro que el ojo nunca representó una verdadera amenaza para la teoría de la evolución de Darwin».

Así pues, ¿dónde nos encontramos? Sabemos que un proceso muy parecido a la selección natural, es decir la cría de animales y plantas, ha partido de la variación genética presente en las especies salvajes y ha creado enormes transformaciones «evolutivas». Sabemos que estas transformaciones pueden ser mucho mayores y más rápidas que el cambio evolutivo que se produjo en el pasado. Hemos visto que la selección actúa en el laboratorio, en microorganismos que causan enfermedades, y en la naturaleza. No conocemos ninguna adaptación que no pueda haber sido moldeada por la selección natural, y en muchos casos podemos hacer una inferencia plausible de cómo actuó la selección. Por último, disponemos de modelos matemáticos que muestran que la selección natural puede producir caracteres complejos de forma fácil y rápida. La conclusión es obvia: podemos suponer provisionalmente que la selección natural es la causa de toda la evolución *adaptativa*, aunque no de *todos* los caracteres evolutivos, porque la deriva genética también ha desempeñado un papel.

Es cierto que los criadores no han convertido un gato en un perro, y que los estudios de laboratorio no han convertido una bacteria en una ameba (aunque, como hemos visto, en el laboratorio hayan aparecido nuevas especies bacterianas). Pero es necio pensar que éstas son objeciones serias a la selección natural. Las grandes transformaciones llevan tiempo, mucho tiempo. Para ver realmente el poder de la selección, tenemos que extrapolar los pequeños cambios que crea la selección durante nuestras vidas a los millones de años durante los que realmente ha trabajado en la naturaleza. Tampoco podemos ver cómo el Gran Cañón se hace más hondo, pero si miramos a ese gran abismo, con el río Colorado esculpiendo su fondo de manera insensible, aprendemos la lección más importante del darwinismo: las fuerzas débiles, aplicadas durante largos períodos de tiempo, producen cambios grandes y dramáticos.

Capítulo 6

El sexo como motor de la evolución



No podemos suponer, por ejemplo, que los machos de las aves del paraíso o los pavos reales realicen tantos esfuerzos para levantar, extender y hacer vibrar sus hermosas plumas ante las hembras sin ningún propósito.

CHARLES DARWIN

Contenido:

- 1. Las soluciones*
- 2. ¿Por qué el sexo?*
- 3. Romper las reglas*
- 4. ¿Por qué elegir?*

Pocos animales hay en la naturaleza más deslumbrantes que el macho del pavo real en plena exhibición, con su iridiscente cola verde y azul tachonada de ocelos, abierta como un abanico en pleno esplendor tras su cuerpo azul brillante. Pero esta ave parece violar todos los aspectos del darwinismo, pues los mismos caracteres que la hacen hermosa constituyen malas adaptaciones para la supervivencia. Esa larga cola provoca problemas aerodinámicos para volar, como bien sabrá cualquiera que haya visto un pavo real intentado alzar el vuelo. No hay duda de que esto debe dificultarle el ascenso a su percha en los árboles donde pasa la noche, o la huida de sus depredadores, sobre todo durante los monzones, cuando la cola mojada se convierte en una auténtica carga. Además, los colores brillantes atraen a los depredadores, especialmente por comparación con las hembras, que tienen la cola corta y el cuerpo de un color verde pardusco apagado que les sirve de camuflaje.

Los machos tienen que desviar buena parte de su energía metabólica a esta sorprendente cola, que crece completamente de nuevo cada año.

El plumaje del pavo real no sólo parece inútil, también un impedimento. ¿Cómo puede ser una adaptación? Y si los individuos con este plumaje dejan más genes, como cabe esperar si tal atuendo evolucionó por selección natural, ¿por qué las hembras no son igual de resplandecientes? En una carta dirigida al biólogo norteamericano Asa Gray en 1860, Darwin se quejaba amargamente de esta cuestión: «Aún recuerdo los tiempos en que el solo pensamiento del ojo me producía escalofríos, pero he superado esa fase de lamentación y ahora suelen ser los detalles insignificantes de estructura los que me incomodan. La visión de una pluma de la cola de un pavo real, cada vez que la observo, ¡me marea!».

Los enigmas como el de la cola del pavo real son abundantes. Ahí está, sin ir más lejos, el extinto alce irlandés (mal nombre para un animal que ni era alce ni exclusivo de Irlanda; fue el mayor de los ciervos jamás descrito y vivió en toda Europa y Asia). Los machos de esta especie, que desaparecieron hace sólo diez mil años, ostentaban una enorme cornamenta con una envergadura de ¡más de 3,5 metros de punta a punta! Con un peso de unos cuarenta kilos, se asentaba en un insignificante cráneo de unos dos kilos y medio. Qué presión no debía causar: como andar todo el día con un adolescente sobre la cabeza. Para colmo de males, como pasaba con la cola del pavo real, la cornamenta se rehacía completamente cada año.

Aparte de los caracteres llamativos, hay conductas extrañas que se observan en uno solo de los sexos. Los machos de las ranas túngara de América Central usan sus sacos vocales inflables para cantar cada noche unas largas serenatas. Sus canciones atraen la atención de las hembras, pero también de los murciélagos y las moscas hematófagas (que se alimentan de sangre), que depredan sobre los machos de rana mucho más que sobre las hembras, que no cantan. En Australia, los machos de las aves de emparrado construyen con palitos unos grandes y extraños «emparrados» que, dependiendo de la especie, tienen la forma de un túnel, de una seta o de una tienda. Estas estructuras están decoradas con todo tipo de ornamentos: flores, conchas de caracoles, bayas, vainas de semillas y, cuando cerca viven humanos, tapones de botellas, trozos de vidrio y papel de aluminio.

Tardan horas en construir estos emparrados, a veces días (algunos llegan a medir tres metros de alto por uno y medio de ancho), pero no los usan como nido. ¿Por qué se toman tanto trabajo los machos?

No tenemos que limitarnos a especular, como hizo Darwin, que estos caracteres reducen la supervivencia. Durante los últimos años los científicos han medido el coste que pueden llegar a tener. El macho del obispo de collar rojo³⁴ <C:\Users\Sergito\AppData\Roaming\Microsoft\Text\notas.xhtml - nota34> es de color negro brillante, con un collar y una mancha en la cabeza de un intenso color carmesí, y unas larguísimas plumas en la cola, más o menos el doble de largas que su cuerpo. Cualquiera que vea el macho en pleno vuelo, luchando por avanzar mientras su larga cola se bambolea a su espalda, no puede sino preguntarse por esa cola. Sarah Pryke y Steffan Andersson, de la Universidad Göterborg, de Suecia, capturaron un grupo de machos en América del Sur y les cortaron la cola, reduciéndola en unos dos centímetros y medio en un grupo y unos diez en otro. Por medio de varias recapturas realizadas a lo largo del verano, descubrieron que los machos con la cola larga perdían una cantidad de peso significativamente mayor que los de cola corta. No cabe duda de que esas largas colas suponen una desventaja.

También lo son los colores brillantes, como se ha demostrado mediante un ingenioso experimento con el lagarto de collar. En este lagarto de unos treinta centímetros que vive en el oeste de Estados Unidos, los dos sexos tienen un aspecto muy distinto: los machos exhiben un cuerpo turquesa, con la cabeza amarilla, collar negro y manchas blancas y negras, mientras que las hembras son de color gris pardo con pocas manchas. Para contrastar la hipótesis de que el color brillante de los machos atrae a más depredadores, Jerry Husak y sus colegas de la Universidad Estatal de Oklahoma pusieron en el desierto unos modelos de arcilla pintados como los machos o como las hembras. La arcilla blanda conservaba las marcas de los mordiscos de los depredadores que confundían los modelos con animales de verdad. Tras sólo una semana, treinta y cinco de los cuarenta modelos chillones de los machos presentaban marcas de mordiscos, la mayoría de serpientes y aves,

³⁴ Ave paseriforme del África subsahariana (*Euplectes ardens*). (N. del t.)

mientras que ninguno de los cuarenta modelos sosos de las hembras había sido atacado.

Los caracteres que difieren entre los machos y las hembras de una especie, como la cola, el color y las canciones, reciben el nombre de *dimorfismos sexuales*, del griego «dos formas». (La Figura 23 muestra varios ejemplos.).

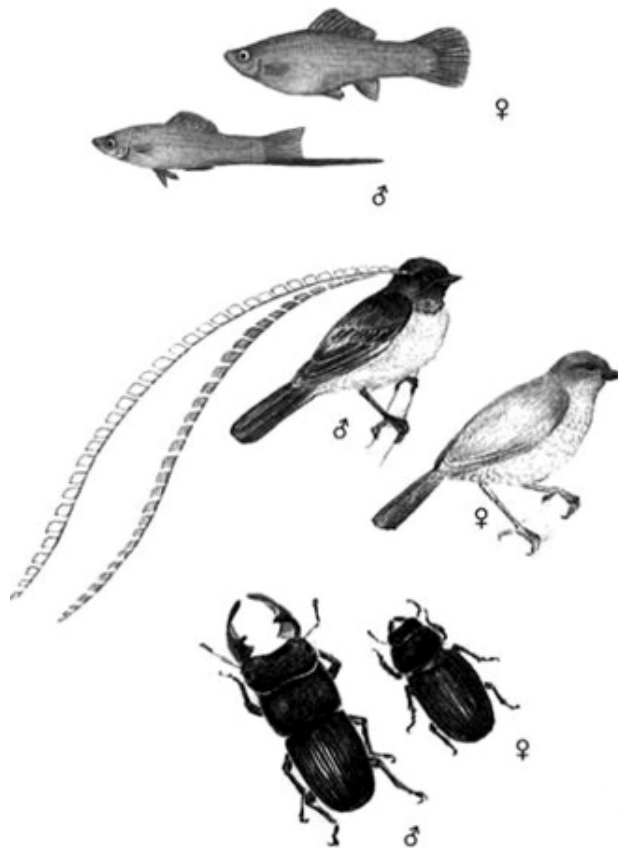


Figura 23. Ejemplo de dimorfismo sexual donde se muestran marcadas diferencias en el aspecto de machos y hembras. Arriba: el cola de espada (Xiphophorus helleri); en medio: ave del paraíso del rey de Sajonia (Pteridophora alberti), cuyos machos poseen elaborados ornamentos en la cabeza de color azul celeste por un lado y pardos por el otro; abajo: un ciervo volante (Aegus formosae). Ilustraciones de Kalliopi Monoyios.

Los biólogos han encontrado repetidas veces que los caracteres sexualmente dimórficos en los machos parecen violar la teoría de la evolución, pues derrochan tiempo y energía y reducen la supervivencia. Los coloridos machos de los gupis

acaban siendo comidos más a menudo que las hembras, que pasan más desapercibidas. El macho de la collalba gris, un pájaro mediterráneo, construye laboriosamente unos grandes hitos con piedras apiladas en distintos lugares, apilando en ellos hasta cincuenta veces su propio peso en guijarros a lo largo de un par de semanas. El macho del gallo de las artemisas realiza una elaborada exhibición, contoneándose arriba y abajo por la pradera, y aleteando mientras produce unos fuertes sonidos que emanan de dos grandes sacos vocales.³⁵ Tanto lucimiento puede quemar una enorme cantidad de energía para estas aves. Si la selección es responsable de esos caracteres, y dada su complejidad debería serlo, necesitamos explicar de qué modo.

1. Las soluciones

Antes de Darwin, el dimorfismo sexual era un misterio. Entonces, igual que ahora, los creacionistas no podían explicar por qué un diseñador sobrenatural había producido caracteres en un sexo, y sólo en uno, que perjudicaban a su supervivencia. Como gran explicador de la diversidad de la naturaleza, Darwin naturalmente estaba ansioso por entender cómo habían evolucionado aquellos rasgos en apariencia inútiles. Por fin comprendió la clave para explicarlos: cuando los caracteres difieren entre los machos y las hembras de una especie, las elaboradas conductas, estructuras y ornamentos están casi siempre restringidos a los machos.

A estas alturas, el lector ya se habrá imaginado cómo evolucionaron estos caracteres tan costosos. Hay que recordar que en realidad la moneda de cambio de la selección no es la supervivencia, sino el éxito reproductor. Tener una cola estrafalaria o un canto seductor no ayuda a sobrevivir, pero puede incrementar la probabilidad de dejar descendencia, y así es como surgieron estas conductas y rasgos ostentosos. Darwin fue el primero en reconocer este compromiso, y acuñó un nombre para el tipo de selección responsable de los caracteres sexuales dimórficos: *selección sexual*. La selección sexual es sencillamente la selección que aumenta las probabilidades de que un individuo consiga pareja. No es más que un

³⁵ Puede verse un vídeo de machos del gallo de las artemisas contoneándose en un lek ante las hembras en http://www.youtube.com/watch?v=qcWx2VbT_j8.

caso particular de la selección natural, pero merece un capítulo aparte por la forma única en que actúa y por las soluciones aparentemente no adaptativas que produce. Los caracteres seleccionados sexualmente evolucionan sólo cuando compensan la reducción de la supervivencia con un aumento de la reproducción. Quizá los obispos de collar rojo con una cola más larga no escapan muy bien de los depredadores, pero las hembras los prefieren como pareja. Los ciervos con mayor cornamenta se las ven y se las desean para sobrevivir con esa carga metabólica, pero quizá así ganan más peleas durante las berreas, y por tanto dejan más descendencia.

La selección sexual se presenta en dos formas. La primera, ejemplificada por las enormes astas del alce irlandés, es la *competencia directa entre machos* por las hembras. La otra, la que produce la larga cola del obispo de collar rojo, es la *selectividad de las hembras* entre los machos posibles. La competencia entre machos (lo que Darwin, con su terminología a menudo pugnaz, llamaba «ley de la batalla») es la más fácil de entender. Como Darwin hizo notar, «es una certeza que en casi todos los animales se produce una lucha entre los machos por la posesión de las hembras». Cuando los machos de una especie luchan entre sí de manera directa, ya sea haciendo chocar las cornamentas como en los ciervos, intentado clavarse los cuernos como en el caso del ciervo volante, golpeándose la cabeza como en las moscas de ojos pedunculados o mediante enfrentamientos sangrientos, como en los enormes elefantes marinos, consiguen llegar a las hembras echando a un lado a sus competidores. La selección favorecerá cualquier carácter que promueva tales victorias en tanto en cuanto el aumento de la posibilidad de obtener pareja iguale y supere la reducción de la supervivencia. Este tipo de selección produce armamentos: armas más fuertes, cuerpo de mayor tamaño o cualquier cosa que ayude a un macho a ganar en un enfrentamiento físico.

En cambio, los caracteres como los colores intensos, los ornamentos, los emparrados y las exhibiciones de cortejo están moldeados por el segundo tipo de selección sexual, la elección del macho. A los ojos de las hembras, no todos los machos son iguales. Algunos rasgos y conductas de los machos les resultan más atractivos que otros, así que los genes que producen esos caracteres se acumulan en las poblaciones. Existe aquí también un elemento de competencia entre los machos, pero es indirecto: los machos que ganan tienen las voces más altas, los

colores más vivos, las hormonas más atrayentes, las exhibiciones más sensuales... pero, en contraste con la competencia entre machos, el ganador lo deciden las hembras.

En ambos tipos de selección sexual, los machos compiten por las hembras. ¿Por qué no al revés? Enseguida veremos que todo depende de la diferencia de tamaño entre dos células diminutas: el espermatozoide y el óvulo.

Pero ¿es realmente cierto que los machos que ganan las batallas, o que están más ornamentados, o que realizan las mejores exhibiciones, se llevan más parejas? Si no fuera así, la teoría entera de la selección sexual se caería por su propio peso.

La realidad es que las pruebas y observaciones de que disponemos apoyan sin resquicios la teoría. El elefante marino septentrional de la costa pacífica de América del Norte presenta un dimorfismo sexual extremo en el tamaño. Las hembras no miden más de unos tres metros de largo y pesan unos 700 kilos, mientras que los machos pueden ser el doble de grandes y llegan a pesar hasta 2.730 kilos, o sea, que son más grandes y pesan más del doble que un Volkswagen. Además, son *políginos*: los machos se aparean con más de un hembra durante la misma época de cría. Aproximadamente un tercio de los machos controlan un harén de hembras con las que se aparean (¡hasta un centenar de parejas para un macho alfa!), mientras que el resto de los machos están condenados a la soltería. Quién gana y quién pierde en la lotería del apareamiento es algo que se decide mediante feroces combates entre los machos antes incluso de que las hembras se arrastren hasta la playa. En estos sangrientos combates los grandes machos golpean sus enormes masas unos contra otros, se infligen profundas heridas en el cuello con sus colmillos, y el resultado es una jerarquía de dominancia en cuya cima se hallan los machos más grandes. Cuando llegan las hembras, los machos dominantes las conducen hasta sus harenes y rechazan a los machos rivales. En un año determinado, la mayoría de los cachorros son hijos de unos pocos machos más grandes.

Esto es competencia entre machos, pura y simple, y el premio es la reproducción. Es fácil ver que, con este sistema de apareamiento, la selección sexual promoverá la evolución de machos grandes y fieros, pues son los más grandes, no los pequeños, los que pasan sus genes a la siguiente generación. (Las hembras, que no

tienen que luchar, supuestamente tienen un peso cercano al óptimo para la reproducción.) El dimorfismo sexual del tamaño corporal de muchas especies, incluida la nuestra, podría deberse a la competencia entre los machos por las hembras.

Los machos de las aves a menudo compiten con fiereza por el espacio. En muchas especies, los machos atraen a las hembras sólo cuando controlan un trozo de tierra con buena vegetación y adecuado para la nidificación. Una vez conseguida su parcela, los machos la defienden con exhibiciones visuales y vocales, y por supuesto con ataques directos a los machos que se acerquen demasiado. Muchos de los cantos de pájaro que nos deleitan los oídos son en realidad amenazas, advertencias dirigidas a otros machos para que se mantengan alejados.

El turpial de hombros rojos de América del Norte defiende territorios en hábitats abiertos, por lo general zonas pantanosas de agua dulce. Igual que el elefante marino, esta especie es polígina, y algunos machos tienen hasta quince hembras nidificando en su territorio. Muchos otros machos, los llamados «flotantes», se quedan sin pareja. Los flotantes intentan constantemente invadir los territorios establecidos para copular de extranjería con las hembras, así que los machos residentes están siempre muy ocupados intentando echarlos. Hasta una cuarta parte de su tiempo se la pasa el macho protegiendo activamente su territorio. Además de patrullar por su terreno, los machos de turpial defienden su territorio cantando complejas canciones y realizando exhibiciones amenazadoras con su ornamento epónimo, una charretera de color rojo vivo que llevan en el hombro. (Las hembras son de color pardo, a veces con una charretera pequeña y vestigial.) Las charreteras no están ahí para atraer a las hembras, sino para amenazar a otros machos en las batallas por el territorio. Si experimentalmente se borran las charreteras de los machos pintándolas de negro, el 70 por 100 de los machos pierden su territorio, en comparación con sólo un 10 por 100 de los machos que sirven de control en el experimento, cuya charretera se pinta con un disolvente transparente. Las charreteras probablemente mantienen a los intrusos a raya señalando que un territorio está ocupado. El canto también es importante. Los machos enmudecidos, privados temporalmente de su capacidad de cantar, también pierden territorios.

En los turpiales, pues, el canto y el plumaje ayudan al macho a conseguir más parejas. En los estudios descritos anteriormente, y en muchos otros, los investigadores han mostrado que la selección sexual está actuando porque los machos con los rasgos más elaborados obtienen un beneficio mayor en términos de descendencia. Esta conclusión parece simple pero ha precisado cientos de horas de tedioso trabajo de campo por parte de biólogos animados por la curiosidad. La secuenciación de ADN en un reluciente laboratorio puede parecer mucho más glamuroso, pero sólo ensuciándose en el campo puede un científico decirnos cómo opera la selección en la naturaleza.

La selección sexual no se agota en el acto sexual: los machos pueden continuar compitiendo incluso después de aparearse. En muchas especies, las hembras se aparean con más de un macho en un breve período de tiempo. Después de que un macho haya inseminado a una hembra, ¿cómo puede impedir que otros machos la fecunden y le roben la paternidad? Esta *competencia postapareamiento* ha producido algunos de los rasgos más curiosos que haya fabricado la selección sexual. A veces un macho se queda con la hembra después de aparearse para impedir que accedan a ella otros pretendientes. Cuando vemos un par de libélulas enganchadas, es probable que el macho simplemente esté controlando a la hembra después de fecundarla, bloqueando físicamente el acceso a otros machos. Un milpiés de América Central ha llevado el control de la hembra al extremo: después de fecundarla, el macho monta sobre su cuerpo durante varios días para impedir que algún competidor se lleve sus huevos. También se pueden usar sustancias químicas para conseguir lo mismo. La eyaculación de algunas serpientes y roedores contiene sustancias que de manera temporal obstruyen el tracto reproductor de la hembra después del apareamiento, impidiendo que otros machos puedan copular con ella. En el grupo de las moscas de la fruta con las que investigo, el macho inyecta en la hembra un antiafrodisíaco, una sustancia química que lleva en el semen para quitarle las ganas de aparearse durante varios días.

Los machos utilizan todo tipo de armas defensivas para proteger su paternidad. Pero pueden ser aún más taimados y utilizar armas *ofensivas* para deshacerse del esperma de los machos que hayan copulado antes que ellos, y reemplazarlo con el propio. Uno de los artilugios más ingeniosos es el «pene en escobilla» de algunos

caballitos del diablo. Cuando un macho se aparea con una hembra que ya había sido fecundada, utiliza las cerdas dirigidas hacia atrás de su pene para extraer el esperma de los machos que lo precedieron. Sólo después de haber limpiado a la hembra de esperma le transfiere el suyo propio. Con las moscas del género *Drosophila*, mi propio laboratorio descubrió que la eyaculación de un macho contiene sustancias que inactivan el esperma almacenado de los machos que hayan copulado antes.

¿Y qué pasa con la segunda forma de selección sexual, la elección de pareja? En comparación con la competencia entre machos, es mucho menos lo que sabemos sobre cómo funciona este proceso. La razón es que el significado de los colores, el plumaje y la exhibición es mucho menos obvio que el de las cornamentas y otras armas.

Para entender cómo ha evolucionado la elección de pareja, comencemos por esa enojosa cola de pavo real que tanta angustia causaba a Darwin. Buena parte de las investigaciones sobre la elección de pareja en el pavo real han sido realizadas por Marion Petrie y sus colegas, que estudiaron una población asilvestrada en Whipsnade Park, en Bedfordshire (Inglaterra). En esta especie los machos se reúnen en *leks*, los lugares donde todos juntos hacen sus exhibiciones, ofreciendo así a las hembras la oportunidad de compararlos directamente. No todos los machos participan en el *lek*, pero sólo quienes lo hacen pueden conseguir una hembra. En un estudio observacional de diez machos que participaban en un *lek* se encontró una fuerte correlación entre el número de ocelos en las plumas de la cola del macho y el número de apareamientos conseguidos: el macho más ornamentado, con 160 ocelos, consiguió el 36 por 100 de todas las cópulas.

Esto sugiere, pero no demuestra, que las colas más ornamentadas son las preferidas por las hembras. Es posible que algún otro aspecto del cortejo del macho, por ejemplo el vigor de su exhibición, sea realmente lo que las hembras eligen, y que este otro aspecto esté correlacionado con el plumaje. Para descartar esta posibilidad, pueden realizarse manipulaciones experimentales: cambiar el número de ocelos en la cola de un pavo real y ver si esto afecta a su capacidad de conseguir parejas. Curiosamente, este mismo experimento fue sugerido ya en 1869 por el competidor de Darwin, Alfred Russel Wallace. Aunque los dos hombres se

mostraban de acuerdo en muchas cosas, y en particular en la selección natural, discrepaban sobre la selección sexual. La idea de la competencia entre machos no era un problema para ninguno de los dos, pero Wallace desaprobaba la posibilidad de la elección por las hembras. No obstante, mantuvo una actitud abierta sobre esta cuestión, y se adelantó mucho a su tiempo cuando sugirió cómo contrastarla:

La parte que desempeñaría sólo el ornamento sería muy pequeña, aunque estuviera demostrado, que no lo está, que una ligera superioridad únicamente en el ornamento decida usualmente la elección de pareja.

Esto, sin embargo, es un aspecto que se presta a la experimentación, y me permito sugerir que algún miembro de la Sociedad Zoológica o cualquiera que disponga de los medios, intente realizar tales experimentos. Debería elegirse para ello una docena de machos de la misma edad —de gallos domésticos, faisanes comunes o faisanes dorados, por ejemplo—, todos ellos de condición que se sepa aceptable para las hembras del ave. A la mitad de éstos debería cortárseles una o dos plumas de la cola, o reducir un poco de tamaño las plumas del cuello, apenas lo justo para producir una diferencia que pudiera darse en la naturaleza, pero que no llegue a desfigurar al ave, y luego se debería observar si las hembras notan de algún modo la deficiencia, y si de manera uniforme rechazan a los machos menos ornamentados. Tales experimentos, si se realizan con todo el cuidado y se varían de manera juiciosa durante varias estaciones, arrojarían información muy valiosa sobre esta interesante cuestión.

Estos experimentos no se realizaron hasta más de un siglo después. En cualquier caso, por fin tenemos los resultados: la elección por la hembra es común. En uno de estos experimentos, Marion Petrie y Tim Halliday cortaron veinte ocelos de la cola de cada uno de los machos de un grupo de pavos reales, y compararon su éxito de apareamiento con el de un grupo de control que fue manipulado, pero sin cortarle nada. En la siguiente época de cría los machos con reducción de ornamentos consiguieron por término medio 2,5 apareamientos menos que los machos del grupo de control.

Este experimento sugiere claramente que las hembras prefirieron a los machos cuyos ornamentos no habían sido reducidos. Pero, idealmente, deberíamos hacer el experimento también en el sentido contrario: ornamentar *más* las colas para ver si de este modo se aumenta el éxito de apareamiento. Esto es difícil de hacer en los pavos reales, pero el biólogo sueco Malte Andersson ha logrado hacerlo con un ave territorial, el obispo de cola larga (*Euplectes progne*). En esta especie sexualmente dimórfica, los machos tienen colas de unos cincuenta centímetros de longitud y las hembras de sólo siete centímetros. Andersson cortó una parte de la larga cola de algunos machos y algunas de las partes cortadas las pegó a las colas normales de otros machos; de este modo, consiguió tener un grupo de machos de cola corta (15 centímetros), un grupo de control con la cola normal (con la cola cortada y vuelta a pegar) y un grupo de cola larga (75 centímetros). Tal como se esperaba, los machos de cola corta consiguieron atraer a menos hembras para que nidificasen en su territorio por comparación con los machos normales. Y los machos con la cola artificialmente larga obtuvieron un aumento fenomenal del número de apareamientos, atrayendo casi el doble de hembras que los machos normales.

Esto plantea una pregunta: si los machos con una cola de 75 centímetros consiguieron más hembras, ¿por qué los obispos no habían evolucionado ya hasta obtener una cola tan larga? No sabemos la respuesta, pero es probable que una cola tan larga reduzca la longevidad del macho más de lo que aumenta su capacidad para conseguir parejas. Cincuenta centímetros probablemente sea la longitud para la cual se obtenga, por término medio, el mayor número de descendientes en el curso de la vida reproductora.

¿Y qué consiguen los machos del gallo de las artemisas con sus arduas payasadas en la pradera? Una vez más, la respuesta es más apareamientos. Como los pavos reales, los machos del gallo de las artemisas forman *leks* para exhibirse en masa mientras las hembras pasan revista. Se ha podido mostrar que sólo los machos más vigorosos, los que «aletean» alrededor de ochocientas veces al día, consiguen hembras, y que la gran mayoría de los machos se quedan sin aparearse.

La selección sexual también explica las proezas arquitectónicas de las aves de emparrado. Varios estudios han mostrado que los tipos de emparrado, que difieren entre especies, están correlacionados con el éxito en el apareamiento. Por ejemplo,

en el capulínero satinado, los machos consiguen más hembras si ponen más plumas azules en sus emparrados. En el capulínero moteado, el mayor éxito se obtiene adornándolos con bayas verdes de *Solanum* (una especie de tomate silvestre). Joah Madden, de la Universidad de Cambridge, quitó las decoraciones de los emparrados de capulíneros moteados y luego ofreció a los machos sesenta objetos entre los que elegir. Indefectiblemente, volvieron a decorar sus emparrados sobre todo con bayas de *Solanum*, que colocaron en los lugares más visibles.

Me he centrado en las aves porque a los biólogos les ha resultado más fácil estudiar la elección de pareja en este grupo debido a que las aves son activas durante el día y fáciles de observar, pero hay muchos ejemplos de elección de pareja en otros animales. Las hembras de rana túngara prefieren aparearse con machos que croan los cantos más complejos, las hembras de gupi prefieren los machos con la cola más larga y manchas de colores más vivos, y las hembras de las arañas y de los peces suelen sentir preferencia por los machos de mayor tamaño. En su exhaustiva obra *Sexual Selection*, Malte Andersson describe 232 experimentos con 186 especies que muestran que una gran variedad de rasgos de los machos están correlacionados con el éxito en el apareamiento, y la mayoría de estos ensayos implican la elección por las hembras. Sencillamente, no hay ninguna duda de que la elección por las hembras ha impulsado la evolución de muchos dimorfismos sexuales. Al final, era Darwin quien tenía razón.

Hasta este momento hemos desatendido dos cuestiones importantes: ¿por qué son las hembras quienes eligen mientras los machos las cortejan o luchan por ellas? Y ¿por qué elegir siquiera? Para responder a estas dos preguntas primero tenemos que entender por qué los organismos se molestan en tener sexo.

2 ¿Por qué el sexo?

Porqué evolucionó el sexo es, de hecho, uno de los mayores misterios de la evolución. Todo individuo que se reproduce sexualmente (es decir, fabricando óvulos o espermatozoides que contienen la mitad de sus genes) sacrifica el 50 por 100 de su contribución genética a la siguiente generación en comparación con un individuo que se reproduzca asexualmente. Supongamos que existiera en los humanos un gen cuya forma normal condujera a la reproducción sexual mientras

que su forma mutante permitiera a las hembras reproducirse *partenogénicamente*, es decir, produciendo huevos que se desarrollen sin ser fecundados. (Algunos animales se reproducen de este modo: se ha visto, por ejemplo, en pulgones, peces y lagartos.) La primera mujer mutante sólo tendría hijas, que a su vez tendrían más hijas. En cambio, las mujeres no mutantes, con reproducción sexual, tendrían que aparearse con machos, y por término medio tendrían una mitad de hijos y la otra mitad de hijas. La proporción de mujeres en la población aumentaría rápidamente por encima del 50 por 100 a medida que el conjunto de las mujeres se fuera llenando de mutantes producidas asexualmente por madres de reproducción asexual. Los machos acabarían siendo superfluos y desaparecerían: ninguna mujer mutante necesitaría aparearse con ellos, y todas las mujeres tendrían solamente hijas. El gen de la partenogénesis habría ganado la competición contra el gen de la reproducción sexual, desplazándolo. Puede demostrarse teóricamente que en cada generación los genes «asexuales» producirían el doble de copias de sí mismos que el gen «sexual» original. Los biólogos denominan a esta situación «el doble coste del sexo». El resultado final es que bajo la selección natural los genes de la partenogénesis se extienden con rapidez, eliminando la reproducción sexual.

Pero no es esto lo que ha ocurrido en la realidad. La gran mayoría de las especies de la Tierra se reproducen sexualmente, y esta forma de reproducción se viene haciendo desde hace más de 1.000 millones de años.³⁶ ¿Por qué el coste del sexo no ha conducido a que sea reemplazado por la partenogénesis? Está claro que el sexo debe ofrecer alguna ventaja evolutiva que compense con creces su coste. Aunque todavía no sabemos con certeza cuál es esa ventaja, teorías no nos faltan.

La clave podría estar en la mezcla al azar de genes que se produce durante la reproducción sexual, que genera nuevas combinaciones de genes en la descendencia. Al juntar varios genes favorables en un mismo individuo, el sexo podría promover una evolución más rápida y una mejor respuesta a aspectos del entorno que cambien continuamente, como los parásitos, que evolucionan sin tregua para contrarrestar la evolución de nuestras propias defensas. O quizá el sexo

³⁶ El organismo con reproducción sexual más antiguo identificado hasta el momento es un alga roja, en cuyos fósiles de hace 1.200 millones de años se distinguen con claridad dos sexos. Ha recibido el adecuado nombre de *Bangiomorpha pubescens*. [N. del t.: Juego de palabras entre «bang», que en inglés vulgar significa «practicar el sexo», y el género actual de algas rojas *Bangia*.]

purgue los genes malos de una especie al recombinarlos en un individuo con graves desventajas, una suerte de cabeza de turco genética. Pero los biólogos todavía se cuestionan si alguna de las ventajas conocidas compensa con creces el doble coste del sexo.

Una vez el sexo ha evolucionado, la selección sexual se sigue de forma ineludible siempre y cuando podamos explicar dos cosas más. La primera es por qué hay sólo dos sexos (y no tres o más) que tengan que combinar sus genes para producir descendencia. La segunda es por qué los dos sexos tienen un número desigual de gametos de diferente tamaño (los machos producen un montón de espermatozoides mientras que las hembras producen un número menor de óvulos de mayor tamaño). La pregunta del número de sexos es una compleja cuestión teórica que no debe detenernos, salvo para hacer notar que la teoría muestra que un sistema con dos sexos reemplaza evolutivamente a un sistema con tres o más sexos, es decir, dos sexos es la estrategia estable más robusta.

La teoría de por qué los dos sexos tienen gametos que difieren en número y en tamaño es igualmente compleja. Esta condición supuestamente evolucionó a partir de una más primitiva en la que las especies de reproducción sexual producían gametos de igual tamaño. Los teóricos han demostrado de manera bastante convincente que la selección natural favorece el cambio de este estado ancestral a un estado en el que un sexo (el que llamamos «macho») produce muchos gametos pequeños (espermatozoides o polen) y el otro (la «hembra») produce menos gametos, pero más grandes (los óvulos o huevos).

Es esta asimetría en el tamaño de los gametos lo que prepara el terreno para toda la selección sexual, pues hace que los dos sexos evolucionen hacia estrategias de apareamiento distintas. Centrémonos en el macho. Un macho puede producir grandes cantidades de espermatozoides, y por lo tanto en principio podría ser el padre de un gran número de descendientes, limitado únicamente por el número de hembras que pueda atraer y por la capacidad competitiva de sus espermatozoides. Para las hembras, en cambio, las cosas son distintas. Los óvulos son costosos y están en número limitado, y si una hembra se apareara muchas veces en un corto período de tiempo, es poco (o nada) lo que hace para aumentar el número de descendientes.

Una demostración muy vistosa de esta diferencia se puede ver en el número récord de hijos de un hombre o de una mujer. Si el lector hubiera de conjeturar cuál es el número máximo de hijos que puede tener una mujer durante toda su vida, seguramente diría en torno a quince. Mejor que pruebe otra vez. *El Libro Guinness de los récords*, nos dice que el récord «oficial» de hijos de una mujer es de sesenta y nueve, y lo ostenta una campesina rusa del siglo XIX que en los veintisiete embarazos que tuvo entre 1725 y 1745, alumbró mellizos dieciséis veces, trillizos siete veces y cuatrillizos cuatro veces. (Presuntamente tenía alguna predisposición fisiológica o genética a los embarazos múltiples.) Uno compadece a esta esforzada mujer, pero su récord es superado en mucho por el récord de un hombre, un tal Mulai Ismail (1646-1727), emperador de Marruecos. Ismail fue padre, según nos dice el *Guinness*, de «al menos 342 hijas y 525 hijos, y se dice que en 1721 tenía 700 descendientes varones». Incluso en estos extremos, los machos superan a las hembras con una descendencia diez veces mayor.

La diferencia evolutiva entre machos y hembras es una cuestión de *inversión diferencial*: inversión en huevos caros frente a espermatozoides baratos, inversión en el embarazo (cuando las hembras retienen y nutren los huevos fecundados), e inversión en el cuidado parental en las muchas especies en las que la hembra es la única que cría a los jóvenes. Para los machos, aparearse es barato; para las hembras es caro. Para los machos, el apareamiento sólo cuesta una pequeña dosis de esperma; para las hembras, cuesta mucho más: la producción de óvulos grandes y ricos en nutrientes y, con frecuencia, un enorme gasto de tiempo y energía. En más del 90 por 100 de las especies de mamíferos, la única inversión del macho en la descendencia es el esperma, pues son las hembras las que proporcionan el cuidado parental.

Esta asimetría entre machos y hembras en el número potencial de apareamientos y descendientes conduce a conflictos de intereses en el momento de escoger una pareja. Los machos tienen poco que perder apareándose con una hembra «por debajo de la media» (por ejemplo, una que sea débil o esté enferma), porque no les cuesta casi nada aparearse otra vez, y así las veces que haga falta. Por tanto, la selección favorecerá los genes que hagan machos promiscuos que intenten aparearse con todas las hembras que puedan. (O con cualquier *cosa* que se parezca

en lo más mínimo a una hembra; el gallo de las artemisas, por ejemplo, a veces intenta copular con pilas de estiércol de vaca, y, como ya hemos visto, algunas orquídeas consiguen polinizarse atrayendo a machos calientes de abeja que intentan copular con sus pétalos.)

Las hembras son distintas. A causa de su mayor inversión en huevos y descendientes, su mejor táctica consiste en ser exigentes en lugar de promiscuas. Las hembras tienen que conseguir que cada oportunidad cuente eligiendo al mejor padre posible para fecundar su limitado número de huevos. Por eso tienen que inspeccionar muy de cerca a sus pretendientes.

El resultado de todo esto es que, por lo general, los machos tienen que competir por las hembras. Los machos deberían ser promiscuos, las hembras recatadas. La vida de un macho debería ser de conflicto constante con sus iguales, siempre compitiendo con los otros machos por las parejas. Los buenos machos, más atractivos o más vigorosos, se llevarán siempre un gran número de parejas (presuntamente serán preferidos también por más hembras), mientras que los inferiores se quedarán sin aparearse. Casi todas las hembras, en cambio, acabarán por encontrar pareja. Como todos los machos compiten por ellas, su distribución de éxito de apareamiento será más uniforme.

Los biólogos describen esta diferencia diciendo que la *varianza* del éxito de apareamiento debería ser mayor para los machos que para las hembras. ¿Ocurre así? En efecto, a menudo observamos esta diferencia. En el ciervo común, por ejemplo, la variación en el número de descendientes producidos durante toda la vida es tres veces mayor entre machos que entre hembras. La disparidad es aún mayor para los elefantes marinos, en los que menos del 10 por 100 de los machos dejan *algún* descendiente a lo largo de varias épocas de cría, en comparación con más de la mitad de las hembras.³⁷

La diferencia entre machos y hembras en el número potencial de descendientes impulsa la evolución tanto de la competencia entre machos como de la elección por las hembras. Los machos tienen que competir para fecundar un número limitado de

³⁷ Conviene recordar que nos referimos a la diferencia entre machos y hembras en la varianza del éxito de apareamiento. El éxito de apareamiento promedio de machos y hembras, en cambio, tiene que ser igual, pues cada descendiente debe tener un padre y una madre. En los machos, este promedio se consigue con el éxito de unos pocos que tienen muchos hijos mientras el resto no tienen ninguno. Por otro lado, cada hembra tiene aproximadamente el mismo número de descendientes.

huevos. Por eso vemos la «ley de la batalla»: la competencia directa entre machos para dejar sus genes a la siguiente generación. Y ésta es también la razón de que los machos sean vistosos y coloridos, de que realicen exhibiciones, o emitan canciones de apareamiento, o construyan emparrados u otras cosas por el estilo, pues ésta es su forma de decir «¡escógeme!, ¡escógeme!». En último término es la preferencia de las hembras lo que impulsa la evolución de las colas largas, de las exhibiciones más vigorosas o de las canciones más sonoras en los machos.

Naturalmente, lo que acabo de describir es una generalización: hay excepciones. Algunas especies son monógamas, y tanto el macho como la hembra realizan los cuidados parentales. La evolución puede favorecer la monogamia si los machos tienen más descendientes ayudando a cuidar a las crías que si abandonan a su descendencia para buscar otras parejas. En muchas aves, por ejemplo, se necesitan los dos progenitores a tiempo completo: cuando uno sale a aprovisionarse, el otro incuba los huevos. Pero las especies monógamas no son muy comunes en la naturaleza. Sólo un 2 por 100 de todas las especies de mamíferos, por ejemplo, sigue este sistema de apareamiento.

Además, hay otras explicaciones del dimorfismo sexual en el tamaño corporal en las que no interviene la selección sexual. En las moscas de la fruta que investigo, por ejemplo, las hembras pueden ser mayores sencillamente porque necesitan producir huevos grandes y costosos. O los machos y las hembras podrían ser depredadores más eficientes si se especializan en presas distintas. La selección natural en el sentido de una reducción de la competencia entre los dos sexos puede llevarlos a evolucionar hacia tamaños corporales distintos. Esto explica el dimorfismo en algunos lagartos y aves rapaces, en los que las hembras son mayores que los machos y capturan presas más grandes.

3. Romper las reglas

Curiosamente, también encontramos casos de dimorfismo sexual en muchas especies «socialmente monógamas», es decir, en las que machos y hembras se emparejan y crían a los jóvenes juntos. Dado que los machos no parecen estar compitiendo por las hembras, ¿por qué han evolucionado hacia colores vivos y ornamentos? Esta aparente contradicción en realidad proporciona apoyo adicional a

la teoría de la selección sexual. Resulta que en estos casos las apariencias engañan. Estas especies son socialmente monógamas, pero no *realmente* monógamas.

Una de estas especies es el maluro espléndido de Australia, un ave que ha estudiado mi colega de la Universidad de Chicago, Stephen Pruett-Jones. A primera vista, esta especie parece un dechado de monogamia. Machos y hembras suelen pasar toda su vida adulta unidos por un vínculo social, marcan su territorio y comparten el cuidado parental. Sin embargo, presentan un sorprendente dimorfismo sexual en el plumaje: los machos son de un hermoso color azul y negro iridiscentes, mientras que las hembras son de un soso color gris pardo. ¿Por qué? Porque el adulterio abunda. Cuando llega el momento de aparearse, las hembras se aparean con *otros* machos más a menudo que con su «pareja social». (Esto lo sabemos gracias a análisis de paternidad con el ADN.) Los machos juegan al mismo juego, buscando y solicitando apareamientos «extra pareja», pero aun así varían mucho más que las hembras en su éxito reproductor. La selección sexual asociada a estas parejas adultas casi con certeza condujo a la evolución de las diferencias de color entre los dos sexos. Este pájaro no es único en su comportamiento. Aunque el 90 por 100 de las especies de ave son socialmente monógamas, en las tres cuartas partes los machos y las hembras se aparean con individuos distintos de su compañero social.

La teoría de la selección sexual produce predicciones contrastables. Si sólo un sexo tiene plumaje brillante o cornamenta, realiza enérgicas exhibiciones de cortejo o construye complejas estructuras para atraer a las hembras, puede apostarse que son los miembros de ese sexo quienes compiten por aparearse con los miembros del otro. Y las especies que presentan menos dimorfismo sexual en la conducta o la apariencia deberían ser más monógamas: si los machos y las hembras se aparean y se quedan con sus parejas, no hay competencia sexual y no hay, por tanto, selección sexual. De hecho, los biólogos observan una fuerte correlación entre los sistemas de apareamiento y el dimorfismo sexual. Los dimorfismos extremos en el tamaño, el color o el comportamiento se encuentran en las especies en las que, como ocurre con las aves del paraíso o los elefantes marinos, los machos tienen que competir por las hembras, y sólo unos pocos consiguen aparearse. Las especies en las que los machos y las hembras tienen aspecto muy parecido, como los gansos,

los pingüinos y los loros, tienden a ser monógamas auténticas, ejemplos de fidelidad animal. Esta correlación es otro triunfo de la teoría de la evolución, pues sólo es predicha por la idea de la selección sexual, y no por ninguna alternativa creacionista. ¿Por qué habría de haber una correlación entre el color y el sistema de apareamiento a no ser que la evolución sea cierta? En realidad, son los creacionistas, y no los evolucionistas, quienes deberían marearse a la vista de una pluma de pavo real.³⁸

Hasta el momento hemos hablado de la selección sexual como si el sexo promiscuo fuese siempre el macho y el que escoge fuese la hembra. Sin embargo, en algunas raras ocasiones, ocurre justo al revés. Y cuando estas conductas se intercambian entre los sexos, también lo hace la dirección del dimorfismo. Vemos esta inversión en esos atractivos peces, los caballitos de mar, y en su pariente cercano el pez aguja. En algunas de estas especies no es la hembra la que pare las crías, ¡sino el macho! ¿Cómo puede ser? Aunque la hembra produce los huevos, después de fecundarlos el macho los coloca en el interior de una bolsa incubadora especializada situada en el vientre o en la cola, y los lleva consigo hasta que eclosionan. Los machos sólo llevan cada vez las crías de una hembra, y su período de «gestación» dura más tiempo del que necesita la hembra para producir huevos otra vez. Así que los machos invierten más en las crías que las hembras. Además, como hay más hembras con huevos sin fecundar que machos libres para aceptarlos, las hembras tienen que competir por los raros machos que no están «preñados». En este caso, la diferencia de estrategia reproductora entre machos y hembras queda invertida, y tal como puede esperarse de la teoría de la selección sexual, son las hembras las que están decoradas con colores vivos y ornamentos corporales, mientras que los machos son relativamente insulsos.

Lo mismo puede decirse de los falaropos, tres especies de gráciles aves limícolas que crían en Europa y América del Norte y son de los pocos ejemplos de sistema de

³⁸ Cuando se los presiona, los creacionistas explican los dimorfismos sexuales recurriendo a los misteriosos caprichos del creador. En su libro *Darwin on Trial*, el defensor del diseño inteligente Phillip Johnson responde a la pregunta del evolucionista Douglas Futuyma: «¿Realmente suponen los científicos de la creación que su Creador consideró apropiado crear un ave que no pudiera reproducirse sin más de un metro de cola que la convierte en presa fácil para los leopardos?». Y Johnson replica: «No sé qué deben suponer los científicos de la creación, pero me parece a mí que el macho y la hembra del pavo real son justamente el tipo de criaturas que un Creador caprichoso favorecería, y que un “proceso mecánico e indiferente” como la selección natural nunca permitiría desarrollar». Pero una hipótesis bien entendida y contrastable como la selección sexual sin duda triunfa frente a una apelación, imposible de contrastar, a los inescrutables caprichos de un creador.

apareamiento poliándrico («una hembra y muchos machos»). (Este raro sistema de apareamiento también se da en algunas poblaciones humanas, como los tibetanos.) Los machos de falaropo se ocupan por entero de cuidar las crías, de construir el nido y de alimentar a la pollada mientras la hembra se dedica a buscar otros machos con los que aparearse. La inversión de los machos en la descendencia es, por tanto, mayor que la de las hembras, y las hembras compiten por los machos que habrán de cuidar a sus crías. Como es de esperar, en las tres especies las hembras tienen una coloración más viva que los machos.

Caballitos de mar, peces aguja y falaropos son las excepciones que confirman la regla. Su decoración «invertida» es exactamente lo que uno esperaría encontrar si la explicación evolutiva del dimorfismo sexual fuera cierta, mientras que no tiene ningún sentido si estas especies hubieran sido especialmente creadas.

4 ¿Por qué elegir?

Volvamos ahora a la elección de pareja «normal», aquella en la que son las hembras quienes eligen. ¿Qué es exactamente lo que buscan en el momento de elegir un macho? Esta pregunta ha inspirado un célebre desacuerdo en la biología evolutiva. Alfred Russel Wallace, como ya hemos visto, dudaba incluso de que las hembras eligieran (pero, como sabemos, se equivocaba). Su propia teoría era que las hembras tenían menos colorido que los machos porque necesitaban camuflarse de los depredadores, mientras que los colores vivos y los ornamentos de los machos eran productos secundarios de su fisiología. No ofrecía ninguna explicación, sin embargo, de por qué los machos no deberían camuflarse también.

La teoría de Darwin era algo mejor. Creía con firmeza que los cantos, colores y ornamentos de los machos habían evolucionado en respuesta a la elección por las hembras. Pero ¿a qué atendían las hembras al elegir? Su respuesta fue sorprendente: pura estética. Darwin no veía razón alguna para que las hembras eligieran cosas como un canto complejo o una cola larga a no ser que les resultaran intrínsecamente atractivas. Su obra pionera sobre la selección sexual, *El origen del hombre y la selección con relación al sexo* (1871), está cargada de pintorescas descripciones antropomórficas de cómo las hembras de los animales se sienten «cautivadas» o «atraídas» por diversas características de los machos. Sin embargo,

como Wallace bien observó, todavía quedaba un problema. ¿Tenían realmente los animales, y sobre todo los más simples, como los escarabajos y las moscas, un sentido estético como el nuestro? Darwin salió del paso como pudo, alegando ignorancia:

Aunque tenemos indicios positivos de que las aves aprecian los objetos bellos y brillantes, como ocurre con las aves de emparrado de Australia, y aunque no cabe duda de que aprecian el poder del canto, debo admitir sin ambages que es sorprendente que las hembras de muchas aves y algunos mamíferos estén dotadas del gusto suficiente para apreciar los ornamentos que tenemos razones para atribuir a la selección sexual; y esto es todavía más sorprendente en el caso de los reptiles, los peces y los insectos. Pero es realmente poco lo que sabemos de la mente de los animales inferiores.

Aunque no tenía todas las respuestas, hoy sabemos que Darwin estaba más cerca de la verdad que Wallace. Sí, las hembras eligen, y esa elección parece explicar el dimorfismo sexual. Pero no tiene sentido que la preferencia de las hembras se base únicamente en la estética. Especies estrechamente emparentadas, como las aves del paraíso de Nueva Guinea, tienen machos con tipos de plumaje y conductas de apareamiento muy distintos. ¿Tan diferente es lo que es hermoso para una especie de lo que lo es para sus parientes más cercanos?

En realidad, en la actualidad tenemos muchos y buenos indicios de que las preferencias de las hembras son en sí mismas adaptativas, porque preferir ciertos tipos de macho ayuda a las hembras a diseminar sus genes. Las preferencias no son siempre una cuestión de gusto congénito y aleatorio, como Darwin suponía, sino que en muchos casos probablemente evolucionaron por selección natural.

¿Qué es lo que puede ganar una hembra al seleccionar a un macho determinado? Hay dos respuestas a esta pregunta. Puede beneficiarse *directamente*, es decir, eligiendo un macho que la ayude a producir más crías o crías más sanas *durante el acto del cuidado parental*. O puede beneficiarse *indirectamente* escogiendo un macho que tenga mejores genes que otros machos (es decir, genes que den a su

descendencia una ventaja en la siguiente generación). En cualquier caso, la evolución de las preferencias de las hembras se verá favorecida por la selección. Por la selección natural.

Veamos primero el caso de los beneficios directos. Un gen que le diga a una hembra que se aparee con machos que guarden un territorio mejor le proporcionará descendientes que estarán más nutridos o que ocuparán mejores nidos, lo que significa que sobrevivirán mejor y se reproducirán más que las crías que no hayan crecido en territorios de la misma calidad. Esto implica que la población de las crías llevará una proporción de hembras con el «gen de la preferencia» mayor que la generación anterior. A medida que pasen las generaciones y prosiga la evolución, todas las hembras llevarán los genes de la preferencia. Y si apareciera otra mutación que *incrementara* la preferencia por territorios mejores, también ésta aumentará en frecuencia. Con el tiempo, la preferencia por los machos con mejores territorios irá evolucionando y haciéndose cada vez más fuerte. Esto, a su vez, seleccionará a los machos que compitan mejor por los territorios. La preferencia de las hembras evoluciona en paralelo a la competencia entre los machos por los territorios.

Los genes que reportan beneficios *indirectos* a las hembras selectivas también se extenderán. Imaginemos que un macho tiene genes que lo hacen más resistente a las enfermedades que otros machos. Una hembra que se aparee con uno de estos machos tendrá descendencia más resistente a las enfermedades. Esto le otorga un beneficio evolutivo por haber elegido ese macho. Ahora imaginemos que además existe un gen que permite a las hembras *identificar* como pareja a los machos más sanos. Si una hembra se aparee con unos de esos machos, el resultado será un conjunto de hijos e hijas con ambos tipos de genes, los que otorgan resistencia a las enfermedades y los que llevan a *preferir* a los machos con resistencia a la enfermedad. En cada generación, los individuos más resistentes a las enfermedades, que se reproducirán con más éxito, también llevarán los genes que les dicen a las hembras que escojan a los machos más resistentes. Los genes de la resistencia se extenderán por selección natural, y los genes de la preferencia de los machos los acompañarán. De este modo aumentarán en la especie tanto la preferencia de las hembras como la resistencia a las enfermedades.

Estas dos explicaciones hipotéticas explican por qué las hembras prefieren ciertos tipos de machos, pero no por qué prefieren ciertos *caracteres* de esos machos, como los colores vivos o los elaborados plumajes. Esto probablemente pasa porque esos caracteres en particular le dicen a la hembra que un macho le proporcionará unos mayores beneficios directos o indirectos.

El pinzón mexicano (*Carpodacus mexicanus*) de América del Norte es sexualmente dimórfico respecto al color: las hembras son pardas pero los machos tienen colores vivos en la cabeza y el pecho. Los machos no defienden un territorio pero participan en el cuidado parental. Geoff Hill, de la Universidad de Michigan, encontró que en una población local los machos variaban en color desde el amarillo pálido, pasando por el naranja, hasta el rojo intenso. Para saber si el color afectaba al éxito reproductor, utilizó tintes para hacer a los machos más brillantes o más pálidos. Y, en efecto, halló que los machos de colores más intensos obtenían una cantidad significativamente mayor de parejas que los pálidos. Además, entre los pájaros no manipulados, las hembras abandonaron los nidos de los machos más pálidos más a menudo que los de los machos de colores más vivos.

¿Por qué las hembras de pinzón mexicano prefieren los machos de colores más vivos? Hill mostró que en la misma población los machos de más color alimentaban a sus pollos más a menudo que los machos más pálidos. Así que las hembras obtenían un beneficio directo, en forma de un mejor aprovisionamiento para su pollada, cuando elegían un macho de colores más vivos. (Las hembras que se apareaban con machos más pálidos podían llegar a abandonar el nido porque sus crías no recibían la alimentación adecuada.) Pero ¿por qué traen más comida los machos de colores más vivos? Probablemente lo que ocurre es que la viveza del color es un signo de su salud general. El color rojo de estos machos proviene en su totalidad de los pigmentos carotenoides de las semillas que comen: no pueden sintetizarlo ellos mismos. Los machos de colores más vivos están, por lo tanto, mejor alimentados, y probablemente gocen de mejor salud general. Al parecer, las hembras escogen a los machos de color más intenso porque el color les dice «soy un macho más capaz de llenar la despensa de la familia». Cualquier gen que haga que las hembras prefieran los machos de colores vivos les reportará un beneficio directo, de manera que la selección aumentará esa preferencia. Una vez establecida

la preferencia, cualquier macho con una mayor capacidad para convertir las semillas en plumaje de color vivo también obtendrá una ventaja, ya que conseguirá más parejas. Con el tiempo, la selección sexual exagerará el color rojo del macho. Las hembras mantienen el color pálido porque un color vivo no les reporta ningún beneficio, y en cambio las hace más visibles a los depredadores.

Escoger un macho fuerte y sano conlleva también otros beneficios. Los machos pueden llevar parásitos o enfermedades que pueden transmitir a las hembras, a las crías o a ambas, así que beneficia a las hembras evitar esos machos. El color, el plumaje y el comportamiento de un macho pueden servir de pista para saber si está enfermo o infestado: sólo los machos sanos pueden cantar con voz potente, realizar una exhibición vigorosa o producir una serie de plumas brillantes y elegantes. Si, por poner un caso, los machos de una especie son normalmente de color azul intenso, convendrá evitar aparearse con un macho de color azul pálido.

La teoría de la evolución indica que las hembras deberían preferir *cualquier* rasgo que muestre que un macho puede ser un buen padre. Basta con que haya algún gen que aumente la preferencia por ese rasgo, y que la variación en la expresión del rasgo sea una buena indicación de la condición física del macho. El resto se sigue de manera automática. En el gallo de las artemisas, unos piojos parásitos producen unos puntos de sangre en el saco vocal del macho que son muy visibles cuando, durante la exhibición de aleteo en el *lek*, el macho hincha el saco hasta el punto de ser translúcido. Los machos a los que se pinta unos falsos puntos de sangre en los sacos vocales obtienen un número significativamente menor de apareamientos, lo que sugiere que los puntos indican a las hembras que ese macho está infestado y que, literalmente, como padre sería un piojoso. La selección favorecerá los genes que promuevan no sólo la preferencia de las hembras por los sacos sin puntos, sino también el carácter que en los machos indique este problema. El saco vocal del macho se hará mayor, y la preferencia de la hembra por el saco vocal sin manchas aumentará. Esto puede conducir a la evolución de caracteres muy exagerados en los machos, como la cola ridículamente larga de los obispos. El proceso de exageración del carácter del macho sólo se frena cuando se llega al punto en que cualquier aumento adicional reduce la supervivencia del macho más de lo que atrae a las hembras y la producción neta de descendientes del macho se resiente.

¿Qué ocurre, sin embargo, con las preferencias de las hembras que proporcionan beneficios *indirectos*? El más obvio de estos beneficios es lo que un macho siempre le da a sus descendientes: sus genes. El mismo tipo de caracteres que indican que un macho es sano podrían mostrar también que está genéticamente bien dotado. Quizá los machos con colores más vivos, colas más largas o cantos más potentes puedan exhibir esos rasgos sólo si poseen los genes que los hacen sobrevivir más o reproducirse mejor que sus competidores. Lo mismo puede decirse de los machos capaces de construir complejos emparrados, o de apilar grandes mojones de piedras. Podemos imaginar muchos caracteres que podrían mostrar que un macho tiene genes que le otorgan una mayor supervivencia o una mayor capacidad reproductora. La teoría evolutiva nos dice que en estos casos habrá *tres* tipos de genes que aumentarán su frecuencia conjuntamente: los genes de un carácter «indicador» del macho que refleje que posee buenos genes, los genes que hacen que una hembra prefiera un carácter indicador, y, naturalmente, los genes «buenos» cuya presencia refleja el carácter indicador. Es una hipótesis compleja, pero la mayoría de los biólogos evolutivos creen que es la mejor explicación de los caracteres y conductas complejos de los machos.

Pero ¿cómo podemos poner a prueba el modelo de los «genes buenos»? ¿Buscan las hembras los beneficios directos o los indirectos? Una hembra puede rechazar a un macho menos vigoroso o menos vistoso, pero esto podría reflejar no tanto su pobre dotación genética como, sencillamente, una debilidad con causa ambiental, por ejemplo una infección o malnutrición. Estas complicaciones hacen que las causas de la selección sexual sean realmente difíciles de desentrañar en cada caso particular.

Quizá el mejor experimento que pone a prueba el modelo de los genes buenos sea el que realizaron Allison Welch, y sus colegas de la Universidad de Misuri, con la rana arbórea gris (*Hyla versicolor*). Los machos de esta rana atraen a las hembras con unos sonoros cantos que embelesan en las noches del sur de Estados Unidos. Los estudios realizados con ranas cautivas muestran que las hembras manifiestan una fuerte preferencia por los machos con canciones más largas. Para contrastar si esos machos tienen mejores genes, los investigadores sacaron los huevos de varias hembras y fecundaron la mitad de ellos con esperma de machos de canto largo, y la otra mitad con esperma de machos de canto corto. Los renacuajos nacidos de estos

cruces se criaron en cautividad hasta alcanzar la madurez. Los resultados fueron espectaculares. La descendencia de los machos con cantos más largos crecieron más rápido y sobrevivieron mejor el estadio de renacuajo, presentaron mayor tamaño en el momento de la metamorfosis (cuando los renacuajos se convierten en ranas) y crecieron más rápido después de la metamorfosis. Como los machos de las ranas arbóreas grises no aportan a la descendencia más que sus genes, las hembras no pueden obtener beneficios *directos* por escoger un macho que realice un canto largo. Este experimento sugiere de un modo sólido que un canto largo es señal de un macho sano con buenos genes, y que las hembras que escogen esos machos producen una descendencia genéticamente superior.

¿Y los pavos reales? Hemos visto que las hembras prefieren aparearse con los machos que tienen más ocelos en la cola. Además, los machos no participan en la cría de los pollos. Durante sus investigaciones en Whipsnade Park, Marion Petrie pudo mostrar que los machos que tienen más ocelos producen descendientes que crecen más rápido y sobreviven mejor. Es probable que al escoger las colas más adornadas, las hembras escojan los mejores genes, pues son los machos físicamente bien dotados los que pueden producir una cola más elaborada.

Estos dos estudios son toda la evidencia que tenemos hasta el momento de que las hembras escogen a los machos que tienen los mejores genes. Un considerable número de estudios no han encontrado ninguna asociación entre las preferencias de apareamiento y la calidad genética de la descendencia. Pese a ello, el modelo de los buenos genes sigue siendo la explicación preferida de la selección sexual. Que con tan pocos indicios se sostenga esta creencia podría en parte reflejar la preferencia de los evolucionistas por las explicaciones darwinistas estrictas, la creencia en que, de algún modo, las hembras deben poder discriminar entre los genes de los machos.

Existe, sin embargo, una tercera explicación de los dimorfismos sexuales, la más simple de todas. Se fundamenta en los llamados modelos de *sesgo sensorial*. Estos modelos suponen que la evolución de los dimorfismos sexuales viene impulsada sencillamente por sesgos preexistentes en el sistema nervioso de las hembras. Estos sesgos podrían ser un producto secundario de la selección natural de alguna función diferente de la elección de pareja, por ejemplo la de buscar alimento.

Pongamos por caso que los miembros de una especie han desarrollado por medio de la evolución una preferencia visual por el color rojo porque esa preferencia los ayuda a localizar bayas y frutos rojos y maduros. Si apareciera un macho mutante con una mancha de color rojo en el pecho, quizá las hembras lo preferirían sólo porque ya tienen una predilección por el color rojo. En este caso, los machos rojos tendrían una ventaja, y se produciría la evolución de un dimorfismo. (Suponemos que el color rojo representa una desventaja para las hembras porque atrae a los depredadores.) Alternativamente, quizá las hembras sencillamente tienen preferencia por los caracteres nuevos que de algún modo estimulan su sistema nervioso. Podrían, por ejemplo, preferir machos más grandes, machos que retengan su interés con exhibiciones más complejas o machos con una forma rara porque tienen un cola larga. A diferencia de los modelos descritos anteriormente, en el modelo del sesgo sensorial las hembras no obtienen ningún beneficio directo o indirecto por escoger uno u otro macho.

Para poner a prueba esta teoría se puede producir un carácter nuevo en los machos para ver si a las hembras les gusta. Esto es lo que hicieron Nancy Burley y Richard Symanski, de la Universidad de California, con dos especies de pinzones australianos. Se limitaron a pegar a la cabeza de los machos una única pluma en posición vertical, formando una cresta artificial, y luego presentaron a las hembras estos machos crestados y otros sin cresta. (Los pinzones australianos no tienen cresta, pero sí otras especies emparentadas, las cacatúas.) El resultado fue que las hembras mostraron una fuerte preferencia por los machos con cresta artificial de color blanco por comparación con los machos con cresta de color rojo o verde, o los machos normales no crestados. No sabemos por qué las hembras prefieren el blanco, pero quizá sea porque revisten su nido con plumas blancas para camuflar los huevos de la vista de los depredadores. Experimentos similares con ranas y peces muestran asimismo que las hembras tienen preferencia por caracteres a los que nunca habían estado expuestas.³⁹ El modelo del sesgo sensorial podría ser importante porque la selección natural puede crear a menudo preferencias preexistentes que ayuden a los animales a sobrevivir y reproducirse, y estas

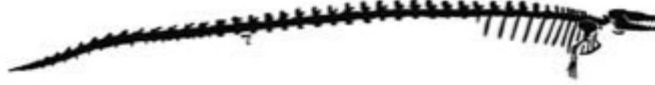
³⁹ El lector se preguntará por qué, si las hembras tienen preferencia por caracteres no expresados, esos caracteres no han llegado a evolucionar nunca en los machos. Una explicación es sencillamente que nunca llegaron a producirse las mutaciones necesarias. Otra es que las mutaciones necesarias sí que llegaron a producirse, pero reducían la supervivencia más de lo que aumentaban la capacidad para atraer parejas.

preferencias pueden ser aprovechadas por la selección natural para crear nuevos caracteres en los machos. Quizá la teoría de la estética animal de Darwin fuese parcialmente correcta, aunque antropomorfizara las preferencias de las hembras como un «gusto por la belleza».

El lector habrá echado en falta en este capítulo cualquier discusión sobre nuestra propia especie. ¿Qué pasa con nosotros? Hasta qué punto las teorías de la selección sexual se aplican a los humanos es una cuestión compleja que abordaremos en el capítulo 9.

Capítulo 7

El origen de las especies



Cada especie es una obra maestra de la evolución que la humanidad no podrá nunca reproducir aunque de algún modo logre crear organismos nuevos mediante ingeniería genética.

E. O. WILSON

En 1928 un joven zoólogo alemán llamado Ernst Mayr partió hacia las tierras salvajes de la Nueva Guinea holandesa para recolectar plantas y animales. Acababa de licenciarse en la universidad, y carecía de experiencia en el campo, pero había tres cosas que jugaban a su favor: una vieja pasión por las aves, un enorme entusiasmo y, lo más importante, el respaldo financiero de un banquero y naturalista aficionado británico llamado lord Walter Rothschild. Rothschild poseía la mayor colección privada de especímenes de aves de todo el mundo, y esperaba que los esfuerzos de Mayr ayudaran a aumentarla. Durante los dos años siguientes, Mayr recorrió dificultosamente montañas y junglas con su libreta de notas y sus artilugios de recolección. A menudo solo, fue víctima del mal tiempo, de los caminos peligrosos, de repetidas enfermedades (un problema grave en aquellos tiempos anteriores a los antibióticos), y de la xenofobia de los habitantes nativos, muchos de los cuales nunca habían visto a un occidental. Pese a todo ello, su expedición en solitario fue un enorme éxito: Mayr regresó con muchos especímenes nuevos para la ciencia, entre ellos 26 especies de aves y 38 especies de orquídeas. Su trabajo en Nueva Guinea lo lanzó a una brillante carrera como biólogo evolucionista que culminó en una cátedra en la Universidad de Harvard, donde siendo estudiante de doctorado tuve el honor de tenerlo como amigo y mentor.

Mayr vivió exactamente cien años, durante los cuales produjo un torrente continuo de libros y artículos hasta el día de su muerte. Entre ellos destaca su obra clásica de 1963, *Animal Species and Evolution*, el libro que despertó en mí el deseo de dedicarme al estudio de la evolución. En esta obra, Mayr relataba un hecho sorprendente. Cuando sumó los nombres que los nativos de las montañas Arfak de Nueva Guinea daban a las aves, descubrió que reconocían 136 tipos distintos. Los zoólogos occidentales, usando métodos tradicionales de taxonomía, reconocían 137 especies. En otras palabras, tanto los nativos como los científicos habían distinguido el mismo número de especies que vivían salvajes en la naturaleza. Esta concordancia entre dos grupos culturales con una formación y una experiencia tan distintas había convencido a Mayr, como debería convencernos a todos, de que las discontinuidades de la naturaleza no son arbitrarias, sino un hecho objetivo.⁴⁰

En efecto, quizá uno de los hechos más sorprendentes de la naturaleza es que sea discontinua. Cuando observamos a los animales y las plantas, ubicamos cada tipo en un grupo distinto sin ninguna dificultad. Cuando se mira a un felino silvestre, por ejemplo, enseguida lo identificamos como un tigre, un puma, un leopardo de las nieves, etc. Los felinos no se mezclan unos con otros en su apariencia siguiendo una serie continua de felinos intermedios. Aunque haya variación entre los individuos de un grupo (como bien saben quienes investigan con leones, cada león se distingue de los demás), los grupos se mantienen discretos en el «espacio de organismos». Vemos grupos en todos los organismos que se reproducen sexualmente.

Estos grupos distintos son los que conocemos como *especies*. A primera vista, su existencia parece un problema para la teoría de la evolución. Al fin y al cabo, la evolución es un proceso continuo. ¿Cómo puede producir, entonces, grupos de plantas y animales que son distintos y discontinuos, separados de los otros por cambios en la apariencia y el comportamiento? Cómo surgen estos grupos es el problema de la *especiación*, el origen de las especies.

Éste es, por supuesto, el título de la obra más famosa de Darwin, un título que hace pensar que tenía mucho que decir sobre la especiación. Incluso en el párrafo inicial

⁴⁰ Puede objetarse que esta concordancia sólo pone de manifiesto que todos los cerebros humanos están conectados neurológicamente de tal modo que dividen lo que realmente es un continuo de aves por los mismos puntos arbitrarios. Pero esta objeción pierde fuerza cuando se recuerda que las propias aves reconocen los mismos grupos. Cuando llega el momento de reproducirse, un macho de petirrojo corteja sólo a las hembras de petirrojo, no a las hembras de gorrión, de estornino o de corneja. Las aves, como el resto de los animales, ¡saben reconocer especies distintas!

anuncia que la biogeografía de América del Sur «parecería dar alguna luz sobre el origen de las especies, este misterio de los misterios, como lo ha llamado uno de nuestros mayores filósofos». (Con lo de «filósofo» se refería al científico británico John Herschel.) Sin embargo, la obra magna de Darwin básicamente calla sobre este «misterio de los misterios», y lo poco que dice sobre este tema es considerado confuso por los evolucionistas modernos. A lo que parece, Darwin no veía las discontinuidades de la naturaleza como un problema por resolver, o tal vez creía que estas discontinuidades de algún modo eran favorecidas por la selección natural. Sea como fuere, no logró explicar los grupos de la naturaleza de una manera coherente.

Un título más adecuado para *El origen de las especies* hubiera sido *El origen de las adaptaciones*: aunque Darwin logró entender cómo y por qué cambia *una* especie determinada a lo largo del tiempo (sobre todo por selección natural), nunca logró explicar cómo se divide una especie en dos. De muchas maneras, sin embargo, este problema de la división de especies es tan importante como el de entender cómo evoluciona una especie. Después de todo, la diversidad de la naturaleza engloba millones de especies, cada una con su propio conjunto único de caracteres. Y toda esta diversidad procede de un único antepasado ancestral. Si queremos explicar la biodiversidad, tenemos que hacer algo más que explicar cómo surgen los *caracteres* nuevos: también tenemos que explicar cómo surgen las *especies* nuevas. Y es que de no haberse producido la especiación, no habría biodiversidad, sólo una única especie que habría evolucionado durante mucho tiempo a partir de aquella primera especie.

Durante muchos años después de la publicación de *El origen*, los biólogos intentaron por todos los medios, pero sin éxito, explicar cómo un proceso continuo de evolución producía los grupos distintos que conocemos como especies. De hecho, el problema de la especiación no se abordó con seriedad hasta mediados de la década de 1930. En la actualidad, más de un siglo después de la muerte de Darwin, disponemos por fin de una visión razonablemente completa de qué son las especies y cómo surgieron. Además, disponemos de pruebas empíricas de ese proceso.

Pero antes de que podamos entender el origen de las especies necesitamos aclarar exactamente qué representan. Una respuesta obvia se fundamenta en cómo las

reconocemos: como un grupo de individuos que se parecen entre sí más que a los miembros de otros grupos. Con arreglo a esta definición, que se conoce como *concepto morfológico de la especie*, la categoría «tigre» se definiría más o menos como «el grupo que engloba a todos los grandes felinos asiáticos cuyos adultos miden más de un metro y medio de largo y tienen rayas negras verticales sobre un fondo anaranjado, con manchas blancas alrededor de los ojos y la boca». Así es como se describen las especies en las guías de campo, y así es como Linnaeus realizó la primera clasificación de las especies en 1735.

Pero esta definición tiene varios problemas. Como hemos visto en el capítulo anterior, en las especies sexualmente dimórficas los machos y las hembras pueden tener un aspecto muy distinto. De hecho, los investigadores de los primeros museos a menudo clasificaban erróneamente a las aves y los insectos de una misma especie como si pertenecieran a dos especies distintas. Es fácil de entender que se clasifique así a los machos y las hembras de los pavos reales cuando sólo se dispone de individuos disecados. Luego está el problema de la variación *dentro* de un grupo de individuos que se reproducen entre sí. Los humanos, por ejemplo, podrían clasificarse en varios grupos distintos con relación al color de los ojos: los humanos de ojos azules, los de ojos marrones y los de ojos verdes. Estos grupos son distintos sin apenas ambigüedades; ¿por qué no habríamos de considerarlos especies distintas? Lo mismo puede decirse de las poblaciones que tienen aspecto distinto en lugares distintos. Los humanos son, una vez más, un ejemplo excelente. Los inuit de Canadá son muy distintos de los miembros de la tribu !kung del sur de África, y ambos grupos difieren de los fineses. ¿Clasificamos todas estas poblaciones como especies distintas? Eso no parece correcto: al fin y al cabo, todas las poblaciones de humanos pueden cruzarse y reproducirse sin problemas. Lo mismo puede decirse de muchas plantas y animales. Por ejemplo, el sabanero melódico, un gorrión de América del Norte, se ha clasificado en treinta y una «razas» geográficas (o «subespecies») con arreglo a pequeñas diferencias en el plumaje y el canto. Pero los miembros de todas estas razas se pueden cruzar y producir descendencia fértil. ¿En qué punto las diferencias entre poblaciones son lo bastante grandes como para que podamos designarlas como especies distintas? Este concepto hace de la designación de especies un ejercicio arbitrario, pero sabemos que las especies

tienen una realidad objetiva, que no son simplemente constructos humanos arbitrarios.

A la inversa, algunos grupos que los biólogos reconocen como diferentes especies tienen una apariencia idéntica, o casi. Estas especies «crípticas» se encuentran en la mayoría de los grupos de organismos, incluidos las aves, los mamíferos, las plantas y los insectos. Yo mismo estudio la especiación en un grupo de moscas de la fruta (*Drosophila*), que comprende nueve especies. Las hembras de todas estas especies son imposibles de distinguir, incluso al microscopio, y los machos pueden clasificarse sólo atendiendo a minúsculas diferencias en la forma de los genitales. De modo parecido, el mosquito vector de la malaria, *Anopheles gambiae*, es una de siete especies que son casi idénticas, pero que difieren en el lugar donde habitan y en el huésped al que pican. Algunos no pican a los humanos y, por consiguiente, no suponen ningún riesgo de transmisión de la malaria. Para combatir la malaria con eficacia es fundamental que podamos distinguir estas especies. Además, como los humanos somos animales visuales, tendemos a pasar por alto los caracteres que no son fáciles de ver, como las diferencias en las feromonas que a menudo distinguen especies de insectos que por lo demás tienen un aspecto muy parecido.

El lector quizá se haya preguntado por qué, si estas formas crípticas son tan parecidas, creemos que en realidad se trata de especies distintas. La respuesta es que coexisten en el mismo lugar y, sin embargo, nunca intercambian genes: los miembros de una especie no pueden formar híbridos con los miembros de otra especie. (Puede probarse esto en el laboratorio mediante experimentos de cruzamiento, o directamente estudiando los genes para ver si los grupos los intercambian.) Por consiguiente, estos grupos están *reproductivamente aislados* entre sí: constituyen «acervos genéticos» distintos que no se mezclan entre sí. Parece razonable suponer que, bajo cualquier concepción realista de lo que constituye un grupo en la naturaleza, estas formas crípticas *son* distintas.

Además, cuando pensamos en la razón de que consideremos a los humanos de ojos azules y los de ojos marrones, o los inuit y los !kung, miembros de la misma especie, comprendemos que es porque pueden aparearse unos con otros y producir descendientes con combinaciones de sus genes. En otras palabras, pertenecen al *mismo acervo genético*. Cuando se piensa en las especies crípticas y en la variación

en los humanos, se llega a la conclusión de que las especies son distintas y separadas no porque *parezcan* diferentes, sino porque existen barreras entre ellas que impiden que puedan cruzarse.

Ernst Mayr y el genetista ruso Theodosius Dobzhansky fueron los primeros en darse cuenta de esto, y en 1942 Mayr propuso una definición de especie que se ha convertido en el patrón oro de la biología evolutiva. Sobre la base del criterio de la reproducción para determinar la condición de especie, Mayr la definió como *un grupo de poblaciones naturales que pueden cruzarse entre sí y que están reproductivamente aisladas de otros grupos de la misma naturaleza*. Esta definición se conoce como concepto biológico de especie, o CBE. «Reproductivamente aisladas» sólo significa que los miembros de distintas especies poseen caracteres (diferencias en la apariencia, el comportamiento o la fisiología) que les impiden cruzarse con éxito, mientras que los miembros de la misma especie pueden reproducirse sin problemas.

¿Qué es lo que impide que los miembros de dos especies parecidas se apareen? Las barreras a la reproducción son muchas. Las especies pueden no cruzarse simplemente porque sus épocas de reproducción o de floración no se solapan. Algunos corales, por ejemplo, sólo se reproducen una noche al año, cuando expulsan al agua masas de huevos y espermatozoides durante un período de unas cuantas horas. Las especies más estrechamente emparentadas que viven en la misma zona se mantienen separadas porque sus picos de reproducción están separados por varias horas, lo que impide que los huevos de una especie se encuentren con los espermatozoides de otra. Las especies de animales a menudo tienen feromonas distintas o realizan cortejos distintos, y no se encuentran unas a otras sexualmente apetecibles. Las hembras de mis especies de *Drosophila* tienen en el abdomen sustancias químicas que no resultan atractivas para los machos de otras especies. Las especies también pueden estar aisladas por preferir hábitats distintos, de manera que simplemente no llegan a encontrarse nunca. Muchos insectos se alimentan y reproducen en una sola especie de planta, y distintas especies de insectos están restringidas a especies distintas de plantas. Esto impide que se encuentren unas a otras en el momento del apareamiento. Las especies de plantas estrechamente emparentadas pueden mantenerse separadas porque utilizan

polinizadores distintos. Por ejemplo, en la misma zona de la Sierra Nevada de California viven dos especies de flores mono (*Mimulus*), que raramente se cruzan porque una especie es polinizada por abejorros y la otra por colibríes.

Las barreras de aislamiento también pueden actuar después del apareamiento. El polen de una especie de planta puede no llegar a germinar en el pistilo de otra. Si se forman fetos, pueden malograrse antes de nacer, tal como pasa cuando se cruza una oveja y una cabra. Y aun cuando los híbridos sobrevivan, pueden ser estériles: el ejemplo clásico es la vigorosa pero estéril mula, el producto del cruce de una yegua y un asno. Las especies que producen híbridos estériles claramente no pueden intercambiar genes.

Además, varias de estas barreras pueden actuar al mismo tiempo. Durante buena parte de los últimos diez años he estudiado dos especies de mosca de la fruta que viven en la isla volcánica de Sao Tomé, en la costa occidental de África. Las especies están un tanto aisladas por su hábitat; una vive en la parte superior del volcán y la otra a altitudes bajas, aunque su distribución está algo solapada. Pero también difieren en las exhibiciones de cortejo, así que incluso cuando se encuentran miembros de las dos especies, raramente se cruzan. Cuando lo hacen, el espermatozoide de una de las especies tiene poca capacidad para fecundar los huevos de la otra, así que se produce un número relativamente menor de descendientes. Y la mitad de estos híbridos, que son todos machos, son estériles. Cuando se juntan todas estas barreras, nos vemos llevados a la conclusión de que en la práctica la especie no intercambia genes en la naturaleza, algo que hemos confirmado mediante la secuenciación de ADN. Podemos, pues, considerarlas especies biológicas distintas.

La ventaja del CBE es que resuelve todos los problemas que los conceptos de especie basados en la apariencia no lograban resolver. ¿Qué son esos grupos crípticos de mosquitos? Son especies distintas porque no intercambian genes. ¿Y los inuit y los kung? Estas poblaciones no se aparean entre sí (dudo que se haya producido nunca una unión entre miembros de estas poblaciones), pero existe un flujo génico *potencial* de una a otra población a través de áreas geográficas intermedias, y no hay duda de que si se aparearan, la unión produciría

descendencia fértil. Por último, los machos y las hembras son miembros de la misma especie porque sus genes se unen en el momento de la reproducción.

Así pues, de acuerdo con el CBE, una especie es una comunidad reproductora, un acervo genético. Y esto significa que una especie es también una comunidad *evolutiva*. Si en una especie aparece una «mutación buena», por ejemplo una mutación en los tigres que aumente el tamaño de la camada en un 10 por 100, el gen que contiene la mutación se extenderá por toda la especie tigre. Pero no llegará más lejos, pues los tigres no intercambian genes con otras especies. La especie biológica es, pues, la unidad de la evolución: es, en buena medida, *lo que evoluciona*. Es por eso por lo que, de manera general, los miembros de una especie presentan una apariencia y un comportamiento muy parecidos: como todos comparten los mismos genes, responden del mismo modo a las fuerzas evolutivas. Y es el hecho de que las especies que viven en el mismo lugar no se crucen lo que no sólo mantiene las diferencias en apariencia y comportamiento entre especies, sino lo que les permite continuar divergiendo sin límites.

Pero el CBE no es un concepto infalible. ¿Qué pasa con los organismos que ya se han extinguido? No podemos comprobar su compatibilidad reproductora. Por eso los conservadores de los museos y los paleontólogos tienen que recurrir a los conceptos tradicionales basados en la apariencia y clasificar los fósiles y especímenes por su grado de similitud. Los organismos que no se reproducen sexualmente, como las bacterias y algunos hongos, tampoco se ajustan a los criterios del CBE. La cuestión de qué constituye una especie en estos grupos es compleja, y ni siquiera estamos seguros de que los organismos asexuales formen grupos distintos del mismo modo que lo hacen los sexuales.

Pero a pesar de estos problemas, el concepto de especie biológica sigue siendo el preferido por los evolucionistas para estudiar la especiación, porque va directamente al centro de la cuestión evolutiva. En el contexto del CBE, si se consigue explicar cómo se forman barreras reproductoras durante la evolución, se habrá explicado el origen de las especies.

Exactamente cómo surgen estas barreras es algo que desconcertó a los biólogos durante mucho tiempo. Por fin, alrededor de 1935, los biólogos comenzaron a realizar progresos tanto en el campo como en el laboratorio. Una de las

observaciones más importantes fue realizada por naturalistas que observaron que las llamadas «especies hermanas» (especies que son mutuamente sus parientes más cercanos) solían aparecer separadas en la naturaleza por barreras geográficas. Por ejemplo, se encontraron especies hermanas de erizos de mar a un lado y otro del istmo de Panamá. Las especies hermanas de peces de agua dulce solían habitar en cuencas de drenaje distintas. ¿Podía tener algo que ver esta separación geográfica con la aparición de estas especies a partir de un antepasado común?

Sí, respondieron los genetistas y los naturalistas, que al cabo de un tiempo propusieron cómo los efectos combinados de la evolución y la geografía podía hacer que ocurriera esto. ¿Cómo se consigue que una especie se divida en dos, separada por barreras reproductoras? Mayr sostenía que estas barreras no eran más que productos secundarios de la selección natural o sexual que hacían que las poblaciones geográficamente aisladas evolucionaran en direcciones distintas.

Supongamos a modo de ejemplo que una especie ancestral de planta con flor quedara dividida en dos por una barrera geográfica, como una cadena montañosa. Quizá la especie podía dispersarse por encima de las montañas en el estómago de unas aves. Ahora imaginemos que una de las poblaciones vive en un lugar donde hay muchos colibríes pero pocas abejas. En esa área, las flores evolucionarán en el sentido de atraer a los colibríes como polinizadores: lo más habitual es que en este caso las flores se vuelvan rojas (un color que resulta atractivo para las aves), produzcan néctar en abundancia (para premiar a las aves) y tengan tubos profundos (para los largos picos y lenguas de los colibríes). Y supongamos que la población del otro lado de las montañas encuentre invertida su situación respecto a los polinizadores: pocos colibríes y muchas abejas. De este lado, la flores probablemente evolucionarán para hacerse rosadas (un color que atrae a las abejas), tendrán nectarios cortos con menos néctar (las abejas tienen lenguas cortas y no requieren un premio de néctar tan abundante) y flores planas cuyos pétalos formasen una plataforma de aterrizaje (a diferencia de los colibríes, que se ciernen en el aire, las abejas suelen posarse para recoger el néctar). Con el tiempo, las dos poblaciones habrán divergido en la forma de sus flores y en la cantidad de néctar producido, y cada una de ellas estará especializada para ser polinizada por un único tipo de animal. Imaginemos ahora que la barrera física desaparece y que

las dos poblaciones que acababan de divergir vuelven a encontrarse en la *misma* área, que contiene tanto colibríes como abejas. Ahora estarán reproductivamente aisladas: cada tipo de flor será visitado por un polinizador distinto, así que sus genes no se mezclarán a causa de una polinización cruzada. Se habrán convertido en dos especies distintas. Éste es, de hecho, el mecanismo probable que llevó a las flores mono, mencionadas anteriormente, a divergir de su antepasado común.

Ésta es sólo una de las maneras en que puede evolucionar una barrera reproductora por medio de evolución «divergente», es decir, selección que impulsa a las distintas poblaciones en direcciones evolutivas distintas. Es fácil imaginar otros casos en que unas poblaciones geográficamente aisladas diverjan hasta el punto de que algún tiempo más tarde no puedan cruzarse. Pueden aparecer distintas mutaciones que afecten al comportamiento de los machos o pueden aparecer caracteres en distintos lugares, por ejemplo plumas rectrices largas en una población y color naranja en otra población, y que luego la selección sexual se encargue de impulsar a las poblaciones en distintas direcciones. Con el tiempo, las hembras de una población preferirían a los machos de cola larga y las de la otra, a los machos de color naranja. Si las dos poblaciones se volviesen a encontrar más tarde, sus preferencias de apareamiento les impedirían mezclar sus genes, así que se considerarían especies distintas.

¿Y qué de la esterilidad e inviabilidad de los híbridos? Éste fue un grave problema para los primeros evolucionistas, a quienes resultaba difícil ver de qué manera la selección natural podía producir características tan claramente mal adaptadas y despilfarradoras. Pero supongamos por un momento que estas características no se seleccionaron de manera directa, sino que aparecieron como productos secundarios accidentales de la divergencia genética, una divergencia causada por la selección natural o la deriva genética. Si dos poblaciones geográficamente aisladas evolucionan durante un tiempo suficiente en direcciones distintas, sus genomas pueden llegar a ser tan diferentes que, cuando se unen en un híbrido, sencillamente no funcionan bien juntos. Esto puede afectar al desarrollo y hacer que los híbridos mueran prematuramente o que, si viven, sean estériles.

Es importante entender que las especies no surgen, como pensaba Darwin, con el propósito de llenar los nichos desocupados que haya en la naturaleza. No tenemos

distintas especies porque de algún modo la naturaleza las necesite. En absoluto. El estudio de la especiación nos dice que *las especies son accidentes evolutivos*. Esos «grupos» tan importantes para la biodiversidad no evolucionaron porque aumentarían la diversidad, ni tampoco para que los ecosistemas quedaran equilibrados. Son, sencillamente, el resultado inevitable de las barreras genéticas que surgen cuando unas poblaciones aisladas en el espacio evolucionan en direcciones distintas.

En muchos sentidos, la especiación biológica recuerda a la «especiación» de dos lenguas cercanas a partir de un antepasado común (un ejemplo es el alemán y el inglés, dos «lenguas hermanas»). Al igual que las especies, las lenguas pueden divergir en las poblaciones aisladas que en otro tiempo compartían una lengua ancestral. También cambian más rápidamente cuando hay menos mezcla de individuos de poblaciones distintas. Pero así como las poblaciones cambian genéticamente por selección natural (y, a veces, por deriva genética), las lenguas humanas cambian por selección lingüística (las pronunciaciones cambian por imitación y transmisión cultural). Durante la especiación biológica, las poblaciones cambian genéticamente hasta el punto de que sus miembros ya no pueden reconocerse como parejas, o sus genes no pueden cooperar para producir un individuo fértil. De modo parecido, las lenguas pueden divergir hasta el punto de ser mutuamente ininteligibles: los hablantes ingleses no entienden el alemán, y viceversa. Las lenguas son como las especies en el sentido de que forman grupos distintos en lugar de un grupo continuo: por lo general, el habla de una persona puede adscribirse sin ambigüedad a alguna de las varias miles de lenguas humanas. El paralelo llega todavía más lejos. La evolución de las lenguas puede reconstruirse hacia el pasado, y puede dibujarse para ellas un árbol de familia, catalogando las semejanzas entre las palabras y la gramática. Esto es muy parecido a reconstruir un árbol evolutivo de los organismos a partir de la lectura del código de ADN de sus genes. También podemos reconstruir protolenguas, o lenguas ancestrales, mediante el análisis de las características que tienen en común las lenguas actuales. Así es precisamente como los biólogos predicen qué aspecto debían tener los eslabones perdidos o los genes ancestrales. Además, el origen de las lenguas es accidental: la gente no comienza a hablar un idioma distinto sólo para diferenciarse, sino que las

lenguas nuevas, igual que las especies nuevas, se forman como un producto secundario de otros procesos, como en la transformación del latín en italiano en Italia. Las analogías entre la especiación y las lenguas fueron apuntadas por primera vez por, ¿quién si no?, Darwin en *El origen*.

Pero no debemos llevar esta analogía demasiado lejos. A diferencia de las especies, los lenguajes pueden experimentar «fecundación cruzada» y adoptar frases los unos de los otros, como ocurre con el uso en el inglés de las palabras alemanas *angst* o *kindergarten*. En su ameno libro *El instinto del lenguaje*, Steven Pinker describe otras semejanzas y diferencias llamativas entre los lenguajes y las especies.

La idea de que el aislamiento geográfico es el primer paso hacia el origen de las especies recibe el nombre de *teoría de la especiación geográfica*. La teoría puede enunciarse de una forma sencilla: la evolución del aislamiento genético entre poblaciones requiere que en primer lugar se encuentren geográficamente aisladas. ¿Por qué es tan importante el aislamiento geográfico? ¿Por qué no pueden aparecer dos especies nuevas en el mismo lugar ocupado por su antepasado? La teoría de la genética de poblaciones (y un montón de experimentos) nos dice que es muy difícil dividir una población en dos partes genéticamente aisladas si retienen la oportunidad de cruzarse. Sin aislamiento, la selección que podría hacer divergir a las poblaciones tiene que trabajar a contracorriente de los cruzamientos, que constantemente ponen en contacto individuos distintos y mezclan sus genes. Imaginemos por un momento un insecto que vive en manchas de bosque en las que crecen dos tipos de plantas que le sirven de alimento. Cada una de las plantas requiere un conjunto distinto de adaptaciones para ser usada, pues tienen toxinas distintas, distintos nutrientes y distintos olores.

Pero a medida que cada grupo de insectos de un área comienza a adaptarse a una de las plantas, sus individuos también se aparean con insectos que se están adaptando a la otra planta. Esta continua mezcla impedirá que el acervo genético se divida en dos especies. Lo que probablemente ocurrirá en este caso es que al final habrá una única especie «generalista» que utilizará las dos plantas. La especiación es como la separación entre el aceite y el vinagre: siempre intentan separarse, pero no lo consiguen si constantemente están siendo mezclados.

¿Qué pruebas tenemos de la especiación geográfica? La pregunta que planteamos sobre la especiación no es *si* se produce, sino *cómo*. Ya sabemos por el registro fósil, la embriología y otros datos que las especies han divergido de antepasados comunes. Lo que queremos ver ahora es si las poblaciones geográficamente separadas se convierten en especies nuevas. No es una tarea fácil. Para empezar, la especiación en los organismos distintos de las bacterias suele ser un proceso lento, mucho más lento que la división de las lenguas. Mi colega Allen Orr y yo mismo hemos calculado que, a partir de un antecesor, hacen falta entre 100.000 años y 5 millones de años para que se produzca la evolución de dos descendientes reproductivamente aislados. Este ritmo glacial de especiación implica que, con pocas excepciones, no podemos esperar ser testigos del proceso entero, ni siquiera de una pequeña parte, durante nuestra vida. Para estudiar cómo se forman las especies tenemos que recurrir a métodos indirectos, a contrastar predicciones derivadas de la teoría de la especiación geográfica.

La primera predicción es que si la especiación depende en gran medida del aislamiento geográfico, durante la historia de la vida tienen que haberse producido muchísimas oportunidades de que unas poblaciones experimenten ese aislamiento. Al fin y al cabo, en la Tierra viven millones de especies en la actualidad. Las cadenas montañosas ascienden, los glaciares se extienden, los desiertos se forman, los continentes se mueven y las sequías dividen una masa continua de bosque en varias manchas separadas por pradera. Cada vez que ocurre alguna de estas cosas, existe la posibilidad de que una especie quede partida en dos o más poblaciones. Cuando se formó el istmo de Panamá hace unos 3 millones de años, la tierra que emergió separó poblaciones de organismos marinos a ambos lados, organismos que antes pertenecían a la misma especie. Incluso un río puede formar una barrera geográfica para muchas aves que no quieren volar sobre el agua.

Pero las poblaciones no quedan aisladas necesariamente por la formación de barreras geográficas. Pueden quedar aisladas por la dispersión accidental a gran distancia. Supongamos que unos pocos individuos inquietos, o incluso un sola hembra preñada, se extravían y acaban colonizando una costa remota. La colonia que allí se forme evolucionará aislada de sus antepasados de la población original. Esto es justamente lo que ocurre en las islas oceánicas. La probabilidad de que se

produzca este tipo de aislamiento es mayor aún en el caso de los archipiélagos, donde los individuos pueden desplazarse ocasionalmente entre las islas vecinas, quedando geográficamente aisladas en cada ocasión. Cada ronda de aislamientos proporciona una nueva oportunidad para la especiación. Por eso los archipiélagos albergan las célebres «radiaciones» de especies estrechamente emparentadas, como las moscas de la fruta en Hawái, los lagartos *Anolis* en el Caribe y los pinzones en las Galápagos.

Así que la especiación geográfica ha contado con numerosas oportunidades, pero ¿ha dispuesto del tiempo necesario? Tampoco aquí hay problema alguno. La especiación es un suceso de escisión por el que una rama ancestral se divide en dos nuevas ramas, que a su vez se vuelven a dividir más tarde, y así una y otra vez mientras el árbol de la vida se va ramificando. Esto significa que el número de especies crece de manera exponencial, aunque algunas de las ramas acaben podadas por la extinción. ¿Qué ritmo tendría que haber llevado la especiación para explicar la actual diversidad de la vida? Se ha estimado que en la Tierra viven hoy unos 10 millones de especies. Subamos esa cifra a 100 millones para tener en cuenta las especies no descubiertas. Si comenzamos con una sola especie hace 3.500 millones de años, obtendremos 100 millones de especies en la actualidad sólo con que cada especie ancestral se divida en dos tan sólo una vez cada *200 millones de años*. Como hemos visto, en la realidad la especiación se produce mucho más rápido, así que incluso si tenemos en cuenta las muchas especies que evolucionaron pero luego se extinguieron, el tiempo no supone un problema.⁴¹

Pero ¿qué pasa con la idea crucial de que las barreras para la reproducción son un producto secundario del cambio evolutivo? Esta idea al menos puede ponerse a prueba en el laboratorio. Para ello, los biólogos realizan experimentos de selección en los que fuerzan a unas plantas o unos animales a adaptarse por medio de la evolución a distintos ambientes. Estos diseños experimentales son modelos de lo que ocurre cuando unas poblaciones naturales aisladas se encuentran en un nuevo hábitat. Después de un período de adaptación, las distintas «poblaciones» se analizan en el laboratorio para ver si la evolución las ha llevado a erigir barreras a la

⁴¹ Por ejemplo, si el 99 por 100 de todas las especies producidas se hubieran extinguido, todavía necesitamos una tasa de especiación de sólo una nueva especie por especie cada 100 millones de años para producir 100 millones de especies en la actualidad

reproducción. Como estos experimentos tienen lugar a lo largo de unas docenas de generaciones, mientras que la especiación en la naturaleza se desarrolla a lo largo de miles de generaciones, no cabe esperar que veamos el origen de especies nuevas con todas las de la ley. Pero ocasionalmente podemos ver los inicios de un aislamiento reproductivo.

Sorprendentemente, incluso en estos experimentos de corta duración se producen barreras genéticas con bastante frecuencia. Más de la mitad de estos estudios (se han realizado alrededor de veinte, todos con moscas debido a su corto tiempo de generación) han dado resultados positivos, y a menudo muestran aislamiento reproductivo entre poblaciones al cabo de sólo un año después del inicio de la selección. Más a menudo, la adaptación a distintos «ambientes» (diferentes tipos de alimento, por ejemplo, o la capacidad de desplazarse hacia arriba en lugar de hacia abajo en un laberinto vertical) dan como resultado la discriminación de las poblaciones en el apareamiento. No sabemos con seguridad qué caracteres usan las poblaciones para distinguirse entre ellas, pero la formación de barreras genéticas por medio de la evolución durante períodos de tiempo tan cortos confirma una de las predicciones fundamentales de la especiación geográfica.

La segunda predicción de la teoría concierne a la propia geografía. Si por lo general las poblaciones tienen que estar físicamente aisladas unas de otras para convertirse en especies, deberíamos encontrar las especies de formación más reciente en áreas distintas pero cercanas. Podemos hacernos una idea aproximada de cuánto tiempo ha pasado desde la aparición de una especie por el grado de diferenciación entre sus secuencias de ADN, que es más o menos proporcional al tiempo transcurrido desde que se dividieron de un antepasado común. Así que podemos buscar en un grupo especies «hermanas», que tendrán el grado más alto de similitud en su ADN (y por tanto estarán más estrechamente emparentadas), y ver si se encuentran geográficamente aisladas.

También esta predicción se cumple: vemos muchas especies hermanas divididas por una barrera geográfica. Por ejemplo, a cada lado del istmo de Panamá se encuentran siete especies de camarón pistola en aguas de poca profundidad. El pariente más cercano de cada especie es otra especie del *otro* lado. Lo que debe haber ocurrido es que había siete especies ancestrales de camarón que quedaron

divididas cuando emergió el istmo desde el fondo del mar hace 3 millones de años. Cada antepasado dio lugar a una especie en el Atlántico y otra en el Pacífico. (Por cierto que los camarones pistola son un prodigio de la biología. Su nombre les viene de la forma en que matan: no tocan a sus presas sino que, al cerrar de un golpe su única y gigantesca pinza, crean una onda sónica de alta presión que atonta a sus víctimas. Los grupos grandes de estos camarones pueden ser tan ruidosos que llegan a confundir a los sonares de los submarinos.)

Con las plantas ocurre lo mismo. Es fácil encontrar pares de especies hermanas de plantas con flor en el este de Asia y el este de América del Norte. Todos los botánicos saben que estas áreas albergan una flora parecida que incluye el dragón fétido, los tuliperos y las magnolias. Una revisión de las plantas puso de manifiesto nueve pares de especies hermanas, entre ellas enredaderas de trompeta (*Campsis*), cornejos (*Comus*) y manzana india (*Podophyllum*), de los que en cada pareja hay una especie en Asia y su pariente más cercano se encuentra en América del Norte. Los botánicos creen que cada una de las parejas había sido una única especie distribuida de forma continua por los dos continentes, pero quedaron geográficamente aisladas (y comenzaron a evolucionar por separado) cuando el clima se tornó más frío y seco hace unos 5 millones de años, barriendo el bosque entre las dos áreas. Y, en efecto, la datación de estos nueve pares de especies a partir del ADN sitúa las divergencias hace unos 5 millones de años.

Los archipiélagos son un buen lugar para ver si la especiación requiere aislamiento físico. Si un grupo ha producido especies en un conjunto de islas, deberíamos encontrar que los parientes más cercanos viven en islas distintas, y no en la misma isla. (Una sola isla suele ser demasiado pequeña para permitir la separación geográfica de las poblaciones, que es el primer paso de la especiación. Varias islas, en cambio, están separadas por el agua, y deberían permitir la aparición de nuevas especies con facilidad.) Esta predicción también ha resultado ser cierta en general. En Hawái, por ejemplo, las especies hermanas de *Drosophila* casi siempre ocupan islas distintas; lo mismo puede decirse de otras radiaciones menos conocidas pero no por ello menos espectaculares, como las de los grillos ápteros y las plantas lobelia. Además, se han determinado las fechas de los eventos de especiación de

Drosophila a partir del ADN de estas moscas y, tal como se había predicho, las especies más antiguas se han encontrado en las islas más antiguas.

Una predicción más del modelo de la especiación geográfica es la suposición razonable de que este modo de especiación sigue produciéndose en la naturaleza. Si esto es cierto, deberíamos poder encontrar poblaciones aisladas de una misma especie que estén comenzando a experimentar una especiación y que, por consiguiente, presenten una moderada cantidad de aislamiento reproductor respecto a otras poblaciones. Y, en efecto, tenemos de ello numerosos ejemplos. Así ocurre con la orquídea *Satyrium hallackii*, que vive en Sudáfrica. En las partes norte y sur de este país es polinizada por esfinges y moscas de probóscide («lengua») larga. Para atraer a estos polinizadores, la evolución de la orquídea la ha llevado a desarrollar unos largos tubos de néctar en las flores; la polinización sólo puede producirse cuando las mariposas y moscas de probóscide larga se acercan a la flor lo suficiente como para introducir sus lenguas en los tubos. Pero en las regiones costeras, los únicos polinizadores son abejas de probóscide corta, y aquí la evolución de la orquídea la ha llevado a desarrollar tubos más cortos para el néctar. Si las poblaciones vivieran en una región donde hubiera los tres tipos de polinizadores, sin duda las flores de tubos largos y las de tubos cortos mostrarían cierto grado de aislamiento genético, pues las especies de probóscide larga no pueden polinizar fácilmente las flores de tubos cortos, y viceversa. También entre los animales hay numerosos ejemplos de especies en las que los individuos de poblaciones distintas tienen más dificultad para aparearse que los de la misma población.

Hay una última predicción que podemos hacer para poner a prueba la especiación geográfica: deberíamos encontrar que el aislamiento reproductor entre un par de especies físicamente aisladas aumenta lentamente con el tiempo. Mi colega Allen Orr y yo mismo hemos contrastado esta predicción examinando muchos pares de especies de *Drosophila* que habían divergido de sus respectivos antepasados comunes en distintos momentos del pasado. (Con el método del reloj molecular descrito en el capítulo 4 pudimos estimar el momento en que un par de especies comenzó a divergir contando el número de diferencias en sus secuencias de ADN.) Medimos tres tipos de barreras reproductoras en el laboratorio: la discriminación

entre parejas durante el apareamiento, y la esterilidad e inviabilidad de sus híbridos. Tal como habíamos predicho, encontramos que el aislamiento reproductor entre especies aumentaba paulatinamente con el tiempo. Las barreras genéticas entre grupos se hicieron lo bastante fuertes como para impedir completamente el cruzamiento al cabo de unos 2,7 millones de años de divergencia. Eso es mucho tiempo. Al menos en las moscas de la fruta está claro que el origen de especies nuevas es un proceso lento.

La manera en que hemos descubierto cómo surgen las especies se parece al modo en que los astrónomos descubrieron cómo «evolucionan» las estrellas con el tiempo. Ambos procesos ocurren demasiado lentamente como para que podamos presenciarlos durante nuestra vida. Pero todavía podemos entender cómo funcionan buscando instantáneas del proceso en distintos estadios evolutivos para luego juntarlas en una película conceptual. En el caso de las estrellas, los astrónomos vieron nubes dispersas de materia («nubes moleculares») en el interior de galaxias. En otros lugares vieron cómo esas nubes se condensaban formando protoestrellas. Y en otros lugares vieron protoestrellas en proceso de convertirse en estrellas, condensándose más hasta comenzar a generar luz cuando la temperatura de su núcleo ascendió lo bastante como para fusionar átomos de hidrógeno en helio. Otras estrellas eran grandes «gigantes rojas» como Betelgeuse; algunas mostraban signos de desprender sus capas más exteriores al espacio; y aun otras eran todavía pequeñas y densas enanas blancas. Montando todas estas fases en una secuencia lógica, basada en lo que sabemos de su estructura y comportamiento físico y químico, hemos podido inferir cómo se forman, persisten y mueren las estrellas. A partir de esta imagen de la evolución estelar, podemos realizar predicciones. Sabemos, por ejemplo, que las estrellas de un tamaño en torno al de nuestro sol brillan de manera constante y estable durante unos 10.000 millones de años antes de hincharse y convertirse en gigantes rojas. Como el sol tiene unos 4.600 millones de años, sabemos que nos encontramos aproximadamente a mitad de la vida de nuestro planeta, antes de que se lo trague la expansión del sol.

Lo mismo pasa con la especiación. Vemos poblaciones geográficamente aisladas que recorren todo el abanico desde aquellas que no muestran ningún aislamiento reproductor, pasando por otras con grados crecientes de aislamiento reproductor (a

medida que las poblaciones quedan aisladas durante periodos más largos), hasta llegar, al final, a la especiación completa. Vemos especies jóvenes que descienden de un antepasado común, a cada lado de barreras geográficas como los ríos o el istmo de Panamá, y en distintas islas de un archipiélago. Cuando juntamos todas estas observaciones, llegamos a la conclusión de que las poblaciones aisladas divergen, y que cuando la divergencia se prolonga durante un tiempo suficiente, se forman barreras reproductoras como subproducto de la evolución.

Los creacionistas afirman con frecuencia que si no podemos ver la evolución de una nueva especie durante nuestra vida, es que la especiación no se produce. Pero este argumento es fatuo: es como decir que como no podemos seguir el ciclo de vida completo de una misma estrella, las estrellas no evolucionan, o que como no podemos ver cómo surge un nuevo idioma, los idiomas no evolucionan. La reconstrucción histórica de un proceso es una forma absolutamente válida de estudiar ese proceso, y puede producir predicciones contrastables.⁴² Podemos predecir que el sol comenzará a agotarse de aquí a 5.000 millones de años, del mismo modo que podemos predecir que unas poblaciones sometidas en el laboratorio a selección artificial en direcciones distintas acabarán aisladas genéticamente.

La mayoría de los evolucionistas acepta que el aislamiento geográfico de las poblaciones es la forma más común de especiación. Esto significa que cuando en una misma área encontramos dos especies cercanas, que es una situación común, en realidad divergieron en el pasado cuando sus antepasados se encontraron geográficamente aislados. Pero algunos biólogos creen que las especies nuevas pueden surgir sin necesidad de separación geográfica. En *El origen*, por ejemplo, Darwin sugiere en varias ocasiones que pueden aparecer nuevas especies, especialmente de plantas, en un área pequeña y circunscrita. Y desde los tiempos de Darwin los biólogos han discutido acaloradamente sobre la probabilidad de que se produzca especiación sin barreras geográficas (lo que se conoce como especiación *simpátrica*, del griego «el mismo lugar»). El problema, como ya se ha comentado, es que resulta difícil dividir en dos un acervo genético mientras sus

⁴² Para una presentación clara de cómo reconstruye la ciencia los sucesos antiguos en la geología, la biología y la astronomía, véase Tunney, C., *Bones, Rocks and Stars: The Science of When Things Happened*, Macmillan, Nueva York, 2006 (hay trad. cast.: *Huesos, piedras y estrellas: la dotación científica del pasado*, Crítica, Barcelona, 2007)

miembros permanecen en la misma área, porque los cruzamientos entre las formas divergentes lo empujarán constantemente de vuelta a una sola especie. Las teorías matemáticas muestran que la especiación simpátrica es posible, pero sólo en condiciones muy restrictivas que tal vez sean poco frecuentes en la naturaleza.

Es relativamente fácil encontrar indicios de especiación geográfica, pero mucho más difícil encontrarlos de la especiación simpátrica. Que en una misma área veamos dos especies emparentadas no significa necesariamente que hayan surgido en esa área. Las especies cambian constantemente sus áreas de distribución siguiendo la expansión y contracción de sus hábitats al ritmo de los cambios climáticos a largo plazo, los episodios de glaciación, etcétera. Las especies emparentadas que viven en un mismo lugar pueden haber surgido allí o haber coincidido en una misma área más tarde. ¿Cómo podemos estar seguros de que dos especies relacionadas que viven en un mismo lugar realmente *surgieron* en ese lugar?

He aquí una manera de hacerlo. Podemos centrarnos en las islas de hábitat, manchas pequeñas y aisladas de tierra (como las islas oceánicas) o de agua (como los lagos de pequeño tamaño) que por lo general son demasiado pequeños para contener barreras geográficas. Si en estos hábitats hallamos especies estrechamente emparentadas, podemos inferir que se formaron de manera simpátrica, pues la posibilidad del aislamiento geográfico es remota.

Sólo tenemos unos pocos ejemplos. El mejor de ellos se refiere a los peces cíclidos de dos pequeños lagos de Camerún. Estos lagos africanos aislados, que ocupan los cráteres de sendos volcanes, son demasiado pequeños para que sus poblaciones queden separadas en el espacio (tienen una superficie de 0,5 y 3,9 kilómetros cuadrados). Pese a ello, cada uno de los lagos contiene una minirradiación de peces distinta que en cada caso desciende de un solo antepasado común: uno de los lagos tiene once especies; el otro, nueve. Ésta es quizá la mejor prueba que tenemos de la especiación simpátrica, aunque no sabemos cómo ocurrió ni por qué.

Otro de los casos corresponde a las especies de palmeras de Lord Howe, una isla oceánica situada en el mar de Tasmania, a unas 350 millas de la costa este de Australia. Aunque la isla es pequeña (unos trece kilómetros cuadrados) contiene dos especies autóctonas de plantas, la kentia y la palmera rizada, que son mutuamente sus parientes más cercanos. (La kentia quizá le resulte familiar al lector, pues es

una planta ornamental popular en todo el mundo.) Estas dos especies parecen haber evolucionado a partir de una palmera ancestral que vivió en la isla hace unos cinco millones de años. Las probabilidades de que esta especiación haya implicado un aislamiento geográfico parece ser bastante baja, sobre todo si se tiene en cuenta que ambas son polinizadas por el viento, que puede diseminar el polen sobre una gran superficie.

Hay algunos ejemplos más de especiación simpátrica, pero no son tan convincentes como éstos. Lo más sorprendente, sin embargo, es el gran número de veces que la especiación simpátrica no se ha producido aun teniendo la oportunidad. Hay muchas islas de hábitat que contienen un número considerable de especies, pero ninguna tiene en la misma isla su pariente más cercano. Es evidente que en estas islas de hábitat no se ha producido especiación simpátrica. Mi colega Trevor Price y yo mismo hemos revisado las especies presentes en islas oceánicas aisladas en busca de parientes cercanos que pudieran indicar especiación. De las cuarenta y seis islas examinadas, ni una sola contenía una pareja de especies de aves que fuesen mutuamente sus parientes más cercanos. Un resultado parecido se obtuvo para los *Anolis*, unos pequeños lagartos verdes que a menudo se encuentran en tiendas de animales. No se encuentran especies de *Anolis* estrechamente emparentadas en islas menores que Jamaica, que es lo bastante grande, montañosa y variada como para permitir la especiación geográfica. La ausencia de especies hermanas en estas islas muestra que la especiación simpátrica no puede ser común en estos grupos. También sirve de evidencia en contra del creacionismo. Después de todo, no existe ninguna razón obvia por la que un creador habría de producir especies similares de aves o lagartos en los continentes pero no en las islas alejadas. (Por «similar» me refiero a que sean tan parecidas que los evolucionistas las consideren parientes cercanos. La mayoría de los creacionistas no aceptan que dos especies puedan ser «parientes», pues ello presupone la evolución.) La rareza de la especiación simpátrica es precisamente lo que predice la teoría de la evolución, y es un apoyo más de la teoría.

Existen, sin embargo, dos formas especiales de especiación simpátrica que no sólo son comunes en las plantas, sino que nos proporcionan los únicos ejemplos de «especiación en acción», de especies que se forman en un tiempo inferior a una

vida humana. Una de ellas es la llamada *especiación aloploiploide*. Lo más curioso de esta forma de especiación es que en lugar de comenzar con poblaciones aisladas de la misma especie, comienza con la hibridación de dos especies *distintas* que viven en la misma área. Y por lo general requiere que esas dos especies distintas tengan también distinto número o tipo de cromosomas. A causa de esta diferencia, un híbrido entre las dos especies no podrá aparear adecuadamente los cromosomas en el momento de hacer el polen o los óvulos, y por lo tanto será estéril. Sin embargo, si hubiera manera de duplicar cada uno de los cromosomas de ese híbrido, cada cromosoma tendría ahora otro con el que aparearse, y el híbrido con el doble de cromosomas sería fértil. Además, sería una nueva especie, pues sería fértil en los cruzamientos con otros híbridos del mismo tipo, pero no podría cruzarse con ninguna de las especies progenitoras, pues un cruzamiento de este tipo produciría híbridos estériles con un número desparejo de cromosomas. Estos aloploiploides con «cromosomas duplicados» se producen con regularidad, dando lugar a nuevas especies.⁴³

⁴³ He aquí una descripción más detallada de cómo se forma una especie aloploiploide. Aunque el proceso no es difícil de entender, conviene prestar atención a los detalles porque hay que seguirle la pista a unos cuantos números. Con la excepción de las bacterias y los virus, cada especie lleva dos copias de cada cromosoma. Los humanos, por ejemplo, tienen cuarenta y seis cromosomas que comprenden veintidós pares u homólogos, más dos cromosomas sexuales, XX en las mujeres y XY en los hombres. Uno de los miembros de cada par de cromosomas se hereda del padre, y el otro de la madre. Cuando dos individuos de una especie producen gametos (espermatozoides y óvulos o huevos en los animales, polen y óvulos en las plantas), los cromosomas homólogos se separan y sólo uno de cada pareja va a parar a un espermatozoide, óvulo o grano de polen. Pero antes de que esto ocurra, los homólogos tienen que alinearse y aparearse para poder ser divididos adecuadamente. Si los cromosomas no pueden aparearse como es debido, el individuo no puede producir gametos y es estéril. Esta imposibilidad de aparearse se encuentra en la base de la especiación aloploiploide. Supongamos, a modo de ejemplo, que una especie de planta (seamos imaginativos y llamémosla A) tiene seis cromosomas, tres pares de homólogos. Supongamos además que una especie emparentada, la especie B, tiene diez cromosomas (cinco pares). Un híbrido entre las dos especies tendrá ocho cromosomas, tres que habrá recibido de la especie A y cinco de la especie B (hay que recordar que los gametos de cada especie sólo llevan la mitad de los cromosomas). Este híbrido quizá sea viable y vigoroso, pero tendrá problemas cuando intente producir polen u óvulos. Cinco cromosomas procedentes de una especie intentarán emparejarse con los tres cromosomas procedentes de la otra especie. Con tanto lío, la formación de gametos quedará abortada y el híbrido será estéril.

Pero supongamos que por alguna razón el híbrido consigue duplicar todos sus cromosomas, aumentándolos en número de ocho a dieciséis. Este nuevo superhíbrido será capaz de emparejar los cromosomas como es debido: cada uno de los seis cromosomas de la especie A encontrará su homólogo, y lo mismo pasará con los diez cromosomas de la especie B. Como los emparejamientos se producen de manera adecuada, el superhíbrido será fértil, pues producirá polen y óvulos con ocho cromosomas. El superhíbrido es lo que técnicamente se conoce como aloploiploide, del griego «diferente» y «múltiple». En sus dieciséis cromosomas llevará el material genético completo de sus dos especies progenitoras, A y B. Podemos esperar que su aspecto sea un poco un intermedio entre el de sus dos progenitores. Además, esta nueva combinación de caracteres quizá le permita ocupar un nuevo nicho ecológico.

El poliploide AB no sólo es fértil, sino que producirá descendencia si es fecundado por otro poliploide similar. Cada progenitor aporta ocho cromosomas a la semilla, que dará lugar a una planta AB con dieciséis cromosomas, igual que los pies parentales. Así pues, un grupo de poliploides como estos constituirá una población que podrá cruzarse y perpetuarse.

Será una nueva especie. ¿Por qué? Porque el poliploide AB estará reproductivamente aislado de sus dos especies progenitoras. Tanto si se hibrida con la especie A como si lo hace con la B, su descendencia será estéril. Supongamos que se hibrida con la especie A. El poliploide producirá gametos con ocho cromosomas, tres originarios

La especiación poliploide no siempre requiere la hibridación. Una poliploidía puede surgir simplemente de una duplicación de todos los cromosomas de una especie, un proceso que se conoce como *autoploidía*. También este proceso da como resultado una nueva especie, pues una planta autoploide puede producir híbridos fértiles al cruzarse con otra planta autoploide, pero estériles si se cruza con la especie parental original.⁴⁴

Para que se produzca cualquiera de estas dos formas de especiación poliploide, se necesita que se produzca un suceso poco frecuente en dos generaciones sucesivas: la formación y la unión de polen y óvulos con un número anormalmente alto de cromosomas. Por ello, podría pensarse que este tipo de especiación debe ser un evento muy raro. No es así. Dado que una sola planta puede producir millones de óvulos y granos de polen, un evento improbable acaba siendo probable. Las estimaciones son variadas, pero en áreas del mundo bien estudiadas se ha estimado que hasta una cuarta parte de las especies de plantas con flor se formaron por poliploidía. Por otro lado, la fracción de especies existentes que *en algún momento* de su evolución tuvieron un evento de poliploidía podría ser de hasta el 70 por 100.

de la especie A y cinco de la especie B. Éstos se unirán a los gametos de la especie A, que contendrán tres cromosomas. La planta resultante de esta unión tendrá once cromosomas, pero será estéril, pues cada uno de los cromosomas A encontrará su pareja durante la formación de los gametos, pero no así los cromosomas B. Una situación análoga se produce cuando el poliploide AB fecunda o es fecundado por la especie B: la descendencia tendrá trece cromosomas, y los cinco cromosomas A no podrán emparejarse durante la formación de gametos.

Así pues, el nuevo poliploide producirá sólo híbridos estériles cuando se aparee con cualquiera de las dos especies que le dieron origen. En cambio, cuando los poliploides se apareen entre sí, los descendientes serán fértiles, y tendrán dieciséis cromosomas como sus individuos progenitores. En otras palabras, los poliploides forman un grupo cuyos individuos pueden cruzarse entre sí y que está reproductivamente aislado de otros grupos, que es justamente lo que define a una especie biológica. Esta especie habrá surgido sin necesidad de aislamiento geográfico: por necesidad, pues dos especies sólo pueden formar un híbrido si viven en el mismo lugar.

Pero ¿cómo se forma la especie poliploide para empezar? No hace falta que profundicemos en los detalles salvo para decir que implica la formación de un híbrido entre las dos especies parentales seguido de una serie de pasos en los que esos híbridos producen unas formas de polen u óvulos poco frecuentes con un conjunto duplicado de cromosomas (unos gametos no reducidos). La fusión entre estos gametos produce un individuo poliploide en tan sólo dos generaciones. Todos estos pasos han sido documentados tanto en invernaderos como en la naturaleza.

⁴⁴ Como ejemplo de autoploidía, supongamos que los miembros de cierta especie de planta tienen catorce cromosomas, o siete pares. Un individuo podría producir ocasionalmente gametos no reducidos que contuvieran los catorce cromosomas en lugar de siete. Si este gameto se une con un gameto normal de siete cromosomas procedente de un pie de la misma especie, obtendríamos una planta semiestéril con veintinueve cromosomas: es prácticamente estéril porque durante la formación de los gametos son tres los cromosomas homólogos que intentan aparearse, en lugar de los dos habituales, y eso no funciona demasiado bien. Pero si este mismo individuo produce una vez más unos pocos gametos no reducidos con veintinueve cromosomas que se unen a gametos normales de la misma especie, se obtiene una planta autoploide de treinta y ocho cromosomas que lleva dos copias completas del genoma parental. Una población de estos individuos puede considerarse una nueva especie porque puede cruzarse con otros autoploides similares pero no con la especie parental. Esta especie autoploide tiene exactamente los mismos genes que los miembros de la especie parental, pero en dosis cuádruple en vez de doble.

Como un autoploide recién formado tiene los mismos genes que su especie progenitora, con frecuencia se parecerá a ésta. A veces los miembros de la nueva especie sólo pueden identificarse contando sus cromosomas al microscopio para ver si tienen el doble de cromosomas que los individuos de la especie parental. Como se parecen a sus progenitores, seguramente existen en la naturaleza muchas especies autoploides que todavía no han sido identificadas como tales.

Está claro que ésta es una manera común de formación de especies de plantas. Más aún, encontramos especies poliploides en casi todos los grupos de plantas (una excepción notable son los árboles). Y muchas de las plantas que utilizamos como alimento u ornamento son poliploides o híbridos estériles que tienen un progenitor poliploide; son ejemplos el trigo, el algodón, la calabaza, los crisantemos y los plátanos. Esto se debe a que los humanos vieron que los híbridos de la naturaleza poseían caracteres útiles de las dos especies parentales, o a que de manera deliberada produjeron poliploides con el propósito de crear combinaciones de genes útiles. Dos ejemplos cotidianos de nuestra cocina ilustran esto. Muchas formas de trigo tienen seis conjuntos de cromosomas que han surgido de una compleja serie de cruzamientos en los que intervinieron tres especies distintas, y que realizaron nuestros antepasados. Los plátanos comerciales son híbridos estériles entre dos especies salvajes y llevan el conjunto completo de cada una de estas dos especies. Las manchas negras del interior del plátano son óvulos abortados que no llegan a formar semilla porque sus cromosomas no pueden emparejarse correctamente. Como las plantas de plátano son estériles, sólo pueden propagarse por esquejes.

La poliploidía es mucho más rara en animales; sólo aparece de manera ocasional en peces, insectos, gusanos y reptiles. La mayoría de estas formas se reproducen asexualmente, pero hay un mamífero poliploide de reproducción sexual, la curiosa vizcacha de Argentina. Sus 112 cromosomas son los más vistos de todos los mamíferos. No entendemos por qué los poliploides animales son tan infrecuentes. Quizá tenga algo que ver con que la poliploidía altere el mecanismo de determinación del sexo mediante los cromosomas X/Y, o con la incapacidad de los animales para autofecundarse. A diferencia de los animales, muchas plantas puede autofecundarse, lo que permite a un único pie de un poliploide nuevo producir muchos individuos emparentados que serán miembros de su nueva especie.

La especiación poliploide difiere de otros tipos de especiación en que implica cambios en el número de cromosomas, no en los propios genes. Además, es extraordinariamente más rápida que la especiación geográfica «normal», puesto que una especie poliploide nueva puede aparecer en tan sólo dos generaciones. Eso es un instante en tiempo geológico. Y nos ofrece la insólita oportunidad de presenciar la aparición de una especie en «tiempo real», satisfaciendo así la

exigencia de ver la especiación en acción. Sabemos de al menos cinco nuevas especies de planta que han aparecido de este modo.

Una de ellas es el senecio de Gales (*Senecio cambrensis*), una planta con flor de la familia de las margaritas, que fue observada por primera vez en Gales del Norte en 1958. Estudios recientes han puesto de manifiesto que en realidad es un híbrido poliploide entre otras dos especies, una de ellas el senecio común o hierba caña (*Senecio vulgaris*), autóctona en el Reino Unido, y el senecio de Oxford (*Senecio squalidus*), introducido en este país en 1792, pero que no llegó a Gales hasta aproximadamente 1910. Si tenemos en cuenta la afición de los británicos por la herborización, que produce un inventario casi continuo de las plantas locales, esto significa que el senecio de Gales híbrido debe haber aparecido entre 1910 y 1958. Las pruebas de que se trata realmente de un híbrido y de que se formó por poliploidía tienen varias fuentes. Para empezar, tiene el aspecto de un híbrido, pues posee características tanto del senecio vulgar como del de Oxford. Además, tiene exactamente el número de cromosomas esperado (sesenta) para un híbrido poliploide a partir de estas dos plantas parentales (cuarenta cromosomas de una y veinte de la otra). Los estudios genéticos han revelado que los genes y cromosomas del híbrido son combinaciones de los de las especies parentales. Pero la prueba definitiva la obtuvieron Jacqueline Weir y Ruth Ingram, de la Universidad de Saint Andrews, en Escocia, cuando sintetizaron completamente la nueva especie en el laboratorio por medio de varios cruces entre sus dos especies parentales. El híbrido producido artificialmente tiene exactamente el mismo aspecto que el senecio de Gales silvestre. (Es habitual sintetizar de este modo las especies híbridas silvestres para comprobar su ascendencia.) Quedan pocas dudas, por consiguiente, de que el senecio de Gales representa una nueva especie que apareció durante el último siglo. Los otros cuatro casos de especiación en tiempo real son parecidos. En todos ellos se trata de híbridos entre una especie autóctona y una introducida. Esto implica un cierto carácter artificial, pues en cada caso los humanos han llevado unas plantas de un lugar a otro, pero es casi necesario que esto se produzca si queremos ver cómo se forman nuevas especies ante nuestros ojos. Por lo que parece, la especiación poliploide se produce con gran rapidez cuando dos especies parentales apropiadas se encuentran en el mismo lugar. Para ver cómo aparece en la naturaleza una

especie aloploiploide, tenemos que entrar en escena poco después de que las dos especies ancestrales se encuentren próximas. Esto sólo puede ocurrir después de una invasión biológica reciente.

Pero la especiación poliploide se ha producido sin testigos muchas veces en el curso de la evolución. Esto lo sabemos porque los científicos han sintetizado en invernaderos híbridos poliploides esencialmente idénticos a los que se han formado en la naturaleza mucho antes de nuestra llegada. Además, los poliploides producidos artificialmente son fértiles cuando se cruzan con los híbridos silvestres. Todo esto constituye un indicio sólido de que hemos reconstruido el origen de una especie que se formó de manera natural.

Estos casos de especiación poliploide deberían satisfacer a los críticos que no están dispuestos a aceptar la evolución si no la ven con sus propios ojos.⁴⁵ Pero incluso sin poliploidía, tenemos una gran abundancia de pruebas de la especiación. Vemos en el registro fósil cómo se dividen algunos linajes. Encontramos especies muy cercanas separadas por barreras geográficas. Y vemos cómo comienzan a surgir nuevas especies a medida que sus poblaciones desarrollan durante su evolución barreras reproductoras incipientes, unas barreras que son el fundamento de la especiación. No hay duda de que si Mr. Darwin levantara la cabeza, descubriría con placer que el origen de las especies ha dejado de ser el «misterio de los misterios».

⁴⁵ Aunque los casos de especiación no poliploide que ocurren en «tiempo real» son muy infrecuentes, hay al menos uno que parece plausible. Se trata de dos grupos de mosquitos de Londres que, aunque suelen designarse como subespecies, presentan un grado considerable de aislamiento reproductor. *Culex pipiens pipiens* es uno de los mosquitos urbanos más comunes. Sus víctimas más frecuentes son pájaros, y, como ocurre con muchas especies de mosquitos, las hembras ponen los huevos sólo después de haber chupado algo de sangre. Durante el invierno, los machos mueren pero las hembras entran en un estado parecido a la hibernación llamado «diapausa». Durante el apareamiento, los pipiens forman grandes enjambres en los que machos y hembras copulan en masa. Quince metros más abajo, en los túneles del metro londinense, vive una subespecie estrechamente emparentada, *Culex pipiens molestus*, así llamada porque prefiere picar a los mamíferos, especialmente a los que viajan en los trenes. (Se convirtió en un verdadero fastidio durante el Blitz, el bombardeo alemán sobre Londres durante la segunda guerra mundial, cuando miles de londinenses se vieron obligados a dormir en las estaciones del metro durante los ataques aéreos.) Aunque pica a ratas y humanos, *molestus* no necesita chupar sangre para poner sus huevos y, como cabe esperar de los habitantes de los túneles de temperatura templada, prefiere aparearse en espacios confinados y no realizan diapausa durante el invierno.

La diferencia en la forma de apareamiento de estas dos subespecies conduce a un fuerte aislamiento sexual entre las dos formas tanto en su entorno como en el laboratorio. Eso, unido al hecho de que existe una considerable divergencia genética entre las formas, indica que están camino de convertirse en especies distintas. De hecho, algunos entomólogos ya las clasifican de este modo: *Culex pipiens* y *Culex molestus*. Dado que la construcción del metro londinense no comenzó hasta la década de 1860 y muchas de las líneas tienen menos de un siglo, este evento de «especiación» parece haber ocurrido en tiempos recientes. Pero la historia tiene un resquicio: en Nueva York vive un par de especies parecidas, una en el exterior y la otra en los túneles del metro. Existe la posibilidad de que ambos pares de especies sean representantes de un par de especies parecidas que divergieron hace mucho más tiempo, que habitan en algún otro lugar del mundo y migraron a sus respectivos hábitats tanto en Londres como en Nueva York. Lo que necesitamos para abordar este problema, y todavía no tenemos, es un buen árbol genealógico de estos mosquitos basado en el ADN.

Capítulo 8

¿Y nosotros?



Contenido:

1. *Ancestros fósiles*
2. *Nuestra herencia genética*
3. *La espinosa cuestión de la raza*
4. *Pero ¿y ahora?*

En 1924, mientras se vestía para una boda, Raymond Dart recibió lo que habría de ser el mayor descubrimiento fósil del siglo XX. Dart era un joven profesor de anatomía en la Universidad de Witwatersrand, en Sudáfrica, pero también un antropólogo aficionado que había hecho correr la voz de que estaba buscando «hallazgos interesantes» para llenar un nuevo museo de anatomía. Mientras se vestía el esmoquin, el cartero le trajo dos cajas de rocas que contenían fragmentos de huesos excavados en una cantera de caliza cercana a Taungs, en la región del Transvaal. En sus memorias, *Adventures with the Missing Link*, Dart describe aquel momento:

Tan pronto como levanté la tapa, un escalofrío de excitación me recorrió el cuerpo. En la parte superior de la roca había lo que sin duda era el molde del interior de un cráneo. Si hubiera sido el molde endocraneal fosilizado de cualquier especie de simio, hubiera sido un gran descubrimiento, pues nunca antes se había hallado tal cosa. Pero supe desde el primer momento que lo que tenía en mis manos no era un cerebro antropeide normal y corriente. Lo que tenía, en arena consolidada con caliza, era la réplica de un cerebro tres veces más grande que el de un babuino y considerablemente mayor que el

de un chimpancé adulto. Podía apreciarse con claridad la singular imagen de las circunvoluciones y surcos del cerebro y los vasos sanguíneos del cráneo.

No era lo bastante grande para un hombre primitivo, pero incluso para un simio era un cerebro grande y abultado y, lo que era más importante, el prosencéfalo era tan grande y había crecido tanto hacia atrás que cubría casi completamente el rombencéfalo.

¿Había allí, en aquel montón de rocas, alguna cara que correspondiera al cerebro? Rebusqué febrilmente en las cajas. Mi afán se vio recompensado, pues encontré una gran piedra con una depresión en la que el molde encajaba a la perfección. Vagamente visible en la piedra había el perfil de un trozo del cráneo e incluso la parte posterior de la mandíbula inferior y un alvéolo de un diente que me decía que el rostro debía hallarse por algún lado en aquel bloque...

Permanecí en la sombra sosteniendo el cerebro con la misma codicia con la que un avaro abraza su oro, mientras mi mente se disparaba. Tenía, de eso estaba seguro, uno de los hallazgos más importantes jamás realizados en la historia de la antropología.

La desacreditada teoría de Darwin de que los antiguos progenitores del hombre probablemente habían vivido en África me vino a la mente. ¿Iba a ser yo el instrumento del hallazgo de su «eslabón perdido»?

Estas agradables ensoñaciones fueron interrumpidas por el novio, que me tiraba de la manga.

«Por Dios, Ray», me dijo, intentando reprimir la urgencia nerviosa de su voz. «Tienes que acabar de vestirme inmediatamente, o tendré que buscarme otro padrino. El coche nupcial llegará en cualquier momento.»

La preocupación del novio es comprensible. Nadie quiere descubrir el día de su boda que su padrino está más interesado en una caja llena de piedras polvorientas que

en su inminente boda. Pero es difícil no empatizar también con Dart. En *El origen del hombre*, Darwin había conjeturado que nuestra especie se había originado en África porque nuestros parientes más próximos, los gorilas y los chimpancés, se encontraban allí. Pero era poco más que un presentimiento. No había fósiles que lo respaldaran. Y entre nosotros y el antepasado común que debíamos haber compartido con los grandes simios, un ancestro con más aspecto de simio que de humano, se abría una manifiesta brecha. Aquel día de 1924 salió a la luz la primera piedra del puente que con el tiempo nos permitiría cruzar el abismo: allí, en las temblorosas manos de Dart, podía verse directamente lo que hasta entonces se había conocido de manera simplista como «el eslabón perdido». Hay que preguntarse cómo pudo atender a sus obligaciones durante la ceremonia.

Lo que Dart había encontrado en aquella caja era el primer espécimen de lo que más tarde se llamaría *Australopithecus africanus* («hombre simio austral»). Durante los tres meses siguientes, Dart realizó una meticulosa disección de la roca con la ayuda de unas agujas de calceta afiladas que le tomó prestadas a su mujer, y consiguió revelar el rostro completo. Era la cara de un niño, hoy conocido como «niño de Taung», en el que podían verse incluso los dientes de leche y los molares que comenzaban a salir. Su mezcla de caracteres de humano y de simio confirmaron la idea de Dart de que efectivamente había tropezado con los albores de la ascendencia humana.

Desde los tiempos de Dart, paleoantropólogos, genetistas y biólogos moleculares han utilizado fósiles y secuencias de ADN para determinar nuestro lugar en el árbol de la evolución. Somos simios que descendemos de otros simios, y nuestro primo más cercano es el chimpancé, cuyos antepasados divergieron de los nuestros hace varios millones de años en África. Éstos son hechos indisputables que, lejos de disminuir nuestra humanidad, deberían producir satisfacción y admiración, pues nos conectan con todos los organismos, los vivos y los muertos.

Pero no todo el mundo lo ve de esta manera. Para quienes se muestran reacios a aceptar el darwinismo, la evolución humana constituye el núcleo de su resistencia. No parece tan difícil aceptar que los mamíferos evolucionaron a partir de los reptiles, o los animales terrestres a partir de los peces. Pero nos cuesta llegar a aceptar que, igual que cualquier otra especie, evolucionamos a partir de un

antepasado que era muy distinto. Siempre nos hemos visto como si, de algún modo, estuviéramos al margen del resto de la naturaleza. Animados por la creencia religiosa de que los seres humanos son objeto especial de la creación, y por un solipsismo natural que acompaña a un cerebro que es consciente de sí mismo, nos resistimos a aceptar la lección evolutiva de que, como el resto de los animales, somos el producto contingente del proceso ciego y mecánico de un proceso de selección natural. Y a causa de la hegemonía de la religión fundamentalista en Estados Unidos, este país se encuentra entre los que más se resisten a la evidencia de la evolución humana.

En el famoso «Juicio del Mono» de 1925, el profesor de enseñanza secundaria John Scopes fue juzgado en Dayton (Tennessee), y hallado culpable de violar la Ley Butler de este estado. Curiosamente, esta ley no prohibía enseñar la evolución en general, sino sólo la idea de que los *humanos* habían evolucionado:

Queda promulgado por la Asamblea General del Estado de Tennessee que será ilegal que cualquier profesor de cualquiera de las universidades, escuelas normales y cualesquiera otras escuelas públicas del Estado que estén financiadas en todo o en parte por los fondos para la escuela pública del Estado, enseñe cualquier teoría que niegue la historia de la Divina Creación del hombre tal como la enseña la Biblia, y enseñe en su lugar que el hombre desciende de un orden inferior de animales.

Aunque los creacionistas más liberales admiten que algunas especies podrían haber evolucionado a partir de otras, *todos* los creacionistas trazan la divisoria en los humanos. La brecha entre nosotros y otros primates, dicen, no puede salvarla la evolución: por necesidad ha intervenido un acto de creación especial.

La idea de que los humanos forman parte de la naturaleza ha sido anatema durante la mayor parte de la historia de la biología. En 1735 el botánico sueco Carolus Linnaeus, que estableció el sistema de clasificación biológica, agrupó a los humanos, que llamó *Homo sapiens* («hombre sabio»), con los monos y los simios sobre la base de sus semejanzas anatómicas. Linnaeus no sugirió una relación evolutiva entre estas especies, pues su intención explícita era revelar el orden subyacente a

la creación de Dios; aun así, su decisión fue controvertida, y provocó la ira de su arzobispo.

Un siglo más tarde, Darwin sabía bien que despertaría la ira al sugerir, como firmemente creía, que los humanos habían evolucionado a partir de otras especies. En *El origen* ventiló la cuestión con mucho tiento, colando al final del libro una sentencia oblicua: «Se arrojará luz sobre el origen del hombre y su historia». Darwin no abordó de pleno la cuestión hasta más de una década más tarde en *El origen del hombre* (1871). Envalentonado por su creciente perspicacia y convicción, y por la confianza que había ganado gracias a la rápida aceptación de sus ideas, por fin hizo públicas sus ideas de manera explícita. Tras recopilar pruebas y observaciones de la anatomía y el comportamiento, Darwin afirmó no sólo que los humanos habían evolucionado a partir de organismos con aspecto de simios, sino que lo habían hecho en África:

Llegamos así a la conclusión de que los humanos descienden de un cuadrúpedo peludo, dotado de una cola y con las orejas puntiagudas, probablemente de hábitos arborícolas, y que habitaba en el Viejo Mundo.

Con qué fuerza debió golpear esa frase los oídos Victorianos. ¡Pensar que nuestros antepasados vivían en los árboles! ¡Y que *estaban dotados* de una cola y orejas puntiagudas! En su último capítulo, Darwin se enfrenta por fin a las objeciones religiosas:

Soy consciente de que las conclusiones a las que se llega en esta obra serán denunciadas por algunos por ser muy irreligiosas; pero quien las denuncie deberá mostrar por qué es más irreligioso explicar el origen del hombre como especie distinta a partir de alguna forma inferior, por medio de las leyes de la variación y la selección natural, que explicar el nacimiento del individuo por medio de las leyes ordinarias de la reproducción [las pautas del desarrollo].

No obstante, nunca logró convencer a todos sus colegas. Alfred Russel Wallace y Charles Lyell, competidor y mentor de Darwin, respectivamente, se apuntaron a la

idea de la evolución pero no quedaron convencidos de que la selección natural pudiera explicar las facultades mentales superiores de los humanos. Hicieron falta fósiles para convencer por fin a los escépticos de que los humanos realmente habían evolucionado.

1. Ancestros fósiles

En 1871, el registro fósil humano comprendía únicamente unos pocos huesos de neandertales, de aparición reciente y con aspecto demasiado humano para que sirvieran de eslabón perdido entre nosotros y los simios. De hecho, fueron interpretados como una población aberrante de *Homo sapiens*. En 1891, el médico holandés Eugène Dubois descubrió en Java un casquete craneal, algunos dientes y un hueso de cadera que se ajustaban a lo esperado: el cráneo era algo más robusto que el de los humanos modernos, y el cerebro de tamaño menor. Pero nervioso por la oposición religiosa y científica a sus ideas, Dubois volvió a enterrar los huesos de *Pithecanthropus erectus* (hoy *Homo erectus*) bajo su casa, ocultándolos a la curiosidad científica durante tres décadas.

El descubrimiento por Dart del niño de Taung desató una caza de ancestros humanos en África que culminó en las célebres excavaciones de los Leakey en la garganta de Olduvai a principios de la década de 1930, el descubrimiento de «Lucy» por Donald Johanson en 1974, y varios otros hallazgos. Hoy disponemos de un registro fósil razonablemente bueno de nuestra evolución, aunque está lejos de ser completo. Hay en él, como veremos, muchos misterios, y más de unas pocas sorpresas.

Pero incluso sin los fósiles sabríamos algo sobre nuestro lugar en el árbol de la evolución. Tal como propuso Linnaeus, nuestra anatomía nos sitúa en el orden Primates junto a los monos, los simios y los lémures, todos los cuales comparten rasgos como los ojos en posición frontal, las uñas, la visión en color y los pulgares oponibles. Otras características nos sitúan en la superfamilia Hominoideos junto a los «simios menores» (gibones) y los «grandes simios» (chimpancés, gorilas, orangutanes y nosotros mismos). Y dentro de los Hominoideos, quedamos agrupados con los grandes simios en la familia Homínidos, que comparten características únicas como las uñas planas, treinta y dos dientes, ovarios

engrosados y cuidados parentales prolongados. Estas características compartidas muestran que nuestro antepasado común con los grandes simios vivió más recientemente que nuestro antepasado común con cualquier otro mamífero.

Los datos moleculares derivados de la secuenciación del ADN y de proteínas confirman estas relaciones, y nos dicen también de manera aproximada cuándo divergimos de nuestros parientes. Nuestro pariente más próximo es el chimpancé (igual distancia del común que del bonobo) y divergimos de nuestro antepasado común hace unos 7 millones de años. El gorila es un pariente ligeramente más lejano, y los orangutanes todavía más (12 millones de años desde el antepasado común).

Para muchos, sin embargo, las pruebas fósiles son psicológicamente más convincentes que los datos moleculares. Una cosa es enterarse de que compartimos un 98,5 por 100 de nuestro ADN con los chimpancés y otra completamente distinta ver el esqueleto de un australopitecino, con su pequeño cráneo con aspecto de simio encima de un esqueleto casi idéntico al de los humanos modernos. Pero antes de mirar los fósiles podemos hacer algunas predicciones sobre lo que cabe encontrar en ellos si los humanos han evolucionado a partir de los simios.

¿Qué aspecto debería tener nuestro «eslabón perdido»? Recuérdese que el «eslabón perdido» es la *especie ancestral singular* que dio origen a los humanos modernos, de un lado, y a los chimpancés, del otro. No es razonable esperar descubrir justamente esa especie crucial, pues su identificación requeriría una serie completa de fósiles de ancestros y descendientes tanto en el linaje de los chimpancés como en el humano, unas series que entonces podríamos seguir en el pasado hasta el punto donde se crucen. Salvo por unos pocos microorganismos marinos, no existen secuencias de fósiles tan completas. Además, nuestros antepasados humanos más antiguos eran grandes, vivían en densidades bajas en comparación con los herbívoros como los antílopes, y habitaban en una pequeña parte de África en unas condiciones secas que no son propicias para la fosilización. Sus fósiles, como los de todos los simios y monos, son escasos. Esto recuerda el problema de la evolución de las aves, con formas transicionales también poco frecuentes. Aunque podemos seguir la evolución de las aves desde los reptiles con plumas, no estamos seguros

de qué especies fósiles concretas fueron antepasados directos de las aves modernas.

A la vista de todo esto, no cabe esperar encontrar la especie exacta que representa el «eslabón perdido» entre los humanos y otros simios. Sólo podemos esperar encontrar sus primos evolutivos. Hay que recordar también que ese antepasado común no era un chimpancé, y probablemente no tenía el aspecto ni de los chimpancés modernos ni de los humanos actuales. Con todo, es probable que el «eslabón perdido» tuviera un aspecto más cercano al de los chimpancés modernos que al de los humanos modernos. Somos un poco el bicho raro de la evolución de los simios modernos, pues todos se parecen más entre sí de lo que se parecen a nosotros. Los gorilas son nuestros primos distantes, y aun así comparten con los chimpancés características como el cerebro relativamente pequeño, el pelo en todo el cuerpo, el caminar sobre los nudillos, y los caninos grandes y afilados. Los gorilas y los chimpancés también tienen una «arcada dentaria rectangular»: vista desde arriba, la fila inferior de sus dientes recuerda los tres lados de un rectángulo (véase la Figura 27). Los humanos son la especie que ha divergido del plan corporal de los simios: tenemos pulgares flexibles, muy poco pelo, caninos más pequeños y romos, y caminamos erectos. Nuestra hilera de dientes no es rectangular, sino parabólica, como cualquiera puede ver si se mira los dientes en el espejo. Lo más llamativo, sin embargo, es que tenemos un cerebro mucho más grande que el de cualquier simio: el cerebro del chimpancé adulto tiene un volumen de unos 450 centímetros cúbicos, el de un humano moderno, unos 1.450 centímetros cúbicos. Cuando comparamos las similitudes de los chimpancés, gorilas y orangutanes y los caracteres divergentes de los humanos, podemos concluir que, respecto a nuestro antepasado común, hemos cambiado más que los simios modernos.

Así pues, cabe esperar encontrar hace alrededor de 5 a 7 millones de años antepasados fósiles con caracteres compartidos por los chimpancés, orangutanes y gorilas (estos caracteres son compartidos porque estaban presentes en el antepasado común), pero con algunas características humanas. A medida que los fósiles sean más recientes, deberíamos ver cómo los cerebros se hacen relativamente mayores, los caninos menores, la hilera de dientes menos rectangular y más curva, y la postura más erecta. Y eso es exactamente lo que vemos. Aunque

lejos de estar completo, el registro de la evolución humana es una de las mejores confirmaciones que tenemos de una predicción evolutiva, y es especialmente gratificante porque la predicción viene del propio Darwin.

Pero primero algunas advertencias. No disponemos (ni esperamos disponer) de un registro fósil continuo de la ascendencia de los humanos. Lo que vemos en su lugar es un enmarañado arbusto con muchas especies distintas. La mayoría de ellas se extinguieron sin dejar especies descendientes, y sólo un linaje genético siguió su camino en el tiempo hasta convertirse en los humanos modernos. Todavía no estamos seguros de qué especies fósiles se sitúan a lo largo de ese linaje concreto, y cuáles, en cambio, fueron callejones sin salida de la evolución. Lo más sorprendente que hemos aprendido sobre nuestra historia es que hemos tenido muchos primos evolutivos que se extinguieron sin dejar descendientes. Es posible incluso que hasta cuatro especies humanoides habitaran en África al mismo tiempo, y quizá en el mismo lugar. ¡Qué encuentros se pueden haber producido! ¿Se habrán intentado matar unos a otros, o habrán intentado cruzarse?

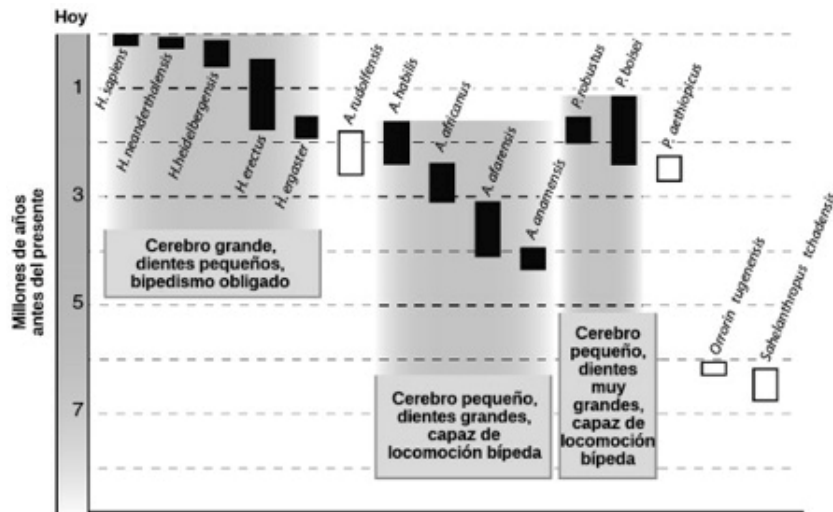


Figura 24. Quince especies de homíninos, los periodos en los que aparecen como fósiles, y la naturaleza de su cerebro, dientes y locomoción. Los fósiles representados con cajas vacías son demasiado fragmentarios como para extraer conclusiones sobre su locomoción y volumen cerebral. Ilustración de Kalliopi Monoyios a partir de Wood (2002).

Los nombres de los fósiles humanos ancestrales tampoco pueden tomarse demasiado en serio. Como la teología, la paleoantropología es una disciplina en la que el número de estudiosos supera en mucho el de objetos de estudio. Abundan los debates acalorados, a veces enconados, sobre si un determinado fósil es realmente algo nuevo o sólo una simple variante de una especie ya nombrada. Estas disputas sobre los nombres científicos suelen revestir poca importancia. Que un fósil humanoide sea clasificado como una especie u otra puede depender de cuestiones tan minúsculas como medio milímetro del diámetro de un diente, o ligeras diferencias en la forma de la pelvis. El problema es, sencillamente, que hay demasiados pocos especímenes distribuidos por un área geográfica demasiado grande como para poder tomar decisiones fiables. Constantemente se producen hallazgos nuevos o se revisan conclusiones anteriores. Lo que no debemos perder de vista es la tendencia general de los fósiles a lo largo del tiempo, que muestra claramente un cambio desde caracteres simiescos a caracteres humanos.

Vayamos a por los huesos. Los antropólogos aplican el término homínino a todas las especies del lado «humano» de nuestro árbol genealógico después de la separación de la rama que condujo a los chimpancés modernos.⁴⁶ En la actualidad se reconocen como especies veinte tipos de homíninos; quince de ellos se presentan en la Figura 24 en el orden aproximado en que aparecieron. La Figura 25 muestra los cráneos de unos pocos homíninos representativos, junto al de los chimpancés modernos y los humanos, como referencia.

Nuestra pregunta principal es, por supuesto, cómo determinar la pauta de la evolución humana. ¿Cuándo encontramos los fósiles más antiguos que pudieran representar a nuestros antepasados cuando ya habían divergido de otros simios? ¿Cuáles de nuestros parientes homíninos se extinguieron, y cuáles fueron nuestros antepasados directos? ¿Cómo se convirtieron los rasgos del simio ancestral en los de los humanos actuales? ¿Evolucionó primero nuestro voluminoso cerebro o nuestra postura erguida? Sabemos que los humanos comenzaron a evolucionar en África, pero ¿qué parte de nuestra evolución se produjo en otros lugares?

⁴⁶ Este grupo solía llamarse homínidos, pero este término se reserva ahora para todos los grandes simios modernos y extintos, incluidos los humanos, los chimpancés, los gorilas, los orangutanes y todos sus antepasados.

Con la salvedad de algunos fragmentos de huesos cuya clasificación no está clara, hasta hace poco el registro fósil de los homíninos no se remontaba más allá de hace 4 millones de años.

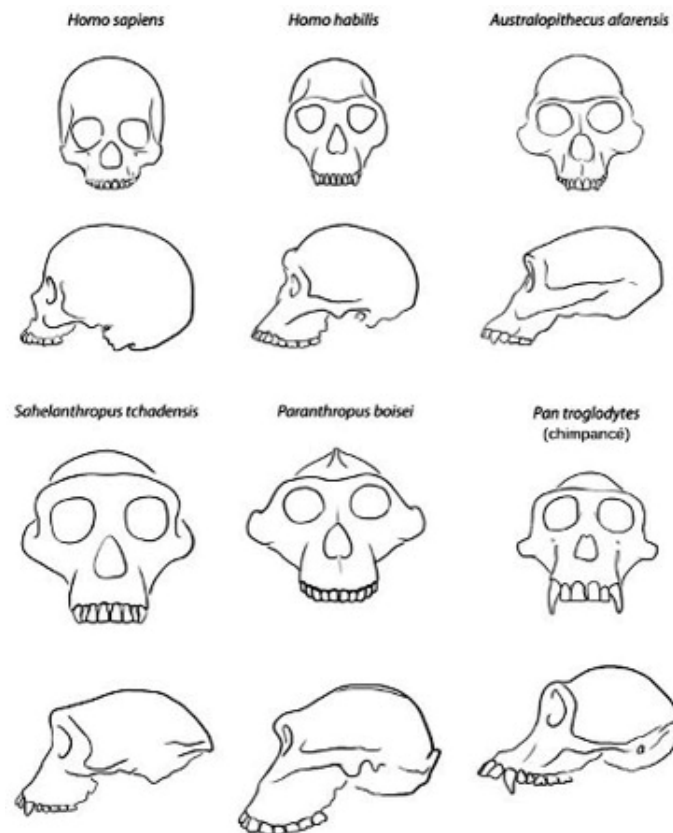


Figura 25. Cráneos de humanos modernos (*Homo sapiens*), homíninos fósiles y un chimpancé (*Pan troglodytes*). Ilustración de Kalliopi Monoyios

Pero en 2002, Michel Brunet y sus colaboradores anunciaron el sorprendente descubrimiento de un posible homínino más antiguo, *Sahelanthropus tchadensis*, de los desiertos del Chad, en el África central, en la región conocida como Sahel. Lo más sorprendente de este hallazgo es su datación: hace de 6 a 7 millones de años, justo cuando las pruebas moleculares nos dicen que nuestro linaje se separó del de los chimpancés. *Sahelanthropus* podría representar el antepasado humano más antiguo, pero también podría ser una rama lateral que se extinguió. Su mezcla de caracteres, sin embargo, parece situarlo claramente en el lado humano de la divisoria con los chimpancés. Lo que tenemos en este caso es un cráneo casi

completo (aunque un poco aplastado por la fosilización) que es un *mosaico*, una curiosa mezcla de caracteres de simios y de humanos. Como los simios, el cráneo es alargado y el cerebro pequeño, como el del chimpancé; pero igual que los homíninos posteriores, tiene el rostro plano, los dientes pequeños y las cejas prominentes (Figura 25).

Puesto que no tenemos el resto del esqueleto, no podemos decir si *Sahelanthropus* poseía la crucial habilidad de caminar erecto, pero hay una interesante indicación de que podría ser así. En los simios que caminan apoyándose en los nudillos, como los gorilas y los chimpancés, la postura habitual del animal es horizontal, de manera que la médula espinal penetra en el cráneo por detrás. En los humanos erectos, sin embargo, el cráneo se asienta directamente encima de la médula espinal. Puede apreciarse esta diferencia en la posición de la abertura del cráneo por la que pasa la médula espinal (el *foramen magnum*, o «agujero grande», en latín): este orificio está en posición más frontal en los humanos. En *Sahelanthropus*, el orificio es más frontal que en los simios que caminan apoyándose en los nudillos. Esto es muy interesante, porque si esta especie realmente se encuentra en el lado homínino de la divisoria, nos sugiere que la locomoción bípeda fue una de las primeras innovaciones evolutivas que nos distinguieron de los otros simios.⁴⁷

Después de *Sahelanthropus*, tenemos unos pocos fragmentos de hace unos 6 millones de años de otra especie, *Orrorin tugenensis*, que comprenden un solo hueso de la pierna que se ha interpretado como prueba de bipedismo. Pero luego se abre una brecha de 2 millones de años sin ningún fósil homínino sustantivo. Es en este período donde algún día encontraremos información crucial sobre cuándo comenzamos a caminar erguidos. Pero hace 4 millones de años reaparecen los fósiles, y vemos cómo comienza a ramificarse el árbol de los homíninos. De hecho, podrían haber vivido al mismo tiempo varias especies. Entre ellas están los australopitecinos gráciles, que una vez más presentan una mezcla de caracteres simiescos y humanoides. Del lado de los simios tienen el cerebro de tamaño parecido al de un chimpancé, y su cráneo es más parecido al de un simio que al de un humano. Pero los dientes son relativamente pequeños, y se disponen en hileras

⁴⁷ Una indicación de la naturaleza competitiva de la paleoantropología es el número de personas que comparten el crédito por el descubrimiento, preparación y descripción de *Sahelanthropus*: el artículo que lo anuncia tiene treinta y ocho autores, ¡todo por un solo cráneo!

a medio camino entre la forma rectangular de los simios y el paladar parabólico de los humanos. Y sin lugar a dudas eran bípedos.

Un conjunto de fósiles antiguos de Kenia, agrupados bajo la denominación de *Australopithecus anamensis*, muestra interesantes indicaciones de bipedismo en un único fémur fosilizado. Pero el hallazgo definitivo fue realizado por el paleontólogo norteamericano Donald Johanson mientras hacía prospección de fósiles en la región de Afar, en Etiopía. La mañana del 30 de noviembre de 1974, Johanson se levantó sintiéndose afortunado, y tomó nota de ello en su diario de campaña. Pero no podía ni imaginar la suerte que tendría. Tras buscar en vano durante toda la mañana en un barranco seco, Johanson y Tom Gray, un estudiante de doctorado, estaban a punto de dejarlo por aquel día y regresar al campamento. De repente, Johanson vio un hueso de homínido en el suelo, y luego otro, y otro más. Para su asombro, habían tropezado con los huesos de un solo individuo, que más tarde recibió la denominación formal de AL 288-1, pero que se conoce de manera más familiar como «Lucy», en honor a la canción de los Beatles «Lucy in the Sky with Diamonds», que se escuchó repetidas veces en el campamento durante la celebración del hallazgo.

Cuando se montaron los centenares de fragmentos de Lucy, resultó ser una hembra de una nueva especie, *Australopithecus afarensis*, que databa de hace 3,2 millones de años. Tenía entre veinte y treinta años de edad, medía poco más de un metro, pesaba apenas treinta kilos y posiblemente sufría artritis. Pero lo más importante es que caminaba sobre dos piernas.

¿Cómo lo sabemos? Por la manera en que el fémur se une a la pelvis por uno de sus extremos y a la rodilla por el otro (Figura 26). En un primate bípedo como nosotros, los fémures forman un ángulo hacia el interior, acercándose desde la pelvis, de manera que el centro de gravedad se mantiene en un mismo lugar mientras se camina, lo que permite un eficiente paso bípedo adelante y atrás. En los simios que caminan apoyándose en los nudillos, los fémures se abren ligeramente, dándoles un aspecto patizambo. Cuando intentan caminar erguidos, se tambalean torpemente, como el pequeño vagabundo de Charlie Chaplin.⁴⁸ Así pues, si cogemos un fósil de primate y nos fijamos en cómo se une el fémur a la pelvis, podremos decir si

⁴⁸ <http://www.youtube.com/watch?v=V9DIMkKotWUNR=I> muestra un chimpancé caminando torpemente sobre dos patas.

caminaba sobre dos patas o sobre cuatro. Si los fémures se inclinan hacia el centro, era bípedo. Así pasa en Lucy, y casi con el mismo ángulo que en los humanos modernos. Caminaba erguida. También su pelvis se parece mucho más a la de los humanos modernos que a la de los chimpancés.

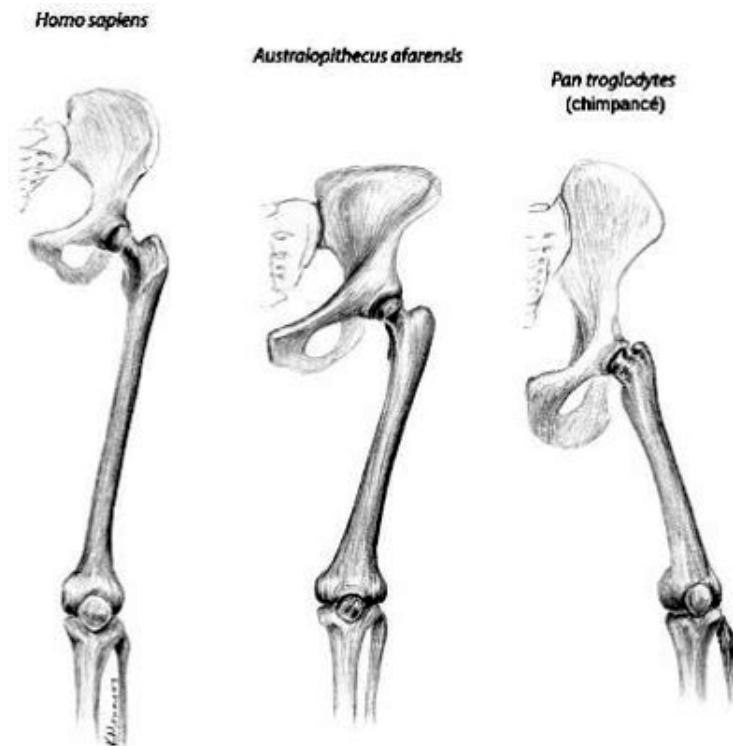


Figura 26. Unión del fémur (el hueso largo de la pierna) con la pelvis en los humanos modernos, los chimpancés y Australopithecus afarensis. La pelvis de A. afarensis es intermedia entre las otras dos, pero su fémur inclinado hacia dentro (una indicación de que caminaba erecto) se parece al de los humanos y contrasta con el fémur abierto del chimpancé, que camina apoyándose en los nudillos.

Ilustración de Kalliopi Monoyios

Un equipo de paleoantropólogos dirigido por Mary Leakey confirmó el bipedismo de *A. afarensis* con otro hallazgo notable realizado en Tanzania: las famosas «huellas de Laetoli». En 1976, Andrew Hill y otro miembro del equipo estaban disfrutando de un descanso dedicándose al pasatiempo favorito del campamento: lanzarse unos a otros cachos de boñiga seca de elefante. Mientras buscaba munición en un lecho de río seco, Hill tropezó con una hilera de huellas fosilizadas. Tras una cuidadosa

excavación, las huellas resultaron ser parte de un rastro de unos veinticinco metros que habían dejado un par de homíninos que claramente habían estado caminando sobre dos piernas (no había impresiones de nudillos) durante una tormenta de ceniza causada por la erupción de un volcán. Aquella tormenta fue seguida por la lluvia, que convirtió la ceniza en una capa parecida al cemento que más tarde quedó sellada por otra capa de ceniza seca, preservando las huellas.

Las huellas de Laetoli son virtualmente idénticas a las que hace un humano moderno al caminar sobre un suelo blando. Y los pies eran casi con certeza de unos parientes de Lucy: las huellas tienen la medida correcta y el rastro se remonta a hace 3,6 millones de años, cuando el único homínino conocido era *A. afarensis*. Lo que tenemos aquí es el más raro de los hallazgos: comportamiento humano fosilizado.⁴⁹ Uno de los rastros es de huellas mayores que el otro, por lo que deben provenir de un macho y una hembra (sabemos por otros fósiles de *afarensis* que presentaban dimorfismo sexual en la talla). Las huellas de la hembra parecen un poco más profundas en un lado que en el otro, lo que quizá indique que llevaba un niño en la cadera. El rastro evoca la imagen de una pareja pequeña y peluda que cruza el llano durante una erupción volcánica. ¿Estaban asustados y se cogían de la mano?

Al igual que otros australopitecinos, Lucy tenía la cabeza simiesca, con un volumen craneal como el de un chimpancé. Pero su cráneo muestra también algunas trazas más humanas, por ejemplo una arcada dentaria semiparabólica y caninos de tamaño más reducido (Figuras 25 y 27). Entre la cabeza y la pelvis tenía una mezcla de caracteres propios de simios y de humanos: los brazos eran, en términos relativos, más largos que los de los humanos modernos, pero más cortos que los de los chimpancés, y las falanges de los dedos eran un tanto curvadas, como las de los simios. Esto ha llevado a suponer que *afarensis* debía pasar al menos una parte de su tiempo en los árboles.

Uno no podría pedir una forma transicional mejor entre los humanos y los antiguos simios que Lucy. Del cuello para arriba, es simio; en la parte media, una mezcla; y de la cintura para abajo, casi un humano moderno. Además, nos proporciona un dato crucial sobre su evolución: nuestra postura erecta evolucionó mucho antes que

⁴⁹ En http://www.pbs.Org/wgbh/evolution/library/07/I/I_071_03.html puede verse un vídeo de las huellas y de cómo se hicieron.

nuestro cerebro grande. En el momento de su descubrimiento, esto iba en contra de la suposición generalmente admitida de que el cerebro grande había evolucionado primero, y nos hizo repensar el modo en que la selección natural puede haber modelado a los humanos modernos.

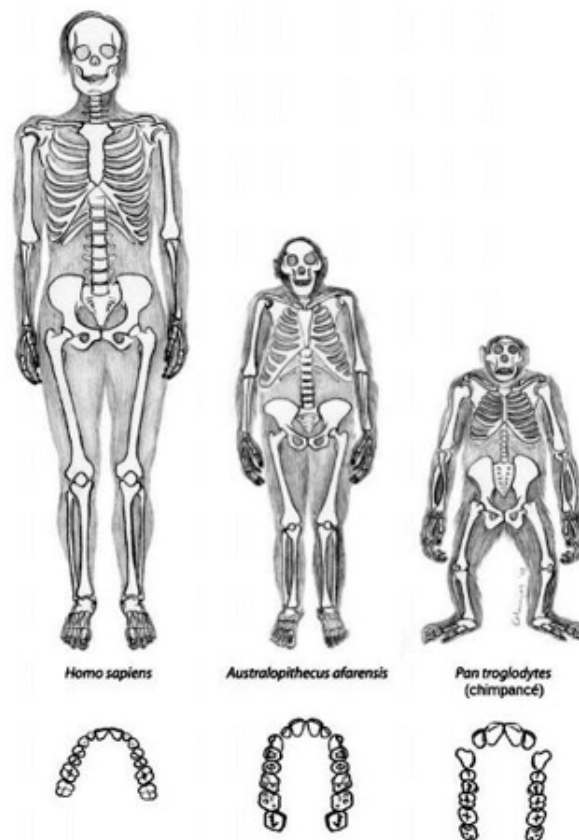


Figura 27. Esqueletos y arcadas dentarias del moderno Homo sapiens, Australopithecus afarensis («Lucy») y un chimpancé. Aunque los chimpancés no son antepasados del linaje humano, probablemente se parezcan al antepasado común más que los humanos. En muchos sentidos, A. afarensis es intermedio entre la morfología de simio y la de humano. Ilustración de Kalliopi Monoyios

Después de *A. afarensis*, el registro fósil muestra una confusa mezcolanza de especies australopitecinas gráciles que se prolonga hasta hace unos 2 millones de años. La secuencia cronológica muestra una progresión hacia una forma humana más moderna: la hilera de dientes se hace más parabólica, el cerebro aumenta de tamaño y el esqueleto pierde sus caracteres simioscos.

Luego todo se vuelve más confuso, pues hace 2 millones de años se encuentra la frontera entre los fósiles situados en el género *Australopithecus* y los situados en el género más moderno *Homo*. No debemos pensar, sin embargo, que este cambio de nombres significa que se produjo algún cambio transcendental, que de algún modo los «verdaderos humanos» evolucionaron de un solo golpe. Que un fósil reciba un nombre u otro depende de si tiene un cerebro mayor (*Homo*) o menor (*Australopithecus*), por lo general con arreglo a una frontera arbitraria de alrededor de 600 centímetros cúbicos. Algunos fósiles australopitecinos, como *A. rudolfensis*, tienen un volumen cerebral tan intermedio, que los científicos debaten acaloradamente sobre si debería llamarse *Homo Australopithecus*. Este problema de nomenclatura se agrava con el hecho de que incluso dentro de una misma especie vemos una considerable variación en el tamaño del cerebro. (Los humanos modernos, por ejemplo, muestran un amplio abanico de volúmenes, entre 1.000 y 2.000 centímetros cúbicos, que, por cierto, no guardan correlación con la inteligencia.) Pero las dificultades semánticas no deberían distraernos de entender que los últimos australopitecinos, que ya eran bípedos, comenzaban a mostrar cambios en los dientes, el cráneo y el cerebro que presagian a los humanos modernos. Es muy probable que el linaje que dio origen a los humanos modernos incluya al menos una de estas especies.

Otro salto importante en la evolución humana fue la habilidad para fabricar y utilizar instrumentos. Aunque los chimpancés utilizan instrumentos simples, por ejemplo palitos para extraer termitas de sus montículos, el uso de instrumentos más elaborados seguramente requería unos pulgares más flexibles y una postura erecta que dejara las manos libres. El primer humano que sin ninguna duda utilizaba instrumentos fue *Homo habilis* (Figura 25), cuyos restos aparecen por primera vez hace unos 2,5 millones de años. *H. habilis* significa, como es obvio, «hombre hábil», y sus fósiles aparecen asociados a diversos instrumentos de piedra o lascas que utilizaban para cortar, raspar y matar a sus presas. No estamos seguros de que esta especie sea un antepasado directo de *H. sapiens*, pero *habilis* desde luego presenta cambios hacia una condición más humana, por ejemplo en los molares más reducidos y el cerebro más voluminoso que en los australopitecinos. Un molde de un cerebro muestra unos claros abultamientos que corresponden al área de Broca y el

área de Wernicke, las partes del lóbulo izquierdo del cerebro asociados con la producción y comprensión del habla. Estos bultos suscitan la posibilidad, todavía muy lejos de ser cierta, de que *habilis* fuese la primera especie con un lenguaje hablado.

Lo que sí sabemos es que *H. habilis* coexistió, si no en el espacio, al menos en el tiempo, con varios otros homíninos. Los más famosos son los homíninos «robustos» (en oposición a los gráciles) del África oriental. Comprenden al menos tres: *Paranthropus (Australopithecus) boisei* (Figura 25), *P. robustus* y *P. aethiopicus*, todos ellos con grandes cráneos, pesados dientes masticadores (algunos de los molares tenían más de dos centímetros y medio de ancho), huesos recios y cerebro relativamente pequeño. También tenían una cresta sagital: una prominencia del hueso que recorría la parte superior del cráneo y servía para anclar los grandes músculos masticadores. Algunas especies robustas probablemente subsistieron con alimentos duros o correosos, por ejemplo raíces, nueces y tubérculos (*P. boisei*, descubierto por Louis Leakey, recibió el apelativo de «hombre cascanueces»). Las tres especies se extinguieron hace aproximadamente 1,1 millones de años sin dejar ninguna especie descendiente.

Pero *H. habilis* quizá conviviera también con tres especies más de *Homo*: *H. ergaster*, *H. rudolfensis* y *H. erectus*, aunque cada una de estas tres especies muestra una considerable variación y las relaciones entre ellas son discutidas. *H. erectus* («hombre erguido») ostenta la distinción de ser el primer homínino que salió de África: se han encontrado restos de esta especie en China («hombre de Pequín»), Indonesia («hombre de Java»), Europa y Oriente Medio. Es probable que a medida que sus poblaciones africanas se expandían, *erectus* simplemente buscara nuevas tierras donde vivir.

Para cuando se produjo esta diáspora, el tamaño del cerebro de *erectus* era prácticamente igual al de los humanos modernos. Sus esqueletos también eran casi idénticos a los nuestros, aunque todavía tenían el rostro plano, sin barbilla (el mentón es una característica de *H. sapiens*). Sus utensilios eran complejos, sobre todo los de los últimos *erectus*, que fabricaban complejas hachas y raspadores de piedra con intrincados lascados. La especie también parece ser responsable de uno de los momentos más trascendentales de la historia cultural humana: el control del

fuego. En una cueva de Swartkrans, en Sudáfrica, los científicos han hallado restos de *erectus* junto a huesos quemados, es decir, huesos calentados hasta una temperatura demasiado elevada como para que provinieran de un incendio natural. Así que tal vez se tratara de restos de animales cocinados en una hoguera o un hogar.

H. erectus fue una especie de enorme éxito, no sólo por el tamaño de su población, sino también por su longevidad. Persistió durante 1,5 millones de años, desapareciendo del registro fósil hace unos 300.000 años. Sin embargo, es posible que dejara dos descendientes: *H. heidelbergensis* y *H. neanderthalensis*, conocidos respectivamente como «*H. sapiens* arcaico» y el famoso «hombre de Neanderthal». Ambos son clasificados a veces como subespecies (poblaciones diferenciadas pero que podían cruzarse) de *H. sapiens*, aunque no sabemos con certeza si contribuyeron de alguna manera al acervo genético de los humanos modernos.

H. heidelbergensis apareció hace medio millón de años, y vivió en lo que hoy es Alemania, Grecia y Francia, además de África. Presenta una mezcla de caracteres humanos modernos y de *H. erectus*. Los neandertales aparecieron algo más tarde, hace unos 230.000 años, y vivieron en toda Europa y en Oriente Medio. Tenían el cerebro grande (más incluso que los humanos modernos), y eran unos excelentes fabricantes de utensilios y buenos cazadores. Algunos esqueletos llevan trazas del pigmento ocre y están acompañados de «ofrendas de enterramiento», por ejemplo huesos de animales y utensilios. Esto sugiere que los neandertales enterraban a sus muertos con ceremonia, lo que quizá sea la primera indicación de una religión humana.

Pero hace unos 28.000 años, los fósiles de neandertal desaparecen. Cuando yo estudiaba, me enseñaron que simplemente habían evolucionado hacia los humanos modernos. Esta idea hoy nos parece errónea. Lo que realmente ocurriera con esta especie es tal vez la mayor incógnita de la evolución humana. Su desaparición podría estar asociada a la expansión de otra forma originaria de África: *Homo sapiens*. Como hemos visto, hace más o menos 1,5 millones de años *H. erectus* se había dispersado desde África hasta llegar incluso a Indonesia. Y dentro de esta especie había diferentes «razas», es decir, poblaciones que diferían en alguno de sus caracteres. (*H. erectus* de China, por ejemplo, tenía incisivos en forma de pala

que no aparecen en otras poblaciones.) Entonces, hace unos 60.000 años, todas las poblaciones de *H. erectus* desaparecieron de repente y fueron reemplazadas por fósiles «anatómicamente modernos» de *H. sapiens*, que tenían esqueletos casi idénticos a los de los humanos actuales. Los neandertales aguantaron algo más, pero por fin, tras encontrar un último reducto en cuevas con vistas al estrecho de Gibraltar, también ellos dejaron paso al moderno *H. sapiens*. En otras palabras, *Homo sapiens* aparentemente echó a un lado a todos los otros homíninos de la tierra.

¿Qué es lo que ocurrió? Hay dos teorías. La primera, denominada teoría «multirregional», propone un reemplazo *evolutivo*: *H. erectus* (y quizá también *H. neanderthalensis*) simplemente evolucionó hacia *H. sapiens de manera independiente en varias regiones*, quizá porque la selección natural actuase del mismo modo en Asia, Europa y África.

La segunda idea, la teoría de la «migración desde África»,⁵⁰ propone que el moderno *H. sapiens* se originó en África y luego se dispersó, reemplazando *físicamente* a *H. erectus* y a los neandertales, tal vez al competir con ellos por el alimento o simplemente matándolos.

Las pruebas genéticas y fósiles apoyan la teoría de la migración desde África. ¿Por qué? Probablemente porque todo se reduce al significado de las razas. Cuanto más tiempo hayan estado separadas las poblaciones humanas, más diferencias genéticas habrán acumulado. La hipótesis multirregional, con su división en poblaciones hace más de un millón de años, predice quince veces más diferencias genéticas entre razas que si nuestros antepasados humanos salieron de África hace sólo 60.000 años. Pero tendremos ocasión más adelante de ocuparnos de las razas.

Una población de antiguos homíninos podría haber sobrevivido a la extinción en todo el mundo de *H. erectus*, y quizá sea la rama más extraña del árbol de familia de los humanos. Descubiertos en 2003 en la isla de Flores en Indonesia, los individuos de *H. floresiensis* no tardaron en recibir el apelativo de «hobbits» debido a su menguada estatura de adultos, de apenas un metro, y su peso de tan sólo unos veinticinco kilos. Su cerebro era proporcionalmente más pequeño, del tamaño del de un australopitecino, pero sus dientes y esqueleto eran indiscutiblemente de

⁵⁰ Nótese que ésta sería entonces la segunda vez que un linaje humano habría emigrado desde África; la primera vez fue la protagonizada por *H. erectus*.

Homo. Usaban instrumentos líticos y quizá cazaban los dragones de Komodo y los elefantes enanos que poblaban la isla. Lo asombroso del caso es que *floresiensis* data de hace tan sólo 18.000 años, bastante después de la desaparición de los neandertales y veinticinco siglos después de que el moderno *H. sapiens* llegara a Australia. La hipótesis más sólida es que *floresiensis* representa una población aislada de *H. erectus* que colonizó Flores y de algún modo quedó al margen de la expansión de *H. sapiens*. Aunque *floresiensis* fue con toda probabilidad un callejón sin salida evolutivo, es difícil no dejarse cautivar por la idea de una población reciente de humanos minúsculos que cazaban elefantes enanos con diminutas lanzas, así que los *hobbits* han recibido un enorme interés popular.

Pero la naturaleza de los fósiles de *floresiensis* se discute. Algunos sostienen que la pequeña talla del único cráneo bien preservado podría corresponder simplemente a un individuo enfermo del moderno *Homo sapiens*, quizá uno que sufriera de cretinismo (hipotiroidismo), un trastorno que produce cráneos y cerebros anormalmente pequeños. Aunque análisis recientes de los huesos de la muñeca apoyan la idea de que *H. floresiensis* fue una genuina especie de homínino, aún quedan preguntas por responder.

Si miramos ahora la colección completa de huesos, ¿qué tenemos? Sin ninguna duda, una prueba indiscutible de la evolución de los humanos a partir de antepasados con aspecto de simios. Es cierto que todavía no podemos seguir un linaje continuo desde un ancestral homínino con aspecto de simio hasta el moderno *Homo sapiens*. Los fósiles están dispersos en el tiempo y el espacio formando una serie de puntos que todavía tenemos que acabar de conectar genealógicamente. Cabe la posibilidad de que nunca podamos conectar todos esos puntos. Pero si se colocan en orden cronológico, como en la Figura 24, lo que aparece es justamente lo que Darwin había predicho: unos fósiles que comienzan teniendo aspecto de simios pero que con el paso del tiempo se parecen cada vez más a los humanos modernos. Es un hecho que nuestra divergencia respecto a nuestro antepasado común con los chimpancés se produjo en algún lugar de África central u oriental hace unos 7 millones de años, y que la locomoción bípeda evolucionó mucho antes que el cerebro de gran tamaño. Sabemos que durante buena parte de la evolución de los homíninos coexistieron varias especies en el tiempo, a veces incluso en la

misma región. Dado el pequeño tamaño de la población humana y la improbabilidad de su fosilización (recuérdese que este proceso en general requiere que un cuerpo acabe en el agua y quede cubierto rápidamente por sedimentos), es asombroso que tengamos un registro tan bueno como el que tenemos. Parece imposible examinar los fósiles que tenemos, o mirar la Figura 25, y negar que los humanos evolucionaron.

Pero algunos todavía lo hacen. Cuando se ocupan del registro fósil humano, los creacionistas realizan las más extremadas, incluso ridículas, contorsiones mentales para evitar admitir lo evidente. En realidad prefieren evitar la cuestión. Pero cuando se los fuerza a enfrentarse a ella, se limitan a ordenar los fósiles de homíninos en lo que ven como grupos distintos, los humanos y los simios, y a afirmar que estos grupos están separados por una brecha grande e insalvable. Esto refleja su visión fundamentada en la religión según la cual, aunque algunas especies podrían haber evolucionado a partir de otras, no es éste el caso de los humanos, que fueron objeto de un acto especial de creación. Pero su disparate queda manifiesto en el hecho de que los propios creacionistas no pueden ponerse de acuerdo sobre qué fósiles son «humanos» y qué fósiles son «simios». Los especímenes de *H. habilis* y *H. erectus*, por ejemplo, los clasifican como «simios» algunos creacionistas, y como «humanos» otros. Un autor ha llegado incluso a describir un espécimen de *H. erectus* como simio en uno de sus libros ¡y como humano en otro!⁵¹ Nada muestra el carácter intermedio de estos fósiles mejor que la incapacidad de los creacionistas para clasificarlos con claridad.

¿Qué fue, entonces, lo que impulsó la evolución de los humanos? Siempre es más fácil documentar el cambio evolutivo que entender las fuerzas que subyacen a este cambio. Lo que vemos en el registro fósil humano es la aparición de adaptaciones complejas como la postura erguida y la modificación del cráneo, que requieren muchos cambios coordinados en la anatomía, así que no cabe duda de que el proceso implicó selección natural. Pero ¿qué tipo de selección? ¿Cuáles fueron exactamente las ventajas reproductivas de un cerebro mayor, una postura erguida y unos dientes más pequeños? Es probable que nunca lo lleguemos a saber con seguridad, que sólo podamos hacer conjeturas más o menos plausibles. Lo que sí

⁵¹ Véase en <http://www.talkorigins.org/faqs/homs/compare.html> una discusión de cómo tratan los creacionistas el registro fósil humano.

podemos es hacer conjeturas cimentadas en la información si investigamos sobre el ambiente en el que evolucionaron los humanos. Entre hace 10 y 3 millones de años, el cambio ambiental más profundo que se produjo en África central y oriental fue la sequía. Durante este período crítico de la evolución de los homíninos, el clima se fue haciendo gradualmente más seco, y le siguieron más tarde períodos alternantes y erráticos de sequía y lluvia. (Esta información proviene del polen y polvo africanos arrastrados por el viento hasta los sedimentos oceánicos, donde quedaban preservados.) Durante los períodos secos, las selvas lluviosas cedían su puesto a un hábitat más abierto, con sabanas, sistemas herbáceos, bosque claro o incluso matorral desértico. Éste es el escenario sobre el que se representó el primer acto de la evolución del hombre.

Muchos biólogos creen que estos cambios del clima y el medio tuvieron algo que ver con el primer carácter homínino que evolucionó: la locomoción bípeda. La explicación clásica es que caminar sobre dos piernas permitía a los humanos desplazarse con mayor eficacia de una mancha de bosque a otra a través del nuevo hábitat abierto. Pero esto parece improbable, pues los estudios de la locomoción bípeda y con apoyo en los nudillos han revelado que no precisan cantidades significativamente distintas de energía. Pese a ello, hay otras razones por las que caminar erguido puede haber representado una ventaja selectiva. Por ejemplo, podría haber liberado las manos para recoger y transportar formas de alimento nuevas, como la carne y los tubérculos (esto también podría explicar los dientes más pequeños y el aumento de la destreza manual). Caminar erguido también podría haber ayudado a compensar las temperaturas más altas, pues al levantar el cuerpo del suelo se reduce el área expuesta al sol. Tenemos muchas más glándulas sudoríparas que ningún otro simio, y como el pelo interfiere con el enfriamiento producido por la evaporación del sudor, quizá esto explique nuestra condición única de «monos desnudos». Hay incluso una improbable teoría del «simio acuático» que propone que los primeros homíninos pasaban buena parte del tiempo aprovisionándose de alimentos en el agua, y que la postura erguida había evolucionado para mantener la cabeza por encima de la superficie. El libro de Jonathan Kingdon sobre el bipedismo, *Lowly Origin*, describe aún otras teorías. Por supuesto, estas fuerzas evolutivas no son todas mutuamente excluyentes: es

posible que varias de ellas actuaran al mismo tiempo. Por desgracia, no podemos discriminar unas de otras.

Lo mismo vale para la evolución del volumen cerebral. La teoría adaptativa clásica dice que una vez que nuestras manos quedaron libres por la evolución del bipedismo, los homíninos pudieron utilizarlas para fabricar utensilios, lo que llevaría a la selección de un tamaño cerebral mayor que nos habría permitido concebir y fabricar útiles más complejos. Esta teoría goza de la ventaja de que los primeros instrumentos aparecieron más o menos cuando los cerebros comenzaron a hacerse más grandes. Pero pasa por alto otras presiones selectivas que juegan a favor de un cerebro mayor y más complejo, entre ellas el desarrollo del lenguaje, la negociación de las complejidades psicológicas de la sociedad primitiva, la planificación del futuro, y otras.

Estos misterios sobre *cómo* evolucionamos no deberían distraernos del hecho indisputable de que *en efecto* evolucionamos. Incluso sin fósiles, tenemos pruebas de la evolución humana a partir de la anatomía comparada, la embriología, nuestros caracteres vestigiales e incluso la biogeografía. Ya hemos repasado nuestros embriones con aspecto de pez, nuestros genes muertos, nuestra transitoria cubierta de pelo fetal y nuestro deficiente diseño, todo lo cual es testimonio de nuestros orígenes. El registro fósil es realmente la guinda del pastel.

2. Nuestra herencia genética

Si todavía no entendemos por qué la selección nos ha hecho tan distintos de otros simios, ¿podemos al menos averiguar cuántos *genes* y de qué tipo nos diferencian? Los genes de la «humanidad» se han convertido en algo así como el santo grial de la biología evolutiva, y son muchos los laboratorios que se dedican a buscarlos. El primer intento de encontrarlos lo realizaron en 1975 Allan Wilson y Mary-Claire King, de la Universidad de California. Sus resultados fueron sorprendentes. Tras examinar secuencias de proteínas tomadas de humanos y de chimpancés, descubrieron que por término medio sólo se diferenciaban en un 1 por 100. (Estudios más recientes no han cambiado demasiado esta cifra: la diferencia ha subido hasta 1,5 por 100.) King y Wilson llegaron a la conclusión de que existía una notable similitud genética entre nosotros y nuestros parientes más próximos, y

especularon que quizá unos cambios en tan sólo unos pocos genes habían producido las grandes diferencias evolutivas entre los humanos y los chimpancés. Este resultado recibió una enorme publicidad tanto en la prensa científica como en la popular, pues parecía implicar que la «humanidad» descansara en apenas un puñado de mutaciones.

Pero estudios más recientes han puesto de manifiesto que el parecido genético con nuestros primos evolutivos no es tan grande como pensábamos. Consideremos lo siguiente. Un 1,5 por 100 de diferencia en una secuencia de proteína significa que cuando alineamos la misma proteína (por ejemplo, la hemoglobina) de los humanos y la de los chimpancés, por término medio encontramos una diferencia en sólo uno de cada cien aminoácidos. Pero las proteínas suelen estar compuestas por *varios centenares* de aminoácidos. Así que una diferencia de 1,5 por 100 en una proteína con trescientos aminoácidos se traduce en unas cuatro diferencias en la secuencia total de la proteína. (Por usar una analogía, si cambiamos sólo un 1 por 100 de las letras de esta página, se altera mucho más del 1 por 100 de las frases.) Esa diferencia del 1,5 por 100 entre nosotros y los chimpancés que se cita tan a menudo es realmente mayor de lo que parece: mucho más del 1,5 por 100 de nuestras proteínas diferirán en *al menos un aminoácido* de la secuencia de los chimpancés. Y como las proteínas son esenciales para construir y mantener nuestros cuerpos, una sola diferencia puede tener efectos sustanciales.

Ahora que por fin hemos secuenciado los genomas tanto de los chimpancés como de los humanos, hemos podido ver directamente que más del 80 por 100 de todas las proteínas compartidas por las dos especies difieren en al menos un aminoácido. Puesto que nuestros genomas contienen unos 25.000 genes que codifican proteínas, esto se traduce en una diferencia en la secuencia de unas 20.000 de ellas. No es una divergencia trivial. Obviamente, lo que nos distingue es algo más que unos pocos genes. Además, los evolucionistas moleculares han descubierto recientemente que los humanos y los chimpancés difieren no sólo en la *secuencia* de los genes, sino también en la *presencia* de genes. Más de un 6 por 100 de los genes que se encuentran en los humanos no se encuentran *en ninguna forma* en los chimpancés. Hay más de mil cuatrocientos genes nuevos que se expresan en los humanos pero no en los chimpancés. También diferimos de los chimpancés en el

número de *copias* de muchos de los genes que compartimos. Por ejemplo, la amilasa, una enzima de la saliva, actúa en la boca rompiendo el almidón en azúcares digeribles. Los chimpancés sólo tienen una copia de esta enzima, mientras que los humanos tenemos entre dos y dieciséis, con una media de seis copias. Esta diferencia probablemente sea el resultado de una selección natural para ayudarnos a digerir la comida, puesto que la dieta de los ancestros humanos probablemente era mucho más rica en almidón que la de los simios frugívoros.

Si ponemos todo esto sobre la mesa, vemos que la divergencia genética entre nosotros y los chimpancés se manifiesta de varias maneras: cambios no sólo en las proteínas que producen los genes, sino también en la presencia o ausencia de genes, en el número de copias de genes, y en dónde y cuándo se expresan los genes durante el desarrollo. Ya no podemos afirmar que la «humanidad» resida únicamente en un tipo de mutaciones, o en cambios en sólo unos pocos genes clave. Pero esto no es realmente sorprendente si se piensa en los muchos rasgos que nos distinguen de nuestros parientes más cercanos. Hay diferencias no sólo en anatomía, sino también en psicología (somos los simios más amorosos, y el único cuya hembra oculta la ovulación),⁵² comportamiento (los humanos forman vínculos de pareja, los otros simios no), lenguaje, y en tamaño y configuración del cerebro (hay sin duda muchas diferencias en cómo se conectan las neuronas en el cerebro). Pese a nuestro parecido general con nuestros primos primates, la evolución de los humanos a partir de un antecesor con aspecto de simio probablemente requirió cambios genéticos sustanciales.

¿Podemos decir algo sobre los genes específicos que nos han hecho humanos? Por el momento, no mucho. Con la ayuda de «escaneos» genómicos que comparan la secuencia entera de ADN de los chimpancés y los humanos, podemos escoger *clases* de genes que han evolucionado con rapidez en la rama humana de la divergencia. Estas clases incluyen genes involucrados en el sistema inmunitario, la formación de gametos, la muerte celular y, lo más interesante de todo, la percepción sensorial y la formación de nervios. Pero afinar hasta el nivel de genes concretos y demostrar

⁵² A diferencia de la mayoría de los primates, las hembras humanas no muestran signos visibles cuando ovulan. (Los genitales de las hembras de babuino, por ejemplo, se hinchan y adquieren un vivo color rojo cuando son fértiles.) Hay más de una docena de teorías de por qué las hembras humanas evolucionaron para ocultar sus períodos de fertilidad. La más célebre es que se trata de una estrategia de las hembras para que sus parejas se queden con ellas y las ayuden en el cuidado y sostén de los hijos. Si un hombre no sabe cuándo es fértil su mujer y quiere tener hijos, tiene que quedarse con ella y copular con frecuencia.

que las mutaciones en ese gen realmente *produjeron* diferencias entre humanos y chimpancés ya es harina de otro costal. Hay algunos candidatos a genes de este tipo, entre ellos uno (*FOXP2*) que podría haber estado involucrado en la aparición del lenguaje,⁵³ aunque no tenemos pruebas concluyentes. Tal vez no las tengamos nunca. Las pruebas concluyentes de que un gen concreto causa diferencias entre humanos y chimpancés requeriría el traslado del gen de una especie a otra para ver qué diferencia produce, y ése no es un tipo de experimento que alguien querría intentar.⁵⁴

3. La espinosa cuestión de la raza

Cuando se viaja por el mundo, enseguida se ve que los humanos de distintos lugares tienen aspecto distinto. Nadie, por ejemplo, confundiría un japonés y un finés. La existencia de tipos humanos visiblemente distintos es obvia, pero no hay en la biología mayor campo de minas que la cuestión de la raza. La mayoría de los biólogos se mantienen tan alejados de ella como pueden. Una mirada a la historia de la ciencia nos dice por qué. Desde el principio de la biología moderna, la clasificación de las razas ha ido de la mano de los prejuicios raciales. En su clasificación de las razas, Linnaeus observó en el siglo XVIII que los europeos están «gobernados por leyes», los asiáticos «gobernados por opiniones» y los africanos «gobernados por caprichos». En su soberbio libro *La falsa medida del hombre*, Stephen Jay Gould documenta la perversa conexión entre la biología y la raza durante el último siglo.

En respuesta a estos desagradables episodios de racismo, algunos científicos han reaccionado de manera exagerada, argumentando que las razas humanas no tienen realidad biológica, que son meros «constructos» sociopolíticos que, como tales, no son dignos de estudio científico. Pero para los biólogos, el término «raza» siempre ha sido totalmente respetable, ¡siempre y cuando no se aplique a los humanos! Las razas (también llamadas «subespecies» o «ecotipos») son simplemente poblaciones

⁵³ La idea de que *FOXP2* es un gen del lenguaje proviene de la observación de que ha evolucionado extraordinariamente rápido en el linaje humano, que las formas imitantes del gen afectan a la capacidad de las personas para producir y comprender el habla, y que mutaciones parecidas en los ratones hacen que las crías no puedan chillar.

⁵⁴ La idea de que *FOXP2* es un gen del lenguaje proviene de la observación de que ha evolucionado extraordinariamente rápido en el linaje humano, que las formas imitantes del gen afectan a la capacidad de las personas para producir y comprender el habla, y que mutaciones parecidas en los ratones hacen que las crías no puedan chillar.

de una especie que están geográficamente separadas y que difieren genéticamente en uno o más caracteres. Hay muchas razas de plantas y animales, incluidas las poblaciones de ratón de campo que difieren sólo en el color del pelaje, las poblaciones de gorriones que difieren en el tamaño y el canto, y las razas de plantas que difieren en la forma de las hojas. Siguiendo esta definición, *Homo sapiens* claramente tiene razas. Y el hecho de que las tengamos es otra indicación de que no somos distintos de las otras especies que han evolucionado.

La existencia de razas distintas en los humanos muestra que nuestras poblaciones estuvieron separadas el tiempo suficiente para que se produjera alguna divergencia genética. Pero ¿cuánta divergencia? Y ¿se ajusta a lo que indican los fósiles sobre nuestra expansión desde África? ¿Qué tipo de selección impulsó esas diferencias?

Como podíamos esperar de la evolución, la variación física de los humanos se produce en grupos anidados unos en otros, y pese a los esforzados intentos de algunos de crear divisiones formales de razas, es completamente arbitrario dónde exactamente se sitúa la línea que demarca una raza particular. No hay fronteras marcadas: el número de razas reconocidas por los antropólogos ha ido variando entre tres y más de treinta. Una mirada a los genes muestra con mayor claridad si cabe la falta de fronteras marcadas entre las razas: prácticamente toda la variación genética revelada por las modernas técnicas moleculares muestra sólo una correlación débil con las combinaciones clásicas de caracteres físicos que se suelen utilizar para determinar la raza, como el color de la piel y el tipo de cabello.

Las pruebas genéticas directas, acumuladas durante las tres últimas décadas, muestran que sólo alrededor del 10 al 15 por 100 de toda la variación genética de los humanos está representada por diferencias *entre* «razas» que puedan reconocerse por diferencias en la apariencia física. El resto de la variación genética, del 85 al 90 por 100, se produce *entre individuos dentro de las razas*.

Lo que esto significa es que las razas no muestran diferencias de todo o nada en las formas de los genes (alelos) que poseen, sino que por lo general tienen los mismos alelos, pero con frecuencias distintas. El gen del grupo sanguíneo ABO, por ejemplo, tiene tres alelos: A, B y O. Casi todas las poblaciones humanas tienen estas tres formas, pero se encuentran con frecuencias distintas en distintos grupos. El alelo O, por ejemplo, tiene una frecuencia de 54 por 100 en los japoneses, 64 por 100 en los

fineses, 74 por 100 en los !kung sudafricanos y 85 por 100 en los navajos. Éste es un caso típico de la clase de diferencias que vemos en el ADN: no se puede diagnosticar el origen de una persona a partir de un solo gen, sino que hay que examinar una combinación de muchos genes.

En el nivel genético, por tanto, los seres humanos son notablemente parecidos. Eso es precisamente lo que cabe esperar si los humanos modernos salieron de África hace sólo de 60.000 a 100.000 años. No ha habido mucho tiempo para la divergencia genética, aunque nos hayamos diseminado por las cuatro esquinas del mundo, disgregándonos en varias poblaciones muy alejadas que se han mantenido genéticamente aisladas hasta décadas recientes.

¿Significa esto que podemos ignorar las razas humanas? No. Estas conclusiones no significan que las razas sean meros constructos mentales o que las pequeñas diferencias genéticas entre ellas carezcan de interés. Algunas diferencias raciales nos ofrecen indicios claros de las presiones evolutivas que actuaron en distintas regiones, y pueden resultar útiles en la medicina. La anemia falciforme, por ejemplo, es más común en los hombres de raza negra cuyas antepasados provengan del África ecuatorial. Como los portadores de la mutación de esta anemia poseen cierta resistencia a la malaria provocada por *Plasmodium falciparum* (la forma más mortífera de esta enfermedad), es probable que la elevada frecuencia de esta mutación en las poblaciones africanas y derivadas de África sea consecuencia de la selección natural en respuesta a la malaria. La enfermedad de Tay-Sachs es un trastorno genético mortal común entre los judíos asquenazíes y los cajunes de Luisiana, que probablemente ha alcanzado estas altas frecuencias por deriva genética en poblaciones ancestrales pequeñas. Conocer la etnia de un paciente es de enorme utilidad para el diagnóstico de estas y otras enfermedades congénitas. Además, las diferencias en las frecuencias alélicas entre los grupos raciales significa que la búsqueda de donantes de órganos apropiados, que requieren la coincidencia entre varios «genes de compatibilidad», debería tener en cuenta la raza.

La mayoría de las diferencias genéticas entre razas son triviales. Otras, sin embargo, como las diferencias físicas entre un japonés y un finés, un masai y un inuit, son muy manifiestas. Nos encontramos, pues, ante la interesante situación de que las diferencias globales en las secuencias de genes entre los pueblos son

pequeñas, pero esos mismos grupos presentan diferencias drásticas en diversos rasgos visualmente manifiestos, como el color de la piel, el color del cabello, la forma del cuerpo y la forma de la nariz. Estas obvias diferencias físicas no son características del genoma en su conjunto. ¿Por qué la pequeña cantidad de divergencia que se ha producido entre las poblaciones humanas se ha centrado en una serie de rasgos visualmente llamativos?

Algunas de estas diferencias tienen sentido como adaptaciones a los distintos ambientes en los que se han encontrado los humanos. El color de piel más oscuro de los grupos tropicales probablemente ofrezca una mayor protección frente a la intensa luz ultravioleta que produce melanomas letales, mientras que la piel pálida de los grupos de latitudes más altas facilita la penetración de la luz necesaria para la síntesis de la esencial vitamina D, que ayuda a prevenir el raquitismo y la tuberculosis⁵⁵. Pero ¿qué sentido tiene la forma de los ojos de los asiáticos, o la nariz más larga de los caucásicos? Estos rasgos no tienen ninguna relación con el medio. Para algunos biólogos, la existencia de una mayor variación entre razas en los genes que afectan a la apariencia física, que es algo que pueden evaluar fácilmente las parejas potenciales, apunta a un sola causa: la *selección sexual*.

Aparte de la pauta característica de variación genética, hay otras razones para considerar la selección sexual como una poderosa fuerza impulsora de la evolución de las razas. Somos únicos entre las especies por haber desarrollado culturas complejas. El lenguaje nos ha proporcionado la notoria capacidad de divulgar ideas y opiniones. Un grupo de humanos puede cambiar su cultura mucho más rápido de lo que puede evolucionar genéticamente. Pero el cambio cultural también puede *producir* cambios genéticos. Imaginemos que la expansión de una idea o moda implica preferencias sobre la apariencia de la pareja. Una emperatriz de Asia, por ejemplo, podría tener debilidad por los hombres de pelo negro y lacio y ojos almendrados. Al crear una moda, su preferencia se extiende culturalmente a todas sus súbditas, y, mira por dónde, con el tiempo los individuos de pelo rizado y ojos redondos son reemplazados por los de pelo lacio y ojos almendrados. Es esta «coevolución gen-cultura», la idea de que un cambio en el entorno cultural conduce

⁵⁵ Los biólogos han identificado al menos dos genes responsables de buena parte de las diferencias en la pigmentación de la piel entre las poblaciones de europeos y africanos. Curiosamente, ambos fueron descubiertos porque afectan a la pigmentación de los peces.

a nuevos tipos de selección de los genes, lo que hace especialmente atractiva la idea de la selección sexual de las diferencias físicas.

Además, la selección sexual a menudo puede actuar con increíble rapidez, lo que la convierte en un candidato ideal para impulsar la rápida diferenciación evolutiva de los rasgos físicos que se produjeron desde la más reciente migración de nuestros antepasados desde África. Por supuesto, todo esto es sólo especulación, y casi imposible de contrastar, pero al menos potencialmente explica ciertas diferencias desconcertantes entre grupos.

No obstante, la mayor parte de la controversia sobre la raza no se centra en las diferencias físicas entre poblaciones, sino en diferencias de conducta. ¿Ha hecho la evolución que ciertas razas sean más inteligentes, más atléticas o más astutas que otras? Llegados aquí se impone la cautela, pues en este ámbito las afirmaciones sin un fundamento firme pueden acabar brindándole crédito científico al racismo. Pero ¿qué dicen los datos científicos? No dicen casi nada. Aunque las distintas poblaciones puedan tener conductas distintas, coeficientes intelectuales distintos o distintas capacidades, es difícil descartar la posibilidad de que estas diferencias sean un producto no genético de diferencias ambientales o culturales. Si deseamos determinar si ciertas diferencias entre razas tienen una base en los genes, tenemos que descartar estas influencias. Los estudios de este tipo requieren experimentos controlados: quitar de sus padres a unos bebés de distintas etnias y criarlos a todos en entornos idénticos (o aleatorios). Las diferencias conductuales que quedasen serían genéticas. Como estos experimentos no son éticos, no se han realizado de manera sistemática, pero las adopciones entre culturas distintas muestran de forma anecdótica que las influencias culturales sobre el comportamiento son fuertes. Como bien observa el psicólogo Steven Pinker: «Un niño adoptado de una parte tecnológicamente subdesarrollada del mundo no tiene ningún problema en adaptarse a la sociedad moderna». Esto sugiere, al menos, que las razas no presentan grandes diferencias innatas en el comportamiento.

Mi impresión, que no pasa de una especulación bien cimentada en la información, es que las razas humanas son demasiado jóvenes para haber producido por evolución diferencias importantes en inteligencia o conducta. Y que tampoco hay buenas razones para pensar que la selección natural o sexual haya favorecido este tipo de

diferencias. En el capítulo siguiente examinaremos muchos comportamientos «universales» que se ven en todas las sociedades humanas, comportamientos como el lenguaje simbólico, el miedo a los extraños durante la infancia, la envidia, el cotilleo y la costumbre de hacer regalos. Si estos universales tienen alguna base genética, su presencia en cada sociedad da un mayor peso a la idea de que la evolución no ha producido una divergencia psicológica sustancial entre los grupos humanos.

Aunque ciertos rasgos como el color de la piel y el tipo de pelo han divergido entre poblaciones, al parecer se trata de casos especiales, impulsados por diferencias ambientales entre localidades o por selección sexual de la apariencia externa. Los datos de ADN muestran que, en términos generales, las diferencias genéticas entre poblaciones humanas son pequeñas. Decir que todos somos iguales bajo la piel es algo más de un tópico reconfortante. Y eso es precisamente lo que cabe esperar si se tiene en cuenta el breve período de evolución desde nuestro más reciente origen en África.

4. Pero ¿y ahora?

La selección no parece haber producido grandes diferencias entre razas, pero sí algunas intrigantes diferencias entre *poblaciones* dentro de grupos étnicos. Como estas poblaciones son bastante jóvenes, lo que tenemos es una prueba clara de que la selección ha actuado en los humanos en tiempos recientes.

Uno de los casos tiene que ver con nuestra capacidad para digerir la lactosa, un azúcar que se encuentra en la leche. Una enzima llamada lactasa descompone este azúcar en glucosa y galactosa, que son absorbidos más fácilmente. Como es natural, nacemos con la capacidad de digerir la leche, pues ése ha sido desde siempre el principal alimento de los bebés. Pero una vez destetados, de manera gradual dejamos de producir lactasa. Al final, muchos de nosotros perdemos completamente la capacidad de digerir la lactosa, es decir, adquirimos una «intolerancia a la lactosa» que nos hace propensos a sufrir diarreas, hinchazón y retortijones después de comer un producto lácteo. La desaparición de la lactasa después del destete probablemente sea el resultado de la selección natural: nuestros antepasados más antiguos no tenían ninguna fuente de leche una vez

acabado el amamantamiento, así que ¿para qué producir una costosa enzima que ya no se necesita?

Pero en algunas poblaciones humanas, los individuos siguen produciendo lactasa durante toda la edad adulta, lo que les proporciona una buena fuente de nutrición que no está disponible para otros. Lo interesante del caso es que la persistencia de la lactasa se encuentra sobre todo en las poblaciones que fueron, o todavía son, pastorales, o sea que crían vacas. Se incluyen aquí varias poblaciones europeas y de Oriente Medio, y algunas africanas como los masai y los tutsi. Los análisis genéticos muestran que la persistencia de la lactasa en estas poblaciones depende de un simple cambio en el ADN que regula la enzima, que se mantiene activa después de la infancia. Este gen tiene dos alelos, la forma «tolerante» (activo) y la «intolerante» (inactivo), que difieren en una sola letra del código de ADN. La frecuencia del alelo tolerante se correlaciona bien con el uso de vacas por las poblaciones: es alta (50 a 90 por 100) en las sociedades pastorales de Europa, Oriente Medio y África, y muy baja (1 a 20 por 100) en las poblaciones asiáticas y africanas que dependen de la agricultura en lugar de la leche.

Las observaciones arqueológicas muestran que los humanos comenzaron a domesticar vacas hace entre 7.000 y 9.000 años en Sudán, y la práctica se extendió por el África subsahariana y Europa unos pocos miles de años más tarde. La parte más gratificante de esta historia es que podemos determinar, a partir de la secuenciación de ADN, cuándo apareció por mutación el alelo «tolerante». Ese tiempo, hace de 3.000 a 8.000 años, encaja notablemente bien con el aumento del pastoralismo. Y lo que es mejor, el ADN extraído de esqueletos de europeos de hace 7.000 años muestra que eran intolerantes a la lactosa, como es de esperar si se tiene en cuenta que todavía no eran una sociedad pastoral.

La evolución de la tolerancia a la lactosa es otro ejemplo espléndido de coevolución gen-cultura. Un cambio puramente cultural (la cría de vacas, quizá para obtener carne) produjo una nueva oportunidad para la evolución: la capacidad de utilizar esas vacas para obtener leche. Dada esta súbita disponibilidad de un nuevo y nutritivo alimento, los antepasados que poseían el gen de la tolerancia debían tener una ventaja reproductiva considerable respecto a los que tenían el gen intolerante. De hecho, podemos calcular esta ventaja observando con qué velocidad aumentó la

frecuencia del gen de la tolerancia en las poblaciones modernas. El resultado es que los individuos tolerantes deben haber producido, por término medio, de 4 a 10 por 100 más descendientes que quienes eran intolerantes. Ésta es una selección bastante fuerte.⁵⁶

Cualquiera que dé clases de evolución humana recibe inevitablemente la siguiente pregunta: ¿todavía estamos evolucionando? Los ejemplos de la tolerancia a la lactosa y la duplicación del gen de la amilasa muestran que la selección sin duda ha actuado durante los últimos miles de años. Pero ¿todavía actúa en la actualidad? Es difícil dar una respuesta clara. Es obvio que muchos tipos de selección que supusieron desafíos para nuestros antepasados ya no se aplican: las mejoras en nutrición, higiene y sanidad han acabado con muchas enfermedades y trastornos que mataban a nuestros antepasados y han eliminado fuentes de selección natural en otro tiempo potentes. Como dice el genetista británico Steve Jones, hace quinientos años un niño británico tenía sólo un 50 por 100 de probabilidad de sobrevivir hasta la edad reproductora, una cifra que en la actualidad ha ascendido hasta el 99 por 100. Y entre quienes han sobrevivido, la intervención médica ha permitido que lleven vidas normales a muchas personas que la selección natural habría eliminado sin piedad durante la mayor parte de nuestra historia evolutiva. ¿Cuánta gente con mala vista o mala dentadura, incapacitados para cazar o masticar, hubieran muerto en la sabana africana? (Yo seguro que hubiera estado entre los incapacitados.) ¿Cuántos de nosotros hemos tenido infecciones que, sin antibióticos, nos hubieran matado? Es probable que, a causa del cambio cultural, nos estemos deteriorando genéticamente de varias maneras. Es decir, genes que en otro tiempo eran perjudiciales han dejado de ser tan malos (podemos compensar unos «malos» genes con un par de gafas o un buen dentista), de manera que persisten en la población.

Y al contrario, genes que en otro tiempo fueron buenos pueden tener ahora efectos destructivos debido a cambios culturales. Nuestra pasión por los dulces y las grasas, por ejemplo, seguramente fue adaptativa para nuestros antepasados, para quienes

⁵⁶ Recientemente se ha descrito un caso parecido para la amilasa-1, la enzima de la saliva que descompone el almidón en azúcares simples. Las poblaciones humanas que tienen mucho almidón en su dieta, como los japoneses y los europeos, tienen más copias del gen correspondiente que las poblaciones que subsisten con dietas bajas en almidón, como los pescadores o los cazadores-recolectores de la selva lluviosa. A diferencia de lo ocurrido con la enzima lactasa, la selección natural incrementó la expresión de la amilasa-1 favoreciendo la duplicación de los genes que la producen

estas delicias eran una fuente de energía valiosa pero poco frecuentes.⁵⁷ Pero ahora que estos alimentos son abundantes, nuestra herencia genética nos induce problemas de deterioro de los dientes, de obesidad y cardiovasculares. Nuestra tendencia a acumular la grasa de los alimentos ricos en energía también debió ser adaptativa cuando la variación en la abundancia local de alimentos producía situaciones de exceso o hambruna, en las que los individuos que podían almacenar calorías para los tiempos de vacas flacas tenían una ventaja selectiva.

¿Significa esto que estamos desevolucionando? Hasta cierto punto, sí, pero probablemente también nos estemos adaptando mejor a nuestro entorno moderno, que crea nuevos tipos de selección. Debemos recordar que mientras haya personas que mueran antes de acabar de reproducirse, y mientras algunas personas dejen más descendencia que otras, hay espacio para que la selección natural nos cambie. Y si existe variación genética que afecte a nuestra capacidad para sobrevivir y dejar hijos, promoverá el cambio evolutivo. Esto sin duda está ocurriendo en la actualidad. Aunque la mortalidad pre reproductora sea baja en algunas poblaciones occidentales, sigue siendo alta en otros lugares, sobre todo en África, donde la mortalidad infantil puede superar el 25 por 100. Y esa mortalidad a menudo tiene su causa en enfermedades infecciosas como el cólera, la fiebre tifoidea y la tuberculosis. Otras enfermedades, como la malaria y el sida, siguen matando a muchos niños y adultos en edad reproductora.

Las fuentes de mortalidad están ahí, como también los genes para aliviarlas. Los alelos variantes de ciertas enzimas, por ejemplo de la hemoglobina (en especial el alelo falciforme), confieren resistencia a la malaria. Y hay un gen mutante, un alelo llamado *CCR5-Δ32*, que proporciona a sus portadores una fuerte protección frente a la infección por el virus del sida. Podemos predecir que si el sida continúa siendo una fuente significativa de mortalidad, la frecuencia de este alelo aumentará en las poblaciones afectadas. Eso es la evolución, igual que lo es la resistencia a los antibióticos en las bacterias. Y sin duda existen otras fuentes de mortalidad que todavía no entendemos adecuadamente: toxinas, contaminación, estrés y otras por

⁵⁷ Recuérdese que ningún alimento tiene un sabor inherente: el «gusto» que tiene para los individuos depende de la evolución de las interacciones entre los receptores del gusto y las neuronas que éstos estimulan en el cerebro. Casi con certeza, la evolución ha modelado nuestro cerebro y papilas gustativas de manera que nos resulte agradable el sabor de los alimentos dulces y grasos, incitándonos así a buscarlos. Probablemente para una hiena la carne podrida sea tan deliciosa como un helado de vainilla lo es para nosotros.

el estilo. Si algo hemos aprendido de los experimentos de cruzamientos es que prácticamente todas las especies tienen variación genética para responder a casi cualquier forma de selección. Lenta pero inexorablemente, nuestro genoma se adapta a muchas nuevas fuentes de mortalidad. Pero no a todas. Las afecciones que tienen causas tanto genéticas como ambientales, como la obesidad, la diabetes y las enfermedades cardiovasculares, pueden no responder a la selección porque la mortalidad que producen se da sobre todo después de que las víctimas hayan dejado de reproducirse. La supervivencia de los más dotados es acompañada por la supervivencia de los más gordos.⁵⁸

Pero no es la resistencia a las enfermedades lo que interesa a la gente, por importante que sea. Lo que quieren saber es si los humanos se están haciendo más fuertes, más listos o más guapos. Eso, naturalmente, depende de si esos rasgos se asocian a una reproducción diferencial, y eso lo desconocemos. Tampoco es que importe demasiado. En nuestra cultura, que cambia con tanta rapidez, los progresos sociales mejoran nuestras capacidades mucho más que cualquier cambio en nuestros genes, a no ser, claro está, que decidamos intervenir en nuestra evolución por medio de la manipulación genética, por ejemplo preseleccionando espermatozoides y óvulos favorables.

Así pues, la lección que nos enseña el registro fósil, combinada con los descubrimientos más recientes de genética humana, confirman que somos mamíferos evolucionados, mamíferos orgullosos y de éxito, sin duda, pero mamíferos al fin y al cabo, contruidos por los mismos procesos que transformaron cualquier otra forma de vida durante los últimos miles de millones de años. Como todas las especies, no somos un producto final de la evolución, sino una obra en progreso, por mucho que nuestro progreso genético sea lento. Y aunque hemos llegado muy lejos desde los simios ancestrales, las marcas de nuestra herencia todavía se manifiestan. Gilbert y Sullivan bromeaban diciendo que no éramos más que unos monos depilados; Darwin no era tan gracioso, pero sí mucho más lírico y veraz:

He ofrecido todas las pruebas que mi capacidad me ha permitido; y debemos reconocer, según me parece a mí, que el hombre con

⁵⁸ El original contiene un juego de palabras intraducible entre fittest, el mejor dotado, y fattest, el más gordo. (N. del t.)

todas sus nobles cualidades, con su compasión hacia los más degradados, con su benevolencia no sólo hacia los otros hombres sino hacia la más humilde criatura; con su intelecto, que parece divino y ha penetrado en los movimientos y la constitución del sistema solar; con todos estos elevados poderes, todo hombre lleva todavía en su estructura corporal el sello indeleble de su humilde origen.

Capítulo 9

A vueltas con la evolución



Tras un sueño de un centenar de millones de años por fin hemos abierto los ojos a un espléndido planeta, brillante de color, abundante de vida. Al cabo de unas pocas décadas tenemos que cerrar los ojos de nuevo. ¿No es acaso una forma noble e inteligente de pasar nuestro breve tiempo bajo el sol la de intentar comprender el universo y cómo hemos venido a despertamos en él? Eso es lo que respondo cuando me preguntan —lo que ocurre con sorprendente frecuencia— por qué me molesto en levantarme por la mañana.

RICHARD DAWKINS

Contenido:

1. La bestia que llevamos dentro

Hace varios años, un grupo de hombres de negocios de un lujoso barrio de Chicago me pidió que diera una conferencia sobre la evolución contra el diseño inteligente. En su descargo debo decir que tenían la suficiente curiosidad intelectual como para desear saber más sobre la supuesta «controversia». Presenté las pruebas de la evolución y luego expliqué por qué el diseño inteligente era una explicación de la vida religiosa y no científica. Tras la charla, una persona de la audiencia se acercó a

mí y me dijo: «Admito que sus pruebas a favor de la evolución son muy convincentes, pero todavía no me la creo».

Esta frase compendia la amplia y profunda ambigüedad que muchos sienten hacia la biología evolutiva. Las pruebas son convincentes, pero no los convencen. ¿Cómo es posible? Otras áreas de la ciencia no sufren este tipo de problemas. No dudamos de la existencia de los electrones o los agujeros negros pese al hecho de que estos fenómenos están más alejados de nuestra experiencia cotidiana que la evolución. Al fin y al cabo, cualquiera puede ir a ver fósiles a un museo de historia natural, y constantemente oímos que virus y bacterias están desarrollando, por evolución, resistencia a los fármacos. Entonces, ¿cuál es el problema en el caso de la evolución?

Lo que desde luego no es un problema es la falta de pruebas. Puesto que el lector ha llegado hasta aquí, espero que haya quedado convencido de que la evolución es mucho más que una teoría científica: es un hecho científico. Hemos examinado las pruebas provenientes de muchas áreas: el registro fósil, la biogeografía, la embriología, las estructuras vestigiales, el diseño subóptimo, y otras; y todas estas pruebas muestran, sin el más mínimo destello de duda, que los organismos han evolucionado. Y no se trata únicamente de pequeños cambios «microevolutivos»: hemos visto cómo se forman nuevas especies, en tiempo real y en el registro fósil, y hemos hallado formas de transición entre grandes grupos, como las ballenas y los animales terrestres. Hemos observado la selección natural en acción, y tenemos todas las razones para pensar que puede producir organismos y caracteres complejos.

También hemos visto que la biología evolutiva realiza predicciones contrastables, aunque no, naturalmente, en el sentido de predecir cómo evolucionará una especie determinada, pues eso depende de una miríada de factores inciertos, por ejemplo qué mutaciones surgirán y cómo cambiará el medio. Pero *podemos* predecir dónde se encontrarán fósiles (como en el caso de la predicción de Darwin de que los antepasados de los humanos se encontrarían en África), podemos predecir cuándo en el registro fósil aparecerán antepasados comunes (por ejemplo, el descubrimiento del «piscípodo» *Tiktaalik* en rocas de hace 370 millones de años, descrito en el capítulo 2), y podemos predecir qué aspecto tendrán esos

antepasados antes de que los encontremos (como en el notable caso del «eslabón perdido» entre las hormigas y las avispas, también descrito en el capítulo 2). Los científicos predijeron que encontrarían fósiles de marsupiales en la Antártida, y lo hicieron. Y podemos predecir que si encontramos una especie de animal en la que los machos tengan colores vivos pero las hembras no, esa especie tendrá un sistema de apareamiento polígino.

Cada día caen cientos de observaciones y experimentos en la tolva de la literatura científica. Muchos tienen poco que ver con la evolución; son observaciones sobre detalles de fisiología, bioquímica, desarrollo, etc., pero muchos sí que la tienen. Y cada hecho que tiene algo que ver con la evolución confirma que es verdad. Cada fósil que hallamos, cada vez que secuenciamos moléculas de ADN, cada sistema de órganos que disecamos apoya la idea de que las especies evolucionaron a partir de antepasados comunes. Pese a las innumerables observaciones posibles que pueden demostrar que la evolución no es cierta, no tenemos ni una sola que lo haga. No encontramos mamíferos en rocas precámbricas, humanos en el mismo lecho de los dinosaurios, ni ningún otro fósil fuera de su orden evolutivo. La secuenciación del ADN apoya las relaciones evolutivas entre las especies que ya habíamos deducido del registro fósil. Y, tal como predice la selección natural, no encontramos ninguna especie con adaptaciones que beneficien sólo a otra especie. Hallamos genes muertos y órganos vestigiales, incomprensibles desde el prisma de la creación especial. Pese al millón de oportunidades de que se muestre falsa, la evolución siempre sale airosa. Es imposible una solidez mayor en una verdad científica.

Ahora bien, cuando decimos que «la evolución es verdad», lo que queremos decir es que las principales proposiciones del darwinismo han sido verificadas. Los organismos han evolucionado, lo han hecho de forma gradual, los linajes se han dividido en especies distintas a partir de antepasados comunes, y la selección natural es el principal motor de la adaptación. Ningún biólogo serio duda de estas proposiciones. Pero esto no significa que el darwinismo esté científicamente agotado, que no le quede nada por entender. En absoluto. La biología evolutiva está rebotante de preguntas y controversias. ¿Cómo funciona exactamente la selección sexual? ¿Seleccionan las hembras a los machos que tienen buenos genes? ¿Qué papel desempeña la deriva genética (en contraste con la selección sexual) en la

evolución de las secuencias de ADN o los caracteres de los organismos? ¿Qué homíninos fósiles se encuentran en la línea directa hacia *Homo sapiens*? ¿Qué causó la «explosión» cámbrica de la vida, durante la cual aparecieron muchos nuevos tipos de organismos en el plazo de tan sólo unos pocos millones de años?

Los críticos de la evolución se aferran a estas polémicas, argumentando que muestran que algo no anda bien en la teoría de la evolución. Pero eso es falaz. No existe desacuerdo entre los biólogos serios sobre las principales aseveraciones de la teoría evolutiva, sino sólo sobre los detalles de cómo se produjo la evolución, y sobre los papeles relativos desempeñados por diversos mecanismos evolutivos. Lejos de desacreditar la evolución, las «controversias» son en realidad la señal de un campo de investigación vivo y en progreso. Lo que impulsa a la ciencia es la ignorancia, el debate y el contraste de teorías alternativas por medio de observaciones y experimentos. Una ciencia sin controversias es una ciencia sin progreso.

Llegados a este punto podría decir simplemente: «Ya he presentado las pruebas, y muestran que la evolución es cierta. Q.E.D.». Pero eso sería negligente por mi parte, porque, como el hombre de negocios que se me acercó después de mi conferencia, muchas personas exigen más que pruebas antes de aceptar la evolución. Para ellos, la evolución plantea cuestiones tan profundas sobre el propósito, la moralidad y el significado que sencillamente no pueden aceptarla por muchas pruebas que se les presenten. No es el hecho de que hayamos evolucionado desde los simios lo que más les molesta, sino las *consecuencias* emocionales de enfrentarse a ese hecho. Pero a menos que abordemos estas preocupaciones, no conseguiremos progresar en hacer de la evolución una verdad universalmente aceptada. Cómo bien observó el filósofo norteamericano Michael Ruse: «Nadie pasa las noches en vela preocupado por las lagunas del registro fósil. Muchas personas pasan las noches en vela preocupados por el aborto y las drogas, y el declive de la familia, y el matrimonio gay, y todas las otras cosas que se oponen a los llamados “valores morales”».

Nancy Pearcey, una filósofa norteamericana conservadora y defensora del diseño inteligente, expresó este temor común:

¿Por qué se preocupa la gente de manera tan apasionada por una teoría de la biología? Porque la gente percibe intuitivamente que lo que está en juego es mucho más que una teoría científica. Saben que cuando la evolución naturalista se enseña en la clase de ciencias, también se enseñará una visión naturalista de la ética en las clases contiguas de historia, de sociología, de vida familiar y en todas las áreas del currículo.

Pearcey argumenta (y con ella están de acuerdo muchos creacionistas americanos) que todos los males percibidos en la evolución provienen de dos visiones del mundo que forman parte de la ciencia: el naturalismo y el materialismo. El naturalismo es la concepción de que la única manera de entender nuestro universo es por medio del método científico. El materialismo es la idea de que la única realidad es la materia física del universo, y que todo lo demás, incluidos los pensamientos, las voluntades y las emociones, proviene de la actuación de las leyes físicas sobre la materia. El mensaje de la evolución, y el de toda la ciencia, es de materialismo naturalista. El darwinismo nos dice que, como todas las especies, los seres humanos surgieron de la actuación de fuerzas ciegas y carentes de propósito a lo largo de millones de años. En la medida que sabemos, las mismas fuerzas que dieron origen a los helechos, las setas y las ardillas también nos produjeron a nosotros. Ahora bien, la ciencia no puede excluir completamente la posibilidad de una explicación sobrenatural. Es posible, aunque muy improbable, que todo nuestro mundo esté controlado por elfos. Pero las explicaciones sobrenaturales como ésta no son nunca necesarias: nos las arreglamos bastante bien utilizando la razón y el materialismo. Además, las explicaciones sobrenaturales siempre comportan el fin de la indagación: así lo quiso Dios, y punto. La ciencia, en cambio, nunca está satisfecha: nuestros estudios del universo proseguirán hasta la extinción de los humanos. Pero la idea de Pearcey de que estas lecciones de la evolución inevitablemente se vierten en el estudio de la ética, la historia y la «vida familiar» es innecesariamente alarmista. ¿Cómo puede extraerse significado, propósito o ética de la evolución? No se puede. La evolución es simplemente una teoría sobre el proceso y las pautas de diversificación de la vida, no un grandioso sistema filosófico sobre el significado de

la vida. No puede decirnos qué debemos hacer o cómo debemos comportarnos. Y éste es el gran problema para muchos creyentes, deseosos de hallar en la historia de nuestros orígenes una razón para existir y un sentido de cómo comportarse.

Casi todos necesitamos significado, propósito y una guía moral en nuestras vidas. ¿Cómo podemos hallarlos si aceptamos que la evolución es la historia verdadera de nuestro origen? Esta pregunta cae fuera del dominio de la ciencia. No obstante, la evolución puede arrojar algo de luz sobre si nuestra moralidad está de algún modo coartada por nuestra genética. Si nuestro cuerpo es el producto de la evolución, ¿qué podemos decir de nuestro comportamiento? ¿Llevamos todavía con nosotros el bagaje psicológico de los millones de años que pasamos en la sabana africana? Y, si es así, ¿hasta qué punto podemos superarlo?

1. La bestia que llevamos dentro

Una creencia extendida sobre la evolución es que si reconocemos que sólo somos mamíferos evolucionados, nada podrá impedirnos que actuemos como bestias. La moralidad se desvanecerá y prevalecerá la ley de la selva. Ésta es la «concepción naturalista de la ética» que Nancy Pearcey teme que invada nuestras escuelas. Como dice la vieja canción de Cole Porter:

*Dicen que los osos tienen devaneos, e incluso los camellos;
somos hombres y mamíferos: ¡portémonos mal!*⁵⁹

Una versión más reciente de esta idea fue la facilitada por el ex congresista Tom DeLay en 1999. Para sugerir que la masacre del instituto de Columbine, en Colorado, podría haber tenido raíces darwinistas, DeLay leyó en voz alta, en el recinto del congreso de Estados Unidos, una carta a un periódico de Texas en la que se sugería, con sarcasmo, que «[la masacre] podría deberse a que nuestros sistemas escolares enseñan a los niños que no somos más que unos simios pretenciosos que han evolucionado a partir de algún primordial caldo de lodo». En su superventas *Godless: The Church of Liberalism*, la crítica conservadora Ann Coulter es si cabe más explícita, afirmando que, a los liberales, la evolución «les

⁵⁹ «They say that bears have love affairs / And even camels / We're men and mammals —let's misbehave!»

permite desvincularse de la moralidad. Haz lo que te parezca: tírate a la secretaria, asesina a la abuela, aborta a tu hijo deficiente... ¡Darwin dice que eso beneficia a la humanidad!». Darwin, por supuesto, nunca dijo nada parecido.

Pero ¿*afirma* siquiera la moderna biología evolutiva que estamos genéticamente constituidos para comportarnos como nuestros supuestamente bestiales antepasados? Para muchos, esta impresión proviene de la inmensamente popular obra del evolucionista Richard Dawkins, *El gen egoísta*, o más bien de su título. Éste parece implicar que la evolución hace que nos comportemos de manera egoísta, que nos preocupemos sólo por nosotros mismos. ¿Quién querría vivir en un mundo así? Pero el libro no dice nada de eso. Como Dawkins explica con toda claridad, el gen «egoísta» es una metáfora de cómo funciona la selección natural. Los genes actúan *como* si fueran moléculas egoístas: las que producen las mejores adaptaciones actúan como si estuvieran apartando a codazos a otros genes en la batalla por la existencia futura. Desde luego que los genes egoístas pueden producir comportamientos egoístas. Pero existe también una voluminosa literatura científica que muestra cómo la evolución puede favorecer a genes que conducen a la cooperación, el altruismo e incluso la moralidad. Quizá nuestros antepasados no fuesen las bestias imaginadas, y en cualquier caso la jungla, con su gran diversidad de animales, muchos de los cuales viven en sociedades bastante complejas y basadas en la cooperación, no es el lugar sin ley que podría suponerse.

Así pues, si nuestra evolución como simios sociales ha dejado una huella en nuestro cerebro, ¿qué tipo de conductas humanas podrían estar escritas en los genes? El propio Dawkins ha dicho que *El gen egoísta* podría haberse titulado igualmente *El gen cooperativo*. ¿Estamos constituidos genéticamente para ser egoístas, cooperativos o ambos?

En años recientes ha surgido una nueva disciplina académica que intenta dar respuesta a esta pregunta, interpretando el comportamiento humano a la luz de la evolución. Los orígenes de la *psicología evolutiva* se remontan al libro de E. O. Wilson *Sociobiología*, una amplia síntesis evolutiva del comportamiento animal que sugería, en su último capítulo, que el comportamiento humano podía tener también explicaciones evolutivas. Buena parte de la psicología evolutiva intenta explicar las conductas de los humanos modernos como resultados adaptativos de la actuación

de la selección natural en nuestros antepasados. Si situamos los comienzos de la civilización hacia 4.000 a. C., cuando existían ya complejas sociedades tanto urbanas como agrícolas, entonces sólo han transcurrido unos seis mil años. Esto representa sólo una milésima parte del tiempo total que el linaje humano ha estado separado del linaje de los chimpancés. Como la guinda encima del pastel, unas 250 generaciones de sociedad civilizada descansan sobre unas 300.000 generaciones durante las cuales debimos ser cazadores-recolectores que vivían en pequeños grupos sociales. La selección debió disponer de mucho tiempo para adaptarnos a ese estilo de vida. Los psicólogos evolutivos denominan al entorno físico y social al que nos adaptamos durante este largo período «Ambiente de Adaptación Evolutiva», o AAE.⁶⁰ Sin duda, como dicen los psicólogos evolutivos, debemos retener muchas conductas que evolucionaron en el AAE, aunque ya no tengan valor adaptativo, o que incluso sean *mal adaptativas*. Después de todo, ha habido relativamente poco tiempo para el cambio evolutivo desde el auge de la civilización moderna.

Lo cierto es que todas las sociedades humanas comparten cierto número de «universales humanos» que son ampliamente reconocidos. Donald Brown ha confeccionado una lista de docenas de caracteres de este tipo en su libro del mismo título, entre ellos el uso del lenguaje simbólico (en el que las palabras son símbolos abstractos de acciones, objetos y pensamientos), la división del trabajo entre los sexos, la dominancia masculina, las creencias religiosas o sobrenaturales, el duelo de los muertos, la tendencia a favorecer a los parientes antes que a quienes no lo son, las artes decorativas y la moda, la danza y la música, el cotilleo, la ornamentación del cuerpo y el gusto por los dulces. Como la mayoría de estos comportamientos distinguen a los humanos de otros animales, pueden verse como aspectos de la «naturaleza humana».

Pero no deberíamos suponer siempre que las conductas extendidas reflejan adaptaciones con base genética. El problema es que para muchos comportamientos

⁶⁰ La mayoría de los psicólogos evolutivos creen que el AAE es una realidad, que durante los millones de años de la evolución humana, el entorno, tanto físico como social, se mantuvo relativamente constante. Pero por supuesto no sabemos que sea así. Al fin y al cabo, durante 7 millones de años de evolución, nuestros antepasados vivieron en distintos climas, interaccionaron con diversas especies (incluidos otros homínidos), interaccionaron con varios tipos de sociedad y se extendieron por todo el planeta. La sola idea de que existió un «ambiente ancestral» al que podemos apelar para explicar las conductas de los humanos actuales es una presunción intelectual, una suposición que hacemos porque, al final, es lo único que podemos hacer.

humanos modernos es demasiado fácil erigir una razón evolutiva de por qué debían haber sido adaptativos en el AAE. Por ejemplo, el arte y la literatura podrían haber sido el equivalente de la cola del pavo real, de manera que los artistas y los escritores dejarían más genes porque sus obras atraían a las mujeres. ¿La violación? Es una forma de que los hombres que no logran encontrar pareja dejen descendencia; estos hombres habrían sido seleccionados en el AAE por su propensión a domeñar y forzar a copular a las mujeres. ¿La depresión? No hay problema: podría haber sido una manera de liberarse de manera adaptativa de las situaciones de estrés, de recoger los propios recursos mentales para poder enfrentarse a la vida. O podría representar una forma ritual de derrota social que permitida al individuo retirarse de la competición, recuperarse y volver a luchar otro día. ¿La homosexualidad? Aunque este comportamiento parezca ser justo lo contrario de lo que la selección natural promovería (los genes de la conducta sexual no se transmitirían y pronto desaparecerían de las poblaciones), puede salvarse la situación si suponemos que, en el AAE, los machos homosexuales se quedaban en casa y ayudaban a sus madres a producir más descendencia. En esta circunstancia, los genes «gays» se transmitirían debido a que los homosexuales producirían más hermanos y hermanas, y estos individuos compartirían esos genes. Por cierto que ninguna de estas explicaciones ha salido de mi magín. Todas han aparecido en publicaciones científicas.

Se está produciendo un tendencia creciente (y perturbadora) a que psicólogos, biólogos y filósofos «darwinicen» todo aspecto de la conducta humana, convirtiendo su estudio en una suerte de juego de salón científico. Pero las reconstrucciones imaginativas de cómo podrían haber evolucionado las cosas no son ciencia; son relatos. Stephen Jay Gould las satirizaba llamándolas «Just-So Stories» («historias ad hoc») en referencia al libro epónimo de Kipling que daba explicaciones deliciosas y fantasiosas de diversos caracteres de los animales («Cómo el leopardo obtuvo sus manchas» y otros cuentos).

Pese a ello, no podemos suponer tampoco que *todos* los comportamientos carezcan de una base evolutiva. Seguro que algunos sí la tienen. Se incluyen aquí aquellas conductas que casi con certeza son adaptaciones porque están ampliamente compartidas entre los animales, y cuya importancia para la supervivencia y la

reproducción es obvia. Las conductas que vienen a la mente son las de comer, dormir (aunque sigamos sin saber por qué necesitamos dormir, un período de reposo del cerebro es común a muchos animales), el impulso sexual, el cuidado parental y la tendencia a favorecer a los parientes antes que a quienes no lo son.

Una segunda categoría de conductas incluye aquellas que muy posiblemente han evolucionado por selección, pero cuyo significado adaptativo no es tan claro como el de, por ejemplo, el cuidado parental. El comportamiento sexual es el más obvio. Como en muchos animales, los machos humanos son en general promiscuos y las hembras selectivas (y eso pese a la monogamia socialmente forzada que prevalece en muchas sociedades). Los machos son de mayor tamaño y más fuertes que las hembras, y tienen niveles más altos de testosterona, una hormona asociada con la agresión. En las sociedades en las que se ha medido el éxito reproductor, su variación entre los machos es invariablemente mayor que entre las hembras. Los muestreos estadísticos de anuncios personales en los periódicos (que, debo admitir, no es la forma más rigurosa de investigación científica) revelan que mientras que los hombres buscan mujeres más jóvenes con cuerpos apropiados para tener hijos, las mujeres prefieren hombres algo mayores que ellas que tengan riqueza, estatus social y estén dispuestos a invertir en su relación. Todas estas características tienen sentido a la luz de lo que sabemos sobre la selección sexual en los animales. Aunque esto no nos convierta en el equivalente de los elefantes marinos, los paralelos implican fuertemente que las características de nuestro cuerpo y comportamiento fueron moldeados por la selección sexual.

Pero una vez más conviene que seamos cautelosos a la hora de extrapolar de otros animales. Los hombres podrían ser de mayor talla no porque compitan por las mujeres, sino por el resultado evolutivo de una división del trabajo: en el AAE, quizá los hombres cazaban mientras las mujeres, que paren los hijos, se quedan a criarlos y a recolectar alimentos. (Nótese que ésta sigue siendo una explicación evolutiva, pero que apela a la selección natural, no a la sexual.) También hacen falta verdaderos malabarismos mentales para explicar evolutivamente *todos* los aspectos de la sexualidad humana. En las sociedades occidentales modernas, por ejemplo, las mujeres se adornan mucho más que los hombres: maquillaje, vestidos variados y atractivos, etc. Esto es muy distinto de lo que ocurre en la mayoría de los

animales con selección sexual, como las aves del paraíso, en los que son los machos los que evolucionan hacia exhibiciones elaboradas, colores corporales y ornamentos. Además, siempre existe la tentación de mirar el comportamiento en nuestro entorno más inmediato, en nuestra sociedad, y olvidarse de que los comportamientos suelen ser variables en el tiempo y el espacio. Ser homosexual seguramente no es igual en San Francisco en la actualidad que en Atenas hace dos mil quinientos años. Pocos comportamientos son tan absolutos, tan inflexibles como el lenguaje o el dormir. No obstante, podemos estar bastante seguros de que algunos aspectos de la conducta sexual, la pasión universal por los dulces y las grasas, y nuestra tendencia a acumular reservas de grasa son caracteres que fueron adaptativos en nuestros antepasados, pero no necesariamente en la actualidad. Los lingüistas como Noam Chomsky y Steven Pinker han argumentado de manera convincente que el uso del lenguaje simbólico es probablemente una adaptación genética, y que algunos aspectos de la sintaxis y la gramática están codificados en nuestro cerebro.

Por último, está la gran categoría de conductas que a veces se han visto como adaptaciones pero sobre cuya evolución no sabemos prácticamente nada. Se incluyen aquí muchos de los universales humanos más interesantes, como los códigos éticos, la religión y la música. Es inacabable el número de historias (y libros) que explican cómo podrían haber evolucionado estos caracteres. Algunos pensadores modernos han construido elaboradas historias de cómo nuestro sentido de la moralidad, y muchos preceptos morales, podrían ser el resultado de la actuación de la selección natural sobre la mentalidad de un primate social, del mismo modo que el lenguaje permitió construir una sociedad y una cultura complejas. Pero al final estas ideas acaban en especulaciones no contrastadas, y probablemente incontrastables. Es casi imposible reconstruir la evolución de estas características (o incluso determinar si *son* caracteres genéticos que hayan evolucionado) y si son adaptaciones directas o, como el hacer fuego, simples productos secundarios de un cerebro complejo que por evolución desarrolló una flexibilidad conductual que le permitiera cuidar de su cuerpo. Es conveniente sospechar profundamente de las especulaciones que no vienen acompañadas de pruebas contundentes. Mi propia opinión es que las conclusiones sobre la evolución de la conducta humana deberían cimentarse en investigaciones al menos tan

rigurosas como las utilizadas en el estudio de los animales distintos de los humanos. Si el lector se molesta en leer las revistas científicas sobre comportamiento animal, verá que este requisito supone un nivel de exigencia bastante alto que llevaría a muchas de las proposiciones de la psicología evolutiva a desaparecer sin dejar rastro.

No hay razón, por tanto, para que nos veamos a nosotros mismos como simples marionetas que bailan movidas por los hilos de la evolución. Sí, ciertas partes de nuestra conducta podrían estar codificadas genéticamente, infundidas por la selección natural en nuestros ancestros de la sabana. Pero los genes no son el destino. Una lección que todos los genetistas conocen, pero que no parece haber penetrado en la conciencia de los legos en ciencia, es que «genético» no significa «que no puede cambiarse». Son muchos y variados los factores ambientales que pueden afectar a la expresión de los genes. La diabetes juvenil, por ejemplo, es una enfermedad genética, pero sus efectos perniciosos pueden eliminarse casi completamente con pequeñas dosis de insulina: una intervención ambiental. Mi mala visión, que corre en la familia, no es ningún impedimento gracias a las gafas. De igual modo, podemos limitar nuestro voraz apetito de chocolate y carne con un poco de voluntad y la ayuda de algunas reuniones de obesos anónimos, y la institución del matrimonio ha hecho mucho por refrenar el comportamiento promiscuo de los hombres.

El mundo sigue rebosante de egoísmo, inmoralidad e injusticia. Pero si se mira en otros lugares se encontrarán también actos innumerables de bondad y altruismo. Algunos elementos de ambas conductas quizá provengan de nuestra herencia evolutiva, pero estos actos son sobre todo una cuestión de elección, no de genes. Donar dinero a una ONG, trabajar de voluntario para erradicar la enfermedad en los países pobres o luchar contra los incendios con enorme riesgo personal; ninguno de estos actos nos puede haber sido inculcado directamente por la evolución. A medida que pasan los años, y aunque no nos han abandonado horrores como la «limpieza étnica» de Ruanda y de los Balcanes, vemos cómo un aumento del sentido de justicia barre el mundo. En tiempos de los romanos, algunas de las mentes más sofisticadas que jamás hayan existido consideraban que sentarse a ver cómo unos seres humanos literalmente luchaban por su vida unos contra otros, o contra

animales salvajes, era un exquisito entretenimiento para pasar la tarde. No hay en la actualidad ninguna cultura en el planeta que no lo considere una barbarie. De igual modo, el sacrificio humano fue en otro tiempo un acto importante en muchas sociedades. También eso, por fortuna, ha desaparecido. En muchos países, la igualdad de hombres y mujeres se da por hecho. Las naciones ricas están ganando conciencia de su obligación de ayudar a los países más pobres, no de explotarlos. Nos preocupamos más por el trato a los animales. Nada de esto tiene nada que ver con la evolución, pues son cambios que se producen demasiado rápido como para estar causados por los genes. Está claro, pues, que sea cual sea nuestra herencia genética, no es una camisa de fuerza que nos atrape para siempre en las maneras «bestiales» de nuestros antepasados. La evolución nos dice de dónde venimos, no adónde vamos.

Y aunque la evolución actúa de forma materialista y sin propósito, eso no quiere decir que nuestra vida carezca de propósito. Ya sea por medio del pensamiento religioso o del secular, establecemos nuestros propios propósitos, significado y moralidad. Somos muchos los que encontramos significado en nuestro trabajo, en nuestra familia o en nuestras vocaciones. Hallamos solaz y alimento para el cerebro en la música, el arte, la literatura y la filosofía.

Muchos científicos han hallado una profunda satisfacción espiritual en la contemplación de las maravillas del universo y en nuestra capacidad para extraer sentido de ellas. Albert Einstein, a quien a menudo se califica, equivocadamente, de persona convencionalmente religiosa, veía en el estudio de la naturaleza una experiencia espiritual:

Lo mejor que podemos experimentar es el misterio. Es la emoción fundamental que descansa en la cuna del verdadero arte y de la verdadera ciencia. Quien lo conozca y no pueda ya sentir la admiración, quien no pueda ya sentir el asombro, es como si estuviera muerto, es como una vela apagada. Fue la experiencia del misterio, aunque se mezclaba con el temor, lo que engendró la religión. Un conocimiento de la existencia de algo que no podemos penetrar, de las manifestaciones de la más profunda razón y la más radiante belleza, que sólo son accesibles para nuestra razón en sus

formas más elementales, éste es el conocimiento y ésta la emoción que constituyen la verdadera actitud religiosa; en este sentido, y sólo en este, soy una persona profundamente religiosa... Basta para mí el misterio de la eternidad de la vida, y el atisbo de la maravillosa estructura de la realidad, junto con el empeño incondicional por comprender una porción, por pequeña que sea, de la razón que se manifiesta a sí misma en la naturaleza.

Obtener de la ciencia la espiritualidad significa también aceptar el sentido de humildad que la acompaña, humildad ante el universo y ante la posibilidad de que nunca tengamos todas las respuestas. El físico Richard Feynman fue uno de estos incondicionales:

No tengo que conocer la respuesta. No me atemoriza no saber las cosas, estar perdido en un universo misterioso y sin propósito, que posiblemente es como realmente es, por lo que yo sé. No me asusta.

Pero es demasiado esperar que todos sientan lo mismo, o suponer que *El origen de las especies* puede suplantar la Biblia. Sólo relativamente pocas personas pueden encontrar consuelo y sustento perdurables en los prodigios de la naturaleza; aún menos tienen el privilegio de acrecentar esas maravillas gracias a sus propias investigaciones. El novelista inglés Ian McEwan lamenta el fracaso de la ciencia a la hora de reemplazar la religión convencional:

Nuestra cultura secular y científica no ha reemplazado o siquiera desafiado a estos sistemas de pensamiento sobrenaturales y mutuamente incompatibles. El método científico, el escepticismo o la racionalidad en general tienen que encontrar todavía una narración de ámbito general y con el suficiente poder, simplicidad y atractivo general para competir con las viejas historias que dieron sentido a la vida de las gentes. La selección natural es una explicación poderosa, elegante y económica de la vida en la tierra en toda su diversidad, y quizá contenga las simientes de un mito de

*la creación rival que tenga el valor añadido de ser cierto. Pero todavía espera la llegada de alguien que lo sintetice, de su Milton...
La razón y el mito siguen siendo incómodos compañeros de lecho.*

Yo ciertamente no me arrogo el papel de Milton del darwinismo. Pero puedo al menos intentar despejar las concepciones erróneas que atemorizan a la gente sobre la evolución y sobre la prodigiosa derivación de la abrumadora diversidad de la vida a partir de un sola molécula desnuda con capacidad de replicación. La mayor de estas concepciones erróneas es que por aceptar la evolución de algún modo la sociedad se vendrá abajo, se desmoronará la moral, nos veremos impelidos a comportarnos como bestias y procrearemos una nueva generación de Hitlers y Stalins.

Eso simplemente no ocurrirá, como sabemos gracias a los muchos países europeos cuyos residentes han abrazado plenamente la evolución y aun así se las arreglan para seguir siendo civilizados. La evolución no es ni moral ni inmoral. Simplemente es, y a nosotros nos toca entenderla. He intentado mostrar que dos cosas que *podemos* entender de la evolución son que es simple y que es prodigiosa. Lejos de coartar nuestras acciones, el estudio de la evolución puede liberarnos la mente. Los seres humanos quizá no sean más que una única ramita en todo el vasto y ramoso árbol de la evolución, pero somos un animal muy especial. Al forjar nuestro cerebro, la selección natural ha abierto ante nosotros mundos enteros. Hemos aprendido cómo mejorar nuestras vidas inmensurablemente con respecto a las de nuestros antepasados, aquejados por la enfermedad, el malestar y la búsqueda constante de alimentos. Podemos volar sobre las más altas montañas, bucear a las profundidades de los mares e incluso viajar a otros planetas. Tenemos sinfonías, poemas y libros que llenan nuestras pasiones estéticas y satisfacen nuestras necesidades emocionales. Ninguna otra especie ha conseguido nada remotamente parecido.

Pero hay algo todavía más maravilloso. Somos el único animal a quien la selección natural ha legado un cerebro lo bastante complejo para comprender las leyes que gobiernan el universo. Deberíamos sentirnos orgullosos de ser la única especie que ha averiguado cómo ha llegado a ser.

Glosario

NOTA: Para algunos términos, como «gen», los científicos tienen varias definiciones, a menudo técnicas y a veces reñidas. En estos casos, doy aquella que considero la definición operativa más común.

Adaptación: Carácter de un organismo que evolucionó por selección natural porque realizaba una función determinada mejor que los que lo precedieron. Las flores de las plantas, por ejemplo, son adaptaciones para atraer polinizadores.

Alelo: Forma particular de un gen producida por mutación. Por ejemplo, hay tres alelos del gen que codifica la proteína que producen los grupos sanguíneos, los alelos A, B y O. Todos son mutaciones de un mismo gen que difieren sólo un poco en su secuencia de ADN.

Atavismo: Expresión ocasional en una especie actual de un carácter que había estado presente en una especie ancestral pero había desaparecido. Un ejemplo es la aparición esporádica de una cola en los humanos recién nacidos.

Barreras de aislamiento reproductor: Caracteres de una especie con base genética que impiden que pueda formar híbridos fértiles con otra especie, por ejemplo diferencias en los rituales de cortejo que impiden los cruzamientos entre poblaciones.

Biogeografía: Estudio de la distribución de las plantas y los animales sobre la superficie de la Tierra.

Carácter vestigial: Carácter que es una reliquia o remanente de un carácter que en otro tiempo había sido útil para una especie ancestral, pero que ya no se utiliza del mismo modo. Los caracteres vestigiales pueden no ser funcionales (como las alas del kiwi) o pueden haberse aprovechado para nuevos usos (como las alas del avestruz).

Deriva genética: Cambio evolutivo que se produce a consecuencia del muestreo aleatorio de distintos alelos de una generación a la siguiente. Es causa de cambios evolutivos pero no de adaptaciones.

Dimorfismo sexual: Carácter que difiere entre los machos y las hembras de una especie, como el tamaño o el vello corporal en los humanos.

Eficacia biológica (fitness): En biología evolutiva, término técnico que designa el número relativo de descendientes producidos por los portadores de un alelo por comparación con los portadores de otro alelo. Cuanto mayor es el número de descendientes, mayor es la eficacia biológica. Pero el término inglés se usa también de manera más laxa para indicar lo bien adaptado que se encuentra un organismo a su entorno y su forma de vida.

Endémico: Adjetivo que se aplica a una especie restringida a una región determinada y que no se encuentra en ningún otro lugar, como los pinzones endémicos de las islas Galápagos. El sustantivo es «endemismo».

Especiación: Evolución de nuevas poblaciones que están reproductivamente aisladas de otras poblaciones.

Especiación aloploiploide: Origen de una nueva especie de planta a partir de la hibridación de dos especies distintas, seguida de la duplicación del número de cromosomas en el híbrido.

Especiación autoploiploide: Origen de una nueva especie de planta a partir de la duplicación del número de cromosomas de una especie ancestral.

Especiación geográfica: Especiación que comienza con el aislamiento geográfico de dos o más poblaciones que posteriormente desarrollan barreras reproductoras de naturaleza genética que las mantienen aisladas.

Especiación simpátrica: Especiación que tiene lugar sin que existan barreras geográficas que aislen físicamente a las poblaciones.

Especie: Grupo de poblaciones naturales que pueden cruzarse entre sí pero están reproductivamente aisladas de otros grupos de poblaciones. Ésta es la definición de «especie» preferida por la mayoría de los biólogos, que la conocen como «concepto biológico de especie».

Especies hermanas: Dos especies que son mutuamente sus parientes más próximos, es decir, que están más estrechamente emparentadas entre sí que con cualquier otra especie. Los humanos y los chimpancés son un ejemplo.

Evolución: Cambio genético en las poblaciones, que con el tiempo a menudo produce cambios en caracteres observables de los organismos.

Gametos: Células reproductoras, como los espermatozoides y óvulos o huevos de los animales, y el polen y los óvulos de las plantas.

Gen: Segmento de ADN que produce una proteína o un producto de ARN.

Genoma: Totalidad del material genético de un organismo, que comprende todos sus genes y todo su ADN.

Heredabilidad: Proporción de la variación observable en un carácter que es explicada por la variación entre los genes de los individuos. Toma valores entre cero (toda la variación se debe al ambiente) y uno (toda la variación se debe a los genes). La heredabilidad da una idea de la facilidad con la que un carácter responderá a la selección natural o artificial. La heredabilidad del peso humano, por ejemplo, varía entre 0,6 y 0,85, dependiendo de la población estudiada.

Homínino: Todas las especies, vivas o extintas, en el lado «humano» del árbol evolutivo después de que nuestro antepasado común con los chimpancés se dividiera en dos linajes que condujeron a los humanos modernos y a los modernos chimpancés.

Homólogos: Par de cromosomas que contienen los mismos genes, aunque pueden tener distintas formas de esos genes.

Isla oceánica: Isla que nunca estuvo conectada con un continente sino que, como en el caso de las islas Hawái y Galápagos, tuvo su origen en volcanes y otras fuerzas que produjeron la emergencia de la tierra desde el fondo del océano.

Islas continentales: Islas que, como Gran Bretaña o Madagascar, en otro tiempo formaron parte de algún continente pero quedaron separadas de él por deriva continental o por el ascenso del nivel del mar.

Lek: Área donde se congregan los machos de una especie para realizar sus exhibiciones de cortejo.

Macroevolución: Cambio evolutivo «grande», lo que generalmente se interpreta como un gran cambio en la forma corporal o la evolución de uno u otro tipo de planta o animal a partir de otro tipo. El cambio de nuestros antepasados primates a los humanos modernos, o de los primeros reptiles a las aves, puede considerarse macroevolución.

Microevolución: Cambio evolutivo «pequeño», como el cambio de tamaño o de color de una especie. Un ejemplo es la evolución de distinto color de la piel o tipo de cabello en poblaciones humanas; otro ejemplo es la evolución de resistencia a los antibióticos en las bacterias.

Mutación: Cambio pequeño en el ADN que por lo general afecta sólo a una base en la secuencia de nucleótidos que constituye el código genético de un organismo. Las mutaciones suelen aparecer como errores durante la copia de moléculas de ADN que acompaña a la división celular.

Nicho ecológico: Conjunto de condiciones físicas y biológicas propias de cada especie en la naturaleza, por ejemplo el clima, los alimentos, los depredadores, las presas, etc.

Partenogénesis: Forma de reproducción asexual en la que los individuos forman huevos que se desarrollan hasta llegar a adultos sin fecundación.

Poliandria: Sistema de apareamiento en el que las hembras se aparean con más de un macho.

Poliginia: Sistema de apareamiento en el que los machos se aparean con más de un hembra.

Poliploidía: Forma de especiación por hibridación en la que la nueva especie tiene un número mayor de cromosomas. Puede producirse por autopoliploidía o alopoliploidía (véanse las entradas correspondientes)

Pseudogen: Gen inactivo que no produce una proteína.

Radiación adaptativa: Producción de varias o muchas especies nuevas a partir de un antepasado común, por lo general cuando el antepasado invade un hábitat nuevo y desocupado, como un archipiélago. La radiación es «adaptativa» porque las barreras genéticas entre las especies surgen como producto secundario de la selección natural que adapta a distintas poblaciones a sus ambientes. Un ejemplo es la profusa especiación de trepadores mieleros, unas aves de Hawái.

Raza: Población geográficamente diferenciada de una especie que difiere de otras poblaciones en uno o más caracteres. Los biólogos a veces llaman a las razas «ecotipos» o «subespecies».

Selección estabilizadora: Selección natural que favorece a los individuos «medios» de una población de preferencia a los «extremos». Un ejemplo es la mayor probabilidad de supervivencia de los bebés humanos con un peso medio al nacer por comparación con los nacidos con un peso más alto o más bajo que la media.

Selección natural: Reproducción diferencial y no aleatoria de alelos de una generación a la siguiente. Suele ser el resultado de que los portadores de determinados alelos estén mejor capacitados para sobrevivir o reproducirse en su ambiente que los portadores de alelos alternativos.

Selección sexual: Reproducción diferencial y no aleatoria de alelos que proporcionan a sus portadores distinto éxito en la obtención de parejas. Es una forma de selección natural.

Sistemática: Rama de la biología evolutiva dedicada a discernir las relaciones evolutivas entre especies y a construir árboles evolutivos (filogenéticos) que expresen esas relaciones.

Tetrápodo: Animal vertebrado con cuatro extremidades.

Sugerencias de lectura

1. General

- -Browne, J., *Charles Darwin: Voyaging*, Knopf, Nueva York, 1996; *Charles Darwin: The Power of Place*, Knopf, Nueva York, 1996. (Publicados en 2003 conjuntamente por Princeton University Press.) La biografía de Darwin escrita por Janet Browne en dos volúmenes ofrece un tratamiento magistral y bellamente escrito del hombre, su entorno y sus ideas. Con diferencia, la mejor de la muchas biografías de Darwin que se han escrito (hay trad, cast.: *Charles Darwin: Viajes y Charles Darwin: El poder del lugar*, Universidad de Valencia, Servicio de Publicaciones, Valencia, 2008/2009).
- -Carroll, S. B., *Endless Forms Most Beautiful*, W. W. Norton, Nueva York, 2005. Una animada discusión de la frontera entre la evolución y la biología del desarrollo de la mano de uno de los investigadores más prominentes del «evo devo».
- -Chiappe, L. M., *Glorified Dinosaurs: The Origin and Early Evolution of Birds*, Wiley, Hoboken, Nueva Jersey, 2007. Una explicación actual y escrita con claridad del origen de las aves a partir de dinosaurios con plumas.
- -Cronin, H., *The Ant and the Peacock: Sexual Selection from Darwin to Today*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992. Una introducción a la selección sexual para el público general.
- -Darwin, C., *The Origin of Species*, Murray, Londres, 1859. El libro con el que empezó todo esto: un clásico universal. El mejor libro de divulgación científica de todos los tiempos (pues en realidad fue escrito para el público británico) y el libro de ciencia que toda persona debe leer para ser realmente culta. Aunque la prosa victoriana echa atrás a algunos, hay fragmentos de gran belleza, y los argumentos se imponen (hay trad, cast.: *El origen de las especies*, Alianza, Madrid, 2009).
- -Dawkins, R. *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene*, Oxford University Press, Oxford, 1982. En uno de sus mejores libros, Dawkins discute cómo la selección en una especie puede producir un variedad de

caracteres, entre ellos alteraciones del ambiente y del comportamiento de otras especies.

- —*The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design*, W. W. Norton, Nueva York, 1996. Canto de elogio al poder y la belleza de la selección natural. La obra de Dawkins, uno de los mejores escritores científicos, se lee con voracidad (hay trad, cast.: *El relojero ciego*, RBA, Barcelona, 1993).
- —*The Ancestor's Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Evolution*, Weidenfeld & Nicolson, Nueva York, 2004. Un relato extenso y espléndidamente ilustrado de la evolución, que comienza por los humanos y se va remontando en el tiempo hasta nuestros antepasados comunes con otras especies (hay trad, cast.: *El cuento del antepasado*, Antoni Bosch Editor, Barcelona, 2008).
- —*The Selfish Gene: 30th Anniversary Edition*, Oxford University Press, Oxford, 2006 (1^a edición de 1976). Otro clásico, y posiblemente el mejor libro nunca escrito sobre la teoría de la evolución moderna; esencial para quien desee entender la selección natural (hay trad. cast.: *El gen egoísta*, Salvat, Barcelona, 2000).
- -Dunbar, R., L. Barrett y J. Lycett, *Evolutionary Psychology: A Beginner's Guide*, Oneworld, Oxford, 2005. Una guía breve pero valiosa de este campo incipiente.
- -Futuyma, D. J., *Evolution*, Sinauer Associates, Sunderland (MA), 2005. El mejor libro de texto académico de biología evolutiva. Salvo para estudiantes y estudiosos de biología, este libro puede ser demasiado técnico para una lectura completa, pero merece la pena consultarlo como obra de referencia.
- -Gibbons, A., *The First Human: The Race to Discover Our Earliest Ancestors*, Doubleday, Nueva York, 2006. Buena exposición de los descubrimientos más recientes de la paleoantropología que, además de la ciencia, se ocupa también de las fuertes y competitivas personalidades de los protagonistas de la búsqueda de nuestros orígenes.
- -Gould, S. J. *The Richness of Life: The Essential Stephen Jay Gould*, S. Rose, ed., W. W. Norton, Nueva York, 2007. Este libro vale por muchos, pues todas las obras y ensayos de Gould merecen ser leídos. Esta colección póstuma

comprende cuarenta y cuatro ensayos del más elocuente exponente y defensor de la evolución (hay trad, cast.: *Gould esencial*, Crítica, Barcelona, 2004).

- -Johanson, D. y B. Edgar, *From Lucy to Language*, edición revisada, Simon and Schuster, Nueva York, 2006. Quizá el mejor relato general de la evolución humana en casi todos sus aspectos, escrito por uno de los descubridores de «Lucy», el espécimen de *Australopithecus afarensis*.
- -Kitcher, P., *Vaulting Ambition: Sociobiology and the Quest for Human Nature*, MIT Press, Cambridge (MA), 1987. Una crítica clara y sólidamente argumentada de la sociobiología.
- -Mayr, E., *What Evolution Is*, Basic Books, Nueva York, 2002. Un popular resumen de la teoría evolutiva moderna escrito por uno de los más grandes biólogos de nuestro tiempo.
- -Mindell, David, *The Evolving World: Evolution in Everyday Life*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 2007. Una discusión del valor práctico de la biología evolutiva, incluidas sus aplicaciones en la agricultura y la medicina.
- -Pinker, S., *The Blank Slate: The Modern Denial of Human Nature*, Viking, Nueva York, 2002. Una argumentación convincente y amena a favor del lado del «ambiente» en el debate naturaleza o ambiente (hay trad, cast.: *La tabla rasa: la negación moderna de la naturaleza humana*, Paidós, Barcelona, 2003).
- -Prothero, D. R., *Evolution: What the Fossils Say and Why It Matters*, Columbia University Press, Nueva York, 2007. La mejor obra divulgativa sobre el registro fósil, con una extensa discusión de las pruebas fósiles de la evolución, incluidas las formas de transición, y una crítica de cómo distorsionan la evidencia los creacionistas.
- -Quammen, D., *The Song of the Dodo: Island Biogeography in an Age of Extinction*, Scribner's, Nueva York, 1997. Una absorbente discusión de muchos aspectos de la biogeografía insular, entre ellos su historia, teoría moderna e implicaciones para la conservación.
- -Shubin, N. *Your Inner Fish*, Pantheon, Nueva York, 2008. Una descripción muy amena de cómo afecta nuestra ascendencia al cuerpo humano, escrita

por uno de los descubridores de la forma transicional *Tiktaalik roseae*, el «piscípodo».

- -Zimmer, C., *At the Water's Edge: Fish with Fingers, Whales with Legs, and How Life Came Ashore but Then Went Back to Sea*, Free Press, Nueva York, 1999. Uno de nuestros mejores periodistas científicos describe dos de las grandes transiciones en la evolución de los vertebrados: la evolución de los animales terrestres a partir de los peces y la de las ballenas a partir de mamíferos ungulados.
- *Evolution: The Triumph of an Idea*, Harper Perennial, Nueva York, 2001. Un tratamiento general de la biología evolutiva escrito para acompañar una serie sobre la evolución producida para la televisión pública de Estados Unidos (Public Broadcasting System o PBS). Aunque introductorio, cubre todo el abanico desde la teoría y pruebas de la evolución hasta sus implicaciones filosóficas y teológicas.
- *Smithsonian Intimate Guide to Human Origins*, HarperCollins, Nueva York, 2005. Una explicación de la evolución bien ilustrada que incluye tanto el registro fósil como los descubrimientos recientes de la genética molecular.

2. Evolución, creación y cuestiones sociales

A excepción de algunos artículos de Pennock (2001), omito cualquier referencia a los escritos de los creacionistas y los defensores del diseño inteligente (DI) porque sus argumentos se fundamentan en la religión, no en la ciencia. La obra de Eugenie Scott, *Evolution vs. Creationism: An Introduction*, describe las diversas reencarnaciones del creacionismo, incluido el DI. Quienes estén interesados en escuchar las ideas antievolucionistas pueden consultar las obras de Michael Behe, William Dembski, Phillip Johnson y Jonathan Wells.

2.1 Libros y artículos

- -Coyne, J. A., «The faith that dares not speak its name: The case against intelligent design», *New Republic*, 22 de agosto de 2005, pp. 21–33. Un resumen conciso del DI y una reseña de su libro de texto escolar, *Of Pandas and People*.

- -Forrest, B. y P. R. Gross, *Creationism's Trojan Horse: The Wedge of Intelligent Design*, Oxford University Press, Nueva York, 2007. Un análisis exhaustivo y una crítica del diseño inteligente.
- -Futuyma, D. J., *Science on Trial: The Case for Evolution*, Sinauer Associates, Sunderland (MA), 1995. Un breve resumen de las pruebas de la evolución, así como una síntesis de la teoría evolutiva con respuestas a algunas de las críticas más comunes de los creacionistas.
- -Humes, E., *Monkey Girl: Evolution, Education, Religion, and the Battle for America's Soul*, Ecco (HarperCollins), Nueva York, 2007. Un relato del intento de los defensores del diseño inteligente de insertar sus ideas en el currículo de una escuela pública de Dover (Pensilvania), y del posterior juicio que sentenció que el diseño inteligente «no es ciencia».
- -Isaak, M., *The Counter-Creationism Handbook*, University of California Press, Berkeley, 2007. En esta útil guía, Isaak presenta y refuta de manera concisa centenares de argumentos presentados por creacionistas y defensores del diseño inteligente.
- -Kitcher, P. J., *Living with Darwin: Evolution, Design, and the Future of Faith*, Oxford University Press, Nueva York, 2006. Una apasionada defensa del darwinismo, con sugerencias sobre cómo podría reconciliarse con nuestras necesidades espirituales.
- -Larson, E. J., *Summer for the Gods*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1998. Este ameno relato del Juicio de Scopes, la primera incursión del darwinismo en los tribunales norteamericanos, corrige muchos de los equívocos populares sobre el «Juicio del Mono». El libro ganó el premio Pulitzer de 1998 en historia.
- -Miller, K. R., *Finding Darwin's God: A Scientist's Search for Common Ground Between God and Evolution*, Harper Perennial, Nueva York, 2000. Un eminente biólogo, autor de libros de texto y católico practicante, Miller refuta con decisión los argumentos del diseño inteligente y luego discute cómo reconciliar el hecho de la evolución con sus creencias religiosas.
- —*Only a Theory: Evolution and the Battle for America's Soul*, Viking, Nueva York, 2008. Una crítica actualizada del diseño inteligente que no sólo acomete

el argumento de la «complejidad irreducible», sino que muestra además por qué el DI supone una grave amenaza para la educación científica en Estados Unidos.

- National Academy of Sciences, *Science, Evolution, and Creationism*, National Academies Press, Washington, DC, 2008. Una declaración de posicionamiento de uno de los grupos de científicos más prestigioso de Estados Unidos, en la que critican el creacionismo y presentan las pruebas de la evolución. Puede descargarse gratis en http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11876.
- -Pennock, R. T., *Tower of Babel: The Evidence Against the New Creationism*, MIT Press, Cambridge (MA), 1999. Tal vez el análisis más concienzudo y demoledor del creacionismo, con especial referencia a su nueva reencarnación en forma de diseño inteligente. —, (ed.), *Intelligent Design Creationism and Its Critics: Philosophical, Ideological, and Scientific Perspectives*, MIT Press, Cambridge (MA), Ensayos de proponentes y oponentes de la evolución, con algunos provocadores debates y discusiones.
- -Petto, A. J. y L. R. Godfrey (eds.), *Scientists Confront Intelligent Design and Creationism*, W. W. Norton, Nueva York, 2007. Colección de ensayos escritos por científicos sobre paleontología, geología y otros aspectos de la teoría de la evolución relacionados con la controversia entre evolución y creación, así como discusiones sobre los aspectos sociológicos de esta polémica.
- -Scott, E. C., *Evolution vs. Creationism: An Introduction*, University of California Press, Berkeley, 2005. Una descripción desapasionada de lo que realmente son la evolución y el creacionismo.
- -Scott, E. C. y G. Branch, *Not in Our Classrooms: Why Intelligent Design Is Wrong for Our Schools*, Beacon Press, Boston, 2006. Colección de ensayos sobre las implicaciones científicas, educativas y políticas de la enseñanza del diseño inteligente y otras formas de creacionismo en las escuelas públicas de Estados Unidos.

2.2 Recursos en línea

- -<http://www.archaeologyinfo.com/evolution.htm>. Una buena (aunque algo anticuada) descripción e ilustración de las diversas fases de la evolución humana.
- -<http://www.darwin-online.org.uk/>. Las obras completas de Chales Darwin en línea (en inglés). Además de todas sus obras (entre ellas las seis ediciones de *El origen*), incluye también sus artículos, científicos. Una muestra significativa de la correspondencia personal de Darwin puede encontrarse en el Darwin Correspondence Project: <http://www.darwinproject.ac.uk/>.
- -<http://www.gate.net/~rwms/EvoEvidence.html>. Un voluminoso sitio web que recoge varias líneas de evidencia a favor de la evolución.
- -<http://www.gate.net/~rwms/crebuttals.html>. Un sitio web que examina y rebate a conciencia muchas de las aserciones del creacionismo.
- -<http://www.natcensci.ed.org/>. Colección de recursos en línea recogidos por el National Center for Science Education, una organización dedicada a defender la enseñanza de la evolución en las escuelas públicas de Estados Unidos. Proporciona actualizaciones sobre las batallas en marcha contra el creacionismo, e incluye vínculos con muchos otros sitios.
- -<http://www.pbs.org/wgbh/evolution/>. Un voluminoso sitio web inspirado por la serie *Evolution* de la PBS; contiene muchos recursos tanto para estudiantes como para profesores, entre ellos discusiones sobre la historia del pensamiento evolutivo, las pruebas de la evolución, y cuestiones filosóficas y teológicas. Las secciones sobre la evolución humana merecen mención aparte.
- -<http://www.pandasthumb.org/>. El sitio web de Pandas's Thumb (el pulgar de panda, en honor a un célebre ensayo de Stephen Jay Gould) trata de los descubrimientos recientes de la biología evolutiva, así como de la persistente oposición a la evolución en Estados Unidos.
- -<http://www.talkorigins.org/>. Una exhaustiva guía en línea de todos los aspectos de la evolución. Incluye la mejor guía en línea de las pruebas de la evolución, en <http://www.talkorigins.org/faqs/comdesc/>.
- Entre las muchas y buenas bitácoras sobre biología evolutiva, destacan dos. Una es «Laelaps» (<http://scienceblogs.com/laelaps/>), la bitácora de Botan

Switek, un estudiante de doctorado de paleontología de la Universidad de Rutgers, que se ocupa no sólo de la paleontología sino también de cuestiones de ámbito más amplio sobre biología evolutiva y filosofía de la ciencia. La otra es «This Week in Evolution», la bitácora del profesor de Cornell, R. Ford Denison, en <http://blog.lib.umn.edu/denis036/thiswee-kinevolution/>. Presenta nuevos descubrimientos en biología evolutiva y es accesible para cualquiera que haya recibido una clase de biología de nivel universitario.

Fuentes

Prefacio

Davis, P. y D. H. Kenyon, *Of Pandas and People: The Central Question of Biological Origins* (2.^a ed.), Foundation for Thought and Ethics, Richardson, TX, 1993.

Introducción

- -BBC Poll on Evolution, Ipsos MORI, 2006. <http://www.ipsos-mori.com/content/bbc-survey-on-the-origins-of-life.ashx>.
- -Berkman, M. B., J. S. Pacheco y E. Plutzer, «Evolution and creationism in America's schools: A national portrait», *Public Library of Science Biology*, 6:e124, 2008.
- -Harris Poll #52, 6 de julio de 2005, http://www.harrisinteractive.com/harris_poll/index.asp?PID=581.
- -Miller, J. D., E. C. Scott y S. Okamoto, «Public acceptance of evolution», *Science* 313 (2006), pp. 765-766.
- -Shermer, M., *Why Darwin Matters: The Case Against Intelligent Design*. Times Books, Nueva York, 2006.

Capítulo 1. ¿Qué es la evolución?

- -Darwin, C., *The Autobiography of Charles Darwin*, N. Barlow, ed., W. W. Norton, Nueva York, 1993 (hay trad, cast.: *Autobiografía*, Laetoli, Navarra, 2009).
- -Hazen, R. M., *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin*, Joseph Henry Press, Washington, DC, 2005.
- -Paley, W., *Natural Theology; or, Evidences of the Existence and Attributes of the Deity, Collected from the Appearances of Nature*, Parker, Filadelfia, 1802.

Capítulo 2. Escrito en las rocas

- -Apesteguía, S. y H. Zaher, «A Cretaceous terrestrial snake with robust hindlimbs and a sacrum», *Nature*, 440 (2006), pp. 1037-1040.
- -Chaline, J., B. Laurin, P. Brunet-Lecomte y L. Viriot, «Morphological trends and rates of evolution in arvicolids (Arvicolidae, Rodentia): Towards a

punctuated equilibria/disequilibria model», *Quaternary International*, 19 (1993), pp. 27-39.

- -Chen, J. Y., D. Y. Huang y C. W. Li, «An early Cambrian craniate-like chordate», *Nature*, 402 (1999), pp. 518-522.
- -Daeschler, E. B., N. H. Shubin y F. A. Jenkins, «A Devonian tetrapod-like fish and the evolution of the tetrapod body plan», *Nature*, 440 (2006), pp. 757-763.
- -Dial, K. P., «Wing-assisted incline running and the evolution of flight», *Science*, 299 (2003) pp. 402-404.
- -Graur, D. y D. G. Higgins, «Molecular evidence for the inclusion of cetaceans within the order Artiodactyla», *Molecular Biology and Evolution*, 11 (1994), pp. 357-364.
- -Hedman, M., *The Age of Everything: How Science Explores the Past*, University of Chicago Press, Chicago, 2007.
- -Hopson, J. A., «The mammal like reptiles: A study of transitional fossils», *American Biology Teacher*, 49 (1987), pp. 16-26.
- -Ji, Q., M. A. Norell, K. Q. Gao, S. A. Ji y D. Ren, «The distribution of integumentary structures in a feathered dinosaur», *Nature*, 410 (2001), pp. 1084-1088.
- -Kellogg, D. E. y J. D. Hays, «Microevolutionary patterns in Late Cenozoic Radiolaria», *Paleobiology*, 1 (1975), pp. 150-160.
- -Lazarus, D., «Speciation in pelagic protista and its study in the planktonic microfossil record: A review», *Paleobiology*, 9 (1983), pp. 327-340.
- -Li, Y., L.-Z. Chen et al., «Lower Cambrian vertebrates from South China», *Nature*, 402 (1999), pp. 42-46.
- -Malmgren, B. A. y J. P. Kennett, «Phyletic gradualism in a late Cenozoic planktonic foraminiferal lineage; Dsdp site 284, southwest Pacific», *Paleobiology*, 7 (1981), pp. 230-240.
- -Norell, M. A., J. M. Clark, L. M. Chiappe y D. Dashzeveg, «A nesting dinosaur», *Nature*, 378 (1995), pp. 774-776.

- -Organ, C. L., M. H. Schewitzer, W. Zheng, Lm. M. Freimark, L. C. Cantley y J. M. Asara, «Molecular phylogenetics of Mastodon and *Tyrannosaurus rex*», *Science*, 320 (2008), p. 499.
- -Peyer, K., «A reconsideration of *Compsognathus* from the upper Tithonian of Canjers, Southern France», *Journal of Vertebrate Paleontology*, 26, pp. 879-896.
- -Prum, R. O. y A. H. Brush, «The evolutionary origin and diversification of feathers», *Quarterly Review of Biology*, 77 (2002), pp. 261-295.
- -Sheldon, P., «Parallel gradualistic evolution of Ordovician trilobites», *Nature*, 330 (1987), pp. 561-563.
- -Shipman, P., *Taking Wing: Archaeopteryx and the Evolution of Bird Flight*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1998.
- -Shu, D. G., H. L. Luo, S. C. Morris, X. L. Zhang, S. X. Hu, L. Chen, J. Han, M. Zhu, Y. Li y L. Z. Chen, «Lower Cambrian vertebrates from South China», *Nature*, 402 (1999), pp. 42-46.
- -Shu, D. G., S. C. Morris, J. Han, Z. F. Zhang, K. Yasui, P. Janvier, L. Chen, X. L. Zhang, J. N. Liu, Y. Li y H. Q. Liu, «Head and backbone of the Early Cambrian vertebrate *Haikouichthys*», *Nature*, 421 (2003), pp. 526-529.
- -Shubin, N. H., E. B. Daeschler y F. A. Jenkins, «The pectoral fin of *Tiktaalik roseae* and the origin of the tetrapod limb», *Nature*, 440 (2006), pp. 764-771.
- -Sutera, R., «The origin of whales and the power of independent evidence», *Reports of the National Center for Science Education*, 20 (2001), pp. 33-41.
- -Thewissen, J. G. M., L. N. Cooper, M. T. Clementz, S. Bajpail y B. N. Tiwari, «Whales originated from aquatic artiodactyls in the Eocene epoch of India», *Nature*, 450 (2007), pp. 1190-1194.
- -Wells, J. W., «Coral growth and geochronometry», *Nature*, 187 (1963), pp. 948-950.
- -Wilson, E. O., F. M. Carpenter y W. L. Brown, «First Mesozoic ants», *Science*, 157 (1967), pp. 1038-1040.
- -Xu, X. y M. A. Norell, «A new troodontid dinosaur from China with avian-like sleeping posture», *Nature*, 431 (2004), pp. 838-841.

- -Xu, X., X.-L. Wang y X.-C. Wu, «A dromaeosaurid dinosaur with a filamentous integument from the Yixian Formation of China», *Nature*, 401 (1999), pp. 262-266.
- -Xu, X., Z. H. Zhou, X.-L. Wang, X. W. Kuang, F. C. Zhang y X. K. Du, «Four-winged dinosaurs from China», *Nature*, 421 (2003), pp. 335-340.

Capítulo 3. Reliquias: vestigios, embriones y mal diseño

- -Andrews, R. C., «A remarkable case of external hind limbs in a humpback whale», *American Museum Novitates*, 9 (1921), pp. 1-6.
- -Bannert, N. y R. Kurth, «Retroelements and the human genome: New perspectives on an old relation», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101 (2004), pp. 14572-14579.
- -Bar-Maor, J. A., K. M. Kesner y J. K. Kaftori, «Human tails», *Journal of Bone and Joint Surgery*, 62 (1980), pp. 508-510.
- -Behe, M., *Darwin's Black Box*, Free Press, Nueva York, 1996 (hay trad. cast.: *La caja negra de Darwin: el reto de la bioquímica a la evolución*, Andrés Bello, Barcelona, 2000).
- -Bejder, L. y B. K. Hall, «Limbs in whales and limblessness in other vertebrates: Mechanisms of evolutionary and developmental transformation and loss», *Evolution and Development*, 4 (2002), pp. 445-458.
- -Brawand D., W. Wahli y H. Kaessmann, «Loss of egg yolk genes in mammals and the origin of lactation and placentation», *Public Library of Science Biology*, 6(3) (2008), p. e63.
- -Chen, Y. P., Y. D. Zhang, T. X. Jiang, A. J. Barlow, T. R. St Amand, Y. P. Hu, S. Heaney, P. Francis-West, C. M. Chuong y R. Maas, «Conservation of early odontogenic signaling pathways in Aves», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97 (2000), pp. 10044-10049.
- -Dao, A. H. y M. G. Netsky, «Human tails and pseudotails», *Human Pathology*, 15 (1984), pp. 449-453.
- -Dobzhansky, T., «Nothing in biology makes sense except in the light of evolution», *American Biology Teacher*, 35 (1973), pp. 125-129.

- Friedman, M., «The evolutionary origin of flatfish asymmetry», *Nature*, 454 (2008), pp. 209-212.
- -Gilad, Y., V. Wiebe, M. Przeworski, D. Lancet y S. Paabo, «Loss of olfactory receptor genes coincides with the acquisition of full trichromatic vision in primates», *Public Library of Science Biology*, 2 (2004), pp. 120-125.
- -Gould, S. J., *Hen's Teeth and Horses' Toes: Further Reflections in Natural History*, W. W. Norton, Nueva York, 1994 (hay trad, cast.: *Dientes de gallina y dedos de caballo: reflexiones sobre historia natural*, Critica, Barcelona, 2004).
- -Hall, B. K., «Developmental mechanisms underlying the formation of atavisms», *Biological Reviews*, 59 (1984), pp. 89-124.
- -Harris, M. P., S. M. Hasso, M. W. J. Ferguson y J. F. Fallon, «The development of archosaurian first-generation teeth in a chicken mutant», *Current Biology*, 16 (2006), pp. 371-377.
- -Johnson, W. E. y J. M. Coffin, «Constructing primate phylogenies from ancient retrovirus sequences», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96 (1999), pp. 10254-10260.
- -Kishida, T., S. Kubota, Y. Shirayama y H. Fukami, «The olfactory receptor gene repertoires in secondary-adapted marine vertebrates: Evidence for reduction of the functional proportions in cetaceans», *Biology Letters*, 3 (2007), pp. 428-430.
- -Kollar, E. J. y C. Fisher, «Tooth induction in chick epithelium: Expression of quiescent genes for enamel synthesis», *Science*, 207 (1980), pp. 993-995.
- -Krause, W. J. y C. R. Leeson, «The gastric mucosa of 2 monotremes: The duck-billed platypus and echidna», *Journal of Morphology*, 142 (1974), pp. 285-299.
- -Medstrand, P. y D. L. Mager, «Human-specific integrations of the HERV-K endogenous retrovirus family», *Journal of Virology*, 72 (1998), pp. 9782-9787.
- -Larsen, W. J., *Human Embryology*, Churchill Livingstone, Filadelfia, 2001³.
- -Niimura, Y. y M. Nei, «Extensive gains and losses of olfactory receptor genes in mammalian evolution», *Public Library of Science ONE*, 2 (2007), p. e708.

- -Nishikimi, M., R. Fukuyama, S. Minoshima, N. Shimizu y K. Yagi, «Cloning and chromosomal mapping of the human nonfunctional gene for L-gulonolactone oxidase, the enzyme for L-ascorbic-acid biosynthesis missing in man», *Journal of Biological Chemistry*, 269 (1994), pp. 13685-13688.
- -Nishikimi, M. y K. Yagi, «Molecular basis for the deficiency in human's of gulonolactone oxidase, a key enzyme for ascorbic acid biosynthesis», *American Journal of Clinical Nutrition*, 54 (1991), pp. 1203S-1208S.
- -Ohta, Y. y M. Nishikimi, «Random nucleotide substitutions in primate nonfunctional gene for L-gulonolactone oxidase, the missing enzyme in L-ascorbic acid biosynthesis», *Biochimica et Biophysica Acta*, 1472 (1999), pp. 408-411.
- -Ordoflez, G. R., L. W. Hiller, W. C. Warren, F. Grutzner, C. López-Otin y X. S. Puente, «Loss of genes implicated in gastric function during platypus evolution», *Genome Biology*, 9 (2008), p. R81.
- -Richards, R. J., *The Tragic Sense of Life: Ernst Haeckel and the Struggle over Evolution*, University of Chicago Press, Chicago, 2008.
- -Romer, A. S. y T. S. Parsons, *The Vertebrate Body*, Sanders College Publishing, Philadelphia, 1986.
- -Sadler, T. W., *Langman's Medical Embryology*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2003.
- -Sanyal, S., H. G. Jansen, W. J. de Grip, E. Nevo y W. W. de Jong, «The eye of the blind mole rat, *Spalax ehrenbergi*. Rudiment with hidden function?», *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 31 (1990), pp. 1398-1404.
- -Shubin, N., *Your Inner Fish*, Pantheon, Nueva York, 2008.
- -Rouquier, S., A. Blancher y D. Giorgi, «The olfactory receptor gene repertoire in primates and mouse: Evidence for reduction of the functional fraction in primates», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97 (2000), pp. 2870-2874.
- -Von Baer, K. E., *Entwicklungsgeschichte der Thiere: Beobachtung und Reflexion*, (vol. 1), Königsberg, Bomträger, 1828.

- -Zhang, Z. L. y M. Gerstein, «Large-scale analysis of pseudogenes in the human genome», *Current Opinion in Genetics & Development*, 14 (2004), pp. 328-335.

Capítulo 4. La geografía de la vida

- -Barber, H. N., H. E. Dadswell y H. D. Ingle, «Transport of driftwood from South America to Tasmania and Macquarie Island», *Nature*, 184 (1959), pp. 203-204.
- -Brown, J. H. y M. V. Lomolino, *Biogeography*, Sinauer Associates, Sunderland, MA, 1998².
- -Browne, J., *The Secular Ark: Studies in the History of Biogeography*, Yale University Press, New Haven y Londres, 1983.
- -Carlquist, S., *Island Biology*, Columbia University Press, Nueva York, 1974. —, «Chance dispersal», *American Scientist*, 69 (1981), pp. 509-516.
- -Censky, E. J., K. Hodge y J. Dudley, «Over-water dispersal of lizards due to hurricanes», *Nature*, 395 (1998), p. 556.
- -Goin, F. J., J. A. Case, M. O. Woodburne, S. F. Vizcaino y M. A. Reguero, «New discoveries of "opossum-like" marsupials from Antarctica (Seymour Island, Midial Eocene)», *Journal of Mammalian Evolution*, 6 (2004), pp. 335-365.
- -Guilmette, J. E., E. P. Holzapfel y D. M. Tsuda, «Trapping of air-borne insects on ships in the Pacific (Part 8)», *Pacific Insects*, 12 (1970), pp. 303-325.
- -Holzapfel, E. P. y J. C. Harrell, «Transoceanic dispersal studies of insects», *Pacific Insects*, 10 (1968), pp. 115-153. —, «Trapping of air-borne insects in the Antarctic area (Part 3)», *Pacific Insects*, 12(1970), pp. 133-156.
- -McLoughlin, S., «The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism», *Australian Journal of Botany*, 49 (2001), pp. 271-300.
- -Reinhold, R., «Antarctica yields first land mammal fossil», *New York Times*, 21 de marzo de 1982.

- -Woodburne, M. O. y J. A. Case, «Dispersal, vicariance, and the Late Cretaceous to early tertiary land mammal biogeography from South America to Australia», *Journal of Mammalian Evolution*, 3 (1996), pp. 121-161.
- -Yoder, A. D. y M. D. Nowak, «Has vicariance or dispersal been the predominant biogeographic force in Madagascar? Only time will tell», *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37 (2006), pp. 405-431.
- Capítulo 5: El motor de la evolución
- -Carroll, S. P., C. Boyd, «Host race radiation in the soapberry bug: Natural history with the history», *Evolution*, 46 (1992), pp. 1052-1069.
- -Dawkins, R., *Climbing Mount Improbable*, Penguin, Londres, 1996 (hay trad, cast.: *Escalando el monte improbable*, Tusquets, Barcelona, 1998).
- -Doebley, J. F., B. S. Gaut y B. D. Smith, «The molecular genetics of crop domestication», *Cell*, 127 (2006), pp. 1309-1321.
- -Doolittle, W. F. y O. Zhaxbayeva, «Evolution: Reducible complexity—the case for bacterial flagella», *Current Biology*, 17 (2007), pp. R510-R512.
- -Endler, J. A., *Natural Selection in the Wild*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1986.
- -Franks, S. J., S. Sim y A. E. Weis, «Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (2007), pp. 1278-1282.
- -Gingerich, P. D., «Rates of evolution: Effects of time and temporal scaling», *Science*, 222 (1983), pp. 159-161.
- -Grant, P. R., *Ecology and Evolution of Darwin's Finches*, (rev. ed.), Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
- -Hall, B. G., «Evolution on a petri dish: The evolved β -galactosidase system as a model for studying acquisitive evolution in the laboratory», *Evolutionary Biology*, 15 (1982), pp. 85-150.
- -Hoekstra, H. E., R. J. Hirschmann, R. A. Bunday, P. A. Insel y J. P. Crossland, «A single amino acid mutation contributes to adaptive beach mouse color pattern», *Science*, 313 (2006), pp. 101-104.

- -Jiang, Y. y R. F. Doolittle, «The evolution of vertebrate blood coagulation as viewed from a comparison of puffer fish and sea squirt genomes», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100 (2003), pp. 7527-7532.
- -Kaufman D. W., «Adaptive coloration in *Peromyscus polionotus*: Experimental selection by owls», *Journal of Mammalogy*, 55 (1974), pp. 271-283.
- -Lamb, T. D., S. P. Collin y E. N. Pugh, «Evolution of the vertebrate eye: Opsins, photoreceptors, retina and eye cup», *Nature Reviews Neuroscience*, 8 (2007), pp. 960-975.
- -Lenski, R. E., «Phenotypic and genomic evolution during a 20,000-generation experiment with the bacterium «*Escherichia coli*», *Plant Breeding Reviews*, 24 (2004), pp. 225-265.
- -Miller, K. R., *Finding Darwin's God: A Scientist's Search for Common Ground Between God and Evolution*, Cliff Street Books, Nueva York, 1999. —, *Only a Theory: Evolution and the Battle for America's Soul*, Viking, Nueva York, 2008.
- -Neu, H. C., «The crisis in antibiotic resistance», *Science*, 257 (1992), pp. 1064-1073.
- -Nilsson, D.-E. y S. Pelger, «A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve», *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 256 (1994), pp. 53-58.
- -Pallen, M. J. y N. J. Matzke, «From *The Origin of Species* to the origin of bacterial flagella», *Nature Reviews Microbiology*, 4 (2006), pp. 784-790.
- -Raine, P. B. y M. Travisano, «Adaptive radiation in a heterogeneous environment», *Nature*, 394 (1998), pp. 69-72.
- -Reznick, D. N. y C. K. Ghalambor, «The population ecology of contemporary adaptations: What empirical studies reveal about the conditions that promote adaptive evolution», *Genetica*, 112 (2001), pp. 183-198.
- -Salvini-Plawen, L. V. y E. Mayr, «On the evolution of photoreceptors and eyes», *Evolutionary Biology*, 10 (1977), pp. 207-263.

- -Steiner, C. C., J. N. Weber y H. E. Hoekstra, «Adaptive variation in beach mice produced by two interacting pigmentation genes», *Public Library of Science Biology*, 5 (2007), p. e219.
- -Vila, C., P. Savolainen, J. E. Maldonado, I. R. Amorim, J. E. Rice, R. L. Honeycutt, K. A. Crandall, J. Lundeberg y R. K. Wayne, «Multiple and ancient origins of the domestic dog», *Science*, 276 (1997), pp. 1687-1689.
- -Weiner, J., *The Beak of the Finch: A Story of Evolution in Our Time*, Vintage, Nueva York, 1995 (hay trad, cast.: *El pico del pinzón: una historia de la evolución en nuestros días*, Galaxia Gutemberg, Barcelona, 2002).
- -Xu, X. y R. F. Doolittle, «Presence of a vertebrate fibrinogen-like sequence in an echinoderm», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87 (1990), pp. 2097-2101.
- -Yanoviak, S. P., M. Kaspari, R. Dudley y J. G. Poinar, «Parasite-induced fruit mimicry in a tropical canopy ant», *American Naturalist*, 171 (2008), pp. 536-544.
- -Zimmer, C., *Parasite Rex: Inside the Bizarre World of Nature's Most Dangerous Creatures*, Free Press, Nueva York, 2001.

Capítulo 6. El sexo como motor de la evolución

- -Andersson, M., *Sexual Selection*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1994.
- -Burley, N. T. y R. Symanski, «“A taste for the beautiful”: Latent aesthetic mate preferences for white crests in two species of Australian grassfinches», *American Naturalist*, 152 (1998), pp. 792-802.
- -Butler, M. A., S. A. Sawyer y J. B. Losos, «Sexual dimorphism and adaptive radiation in Anolis lizards», *Nature*, 447 (2007), pp. 202-205.
- -Butterfield, N. J., «*Bangiomorpha pubescens* n. gen., n. sp.: Implications for the evolution of sex, multicellularity and the Mesoproterozoic/Neoproterozoic radiation of eukaryotes», *Paleobiology*, 3 (2000), pp. 386-404.
- -Darwin, C., «The Descent of Man y Selection in Relation to Sex», Murray, Londres, 1871 (hay trad, cast.: *El origen del hombre*, Ediciones Ibéricas, Madrid, 1996).

- -Dunn, P. O., L. A. Whittingham y T. E. Pitcher, «Mating systems, sperm competition y the evolution of sexual dimorphism in birds», *Evolution*, 55 (2001), pp. 161-175.
- -Endler, J. A., «Natural selection on color patterns in *Poecilia reticulata*», *Evolution*, 341 (1980), pp. 76-91.
- -Field, S. A. y M. A. Keller, «Alternative mating tactics and female mimicry as postcopulatory mate-guarding behavior in the parasitic wasp *Cotesia rubecula*», *Animal Behaviour*, 46 (1993), pp. 1183-1189.
- -Futuyma, D. J., *Science on Trial: The Case for Evolution*, Sinauer Associates, Sunderland, MA, 1995.
- -Hill, G. E., «Plumage coloration is a sexually selected indicator of male quality», *Nature*, 350 (1991), pp. 337-339.
- -Husak, J. F., J. M. Macedonia, S. F. Fox y R. C. Saucedo, «Predation cost of conspicuous male coloration in collared lizards (*Crotaphytus collaris*) An experimental test using clay-covered model lizards», *Ethology*, 112 (2006), pp. 572-580.
- -Johnson, P. E., *Darwin on Trial*, InterVarsity Press, Downers Grove, IL, 1993² (hay trad. cast.: *Juicio a Darwin*, Homo Legens, Madrid, 2007).
- -McFarlan, D., ed., *Guinness Book of World Records*, Sterling Publishing Co., Nueva York, 1989 (hay trad. cast.: *Libro Guinness de los récords 1991*, Producciones Jordán, Madrid, 1989).
- -Madden, J. R., «Bower decorations are good predictors of mating success in the spotted bowerbird», *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 53 (2003), pp. 269-277.
- —, «Male spotted bowerbirds preferentially choose, arrange and proffer objects that are good predictors of mating success», *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 53 (2003), pp. 263-268.
- -Petrie, M., «Improved growth and survival of offspring of peacocks with more elaborate trains», *Nature*, 371 (1994), pp. 598-599.
- Petrie, M., T. Halliday y C. Sanders, «Peahens prefer peacocks with elaborate trains», *Animal Behaviour*, 41 (1991), pp. 323-331.

- -Petrie, M. y T. Halliday, «Experimental and natural changes in the peacock's (*Pavo cristatus*) train can affect mating success», *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 35 (1994), pp. 213-217.
- -Price, C. S. C., K. A. Dyer y J. A. Coyne, «Sperm competition between *Drosophila* males involves both displacement and incapacitation», *Nature*, 400 (1999), pp. 449-452.
- -Pryke, S. R. y S. Andersson, «Experimental evidence for female choice and energetic costs of male tail elongation in red-collared widowbirds», *Biological Journal of the Linnean Society*, 86 (2005), pp. 35-43.
- -Vehrencamp, S. L., J. W. Bradbury y R. M. Gibson, «The energetic cost of display in male sage grouse», *Animal Behaviour*, 38 (1989), pp. 885-896.
- -Wallace, A. R., «Note on sexual selection», *Natural Science Magazine* (1892), p. 749.
- -Welch, A. M., R. D. Semlitsch y H. C. Gerhardt, «Call duration as an indicator of genetic quality in male gray tree frogs», *Science*, 280 (1998), pp. 1928-1930.

Capitulo 7. El origen de las especies

- -Abbott, R. J. y A. J. Lowe, «Origins, establishment and evolution of new polyploid species: *Senecio cambrensis* and *S. eboracensis* in the British Isles», *Biological Journal of the Linnean Society*, 82 (2004), pp. 467-474.
- -Adam, P., *Saltmarsh Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- -Ainouche, M. L., A. Baumel y A. Salmon, «*Spartina ánglica* C. E. Hubbard: A natural model system for analysing early evolutionary changes that affect allopolyploid genomes», *Biological Journal of the Linnean Society*, 82 (2004), pp. 475-484.
- -Ainouche, M. L., A. Baumel, A. Salmon y G. Yannic, «Hybridization, polyploidy and speciation in *Spartina* (Poaceae)», *New Phytologist*, 161 (2004), pp. 165-172.
- -Byrne, K. y R. A. Nichols, «*Culex pipiens* in London Underground tunnels: Differentiation between surface and subterránea populations», *Heredity*, 82 (1999), pp. 7-15.

- -Clayton, N. S., «Mate choice and pair formation in Timor and Australian mainland zebra finches», *Animal Behaviour*, 39 (1990), pp. 474-480.
- -Coyne, J. A. y H. A. Orr, «Patterns of speciation in *Drosophila*», *Evolution*, 43 (1989), pp. 362-381. —, «"Patterns of speciation in *Drosophila*" revisited», *Evolution*, 51(1997), pp. 295-303. —, *Speciation*, Sinauer Associates, Sunderland, MA, 2004.
- -Coyne, J. A. y T. D. Price, «Little evidence for sympatric speciation in island birds», *Evolution*, 54 (2000), pp. 2166-2171.
- -Dodd, D. M. B., «Reproductive isolation as a consequence of adaptive divergence in *Drosophila pseudoobscura*», *Evolution*, 43 (1989), pp. 1308-1311.
- -Gallardo, M. H., C. A. González y I. Cebrián, «Molecular cytogenetics and allotetraploidy in the red vizcacha rat, *Tympanoctomys barrerae* (Rodentia, Octodontidae)», *Genomics*, 88 (2006), pp. 214-221.
- -Haldane, J. B. S., «Natural selection», en *Darwin's Biological Work: Some Aspects Reconsidered*, P. R. Bell, ed., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2006, pp. 101-149.
- -Johnson, S. D., «Pollination ecotypes of *Satyrium hallackii* (Orchidaceae) in South Africa», *Botanical Journal of the Linnean Society*, 123 (1997), pp. 225-235.
- -Kent, R. J., L. C. Harrington y D. E. Norris, «Genetic differences between *Culex pipiens* f. *molestus* and *Culex pipiens pipiens* (Diptera: Culicidae) in New York», *Journal of Medical Entomology*, 44 (2007), pp. 50-59.
- -Knowlton, N., L. A. Weigt, L. A. Solórzano, D. K. Mills y E. Bermingham, «Divergence in proteins, mitochondrial DNA y reproductive compatibility across the Isthmus of Panama», *Science*, 260 (1993), pp. 1629-1632.
- -Losos, J. B. y D. Schluter, «Analysis of an evolutionary species-area relationship», *Nature*, 408 (2000), pp. 847-850.
- -Mayr, E., *Systematics and the Origin of Species*, Columbia University Press, New York, 1942. —, *Animal Species and Evolution*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1963.

- -Pinker, S., *The Language Instinct: The New Science of Language and Mind*, HarperCollins, New York, 1994 (hay trad, cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 2009).
- -Ramsey, J. M. y D. W. Schemske, «The dynamics of polyploid formation and establishment in flowering plants», *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 29 (1998), pp. 467-501.
- -Savolainen, V., M.-C. Anstett, C. Lexer, I. Hutton, J. J. Clarkson, M. V. Norup, M. P. Powell, D. Springate, N. Salamin y W. J. Baker, «Sympatric speciation in palms on an oceanic island», *Nature*, 441 (2006), pp. 210-213.
- -Schliewen, U. K., D. Tautz y S. Pääbo, «Sympatric speciation suggested by monophyly of crater lake cichlids», *Nature*, 368 (1994), pp. 629-632.
- -Weir, J. y R. Ingram, «Ray morphology and cytological investigations of *Senecio cambrensis* Rosser», *New Phytologist*, 86 (1980), pp. 237-241.
- -Xiang, Q.-Y., D. E. Soltis y P. S. Soltis, «The eastern Asian and eastern and western North American floristic disjunction: Congruent phylogenetic patterns in seven diverse genera», *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 10 (1998), pp. 178-190.

Capitulo 8. ¿Y nosotros?

- -Barbujani, G., A. Magagni, E. Minch y L. L. Cavalli-Sforza, «An apportionment of human DNA diversity», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94 (1997), pp. 4516-4519.
- -Bradbury, J., «Ancient footsteps in our genes: Evolution and human disease», *Lancet*, 363 (2004), pp. 952-953.
- -Brown, P., T. Sutikna, M. J., Morwood, R. P. Soejono, E. Jatmiko, E. W. Saptomo y R. A. Due, «A new small-bodied hominin from the Late Pleistocene of Flores, Indonesia», *Nature*, 431 (2004), pp. 1055-1061.
- -Brunet, M. et al., «A new hominid from the Upper Miocene of Chad, central Africa», *Nature*, 418 (2002), pp. 145-151.
- -Bustamante, C. D., et al., «Natural selection on protein-coding genes in the human genome», *Nature*, 437 (2005), pp. 1153-1157.

- -Dart R. A., «*Australopithecus africanus*: The Man-Ape of South Africa», *Nature*, 115 (1925), pp. 195-199.
- -Dart, R. A. (con D. Craig), *Adventures with the Missing Link*, Harper, Nueva York, 1959.
- -Davis, P. y D. H. Kenyon, *Of Pandas and People: The Central Question of Biological Origins*, Foundation for Thought and Ethics, Richardson, TX, 1993.
- -Demuth, J. P., T. D. Bie, J. E. Stajich, N. Cristianini y M. W. Hahn, «The evolution of mammalian gene families», *Public Library of Science ONE*, 1 (2007), p. e85.
- -Enard, W., M. Przeworski, S. E. Fisher, C. S. L. Lai, V. Wiebe, T. Kitano, A. P. Monaco y S. Pääbo, «Molecular evolution of *FOXP2*, a gene involved in speech and language», *Nature*, 418 (2002), pp. 869-872.
- -Enard, W. y S. Pääbo, «Comparative primate genomics», *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 5 (2004), pp. 351-378.
- -Enattah, N. S., T. Sahi, E. Savilahti, J. D. Terwilliger, L. Peltonen y I. Jarvela, «Identification of a variant associated with adult-type hypolactasia», *Nature Genetics*, 30 (2002), pp. 233-237.
- -Frayser, D. W., M. H. Wolpoff, A. G., Thorne, F. H. Smith y G. G. Pope, «Theories of modern human origins: The Paleontological Test 1993», *American Anthropologist*, 95 (1993), pp. 14-50.
- -Gould, S. J., *The Mismeasure of Man*, W. W. Norton, Nueva York, 1981 (hay trad. cast.: *La falsa medida del hombre*, Crítica, Barcelona, 2007).
- -Gallup Poll, The: Evolution, Creationism, and Intelligent Design, <http://www.galluppoll.com/content/default.aspx?ci=21814>.
- -Johanson, D. C. y M. A. Edey, *Lucy: The Beginnings of Humankind*, Simon & Schuster, Nueva York, 1981.
- -Jones, S., *The Language of Genes*, Anchor, Londres, 1995.
- -King, M. C. y A. C. Wilson, «Evolution at two levels in humans and chimpanzee», *Science*, 188 (1975), pp. 107-116.
- -Kingdon, J., *Lowly Origin: Where, When, and Why Our Ancestors First Stood Up*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2003.

- -Lamason, R. L. et al., «SLC24A5, a putative cation exchanger, affects pigmentation in zebrafish and humans», *Science*, 310 (2005), pp. 1782-1786.
- -Lewontin, R. C., «The apportionment of human diversity», *Evolutionary Biology*, 6 (1972), pp. 381-398.
- -Miller, C. T., S. Beleza, A. A. Pollen, D. Schluter, R. A. Kittles, M. D. Shriver y D. M. Kingsley, «*cis*-Regulatory changes in kit ligand expression and parallel evolution of pigmentation in sticklebacks and humans», *Cell*, 131 (2007), pp. 1179-1189.
- -Morwood, M. J. et al., «Archaeology and age of a new hominin from Flores in eastern Indonesia», *Nature*, 431 (2004), pp. 1087-1091.
- -Mulder, M. B., «Reproductive success in three Kipsigis cohorts», en *Reproductive Success: Studies of Individual Variation in Contrasting Breeding Systems*, T. H. Clutton-Brock, ed., University of Chicago Press, Chicago, 1988, pp. 419-435.
- -Obendorf, P. J., C. E. Oxnard y B. J. Kefford, «Are the small human-like fossils found on Flores human endemic cretins?», *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 275 (2008), pp. 1287-1296.
- -Perry, G. H. et al., «Diet and the evolution of human amylase gene copy number variation», *Nature Genetics*, 39 (2007), pp. 1256-1260.
- -Pinker, S., *The Language Instinct: The New Science of Language and Mind*, HarperCollins, Nueva York, 1994 (hay trad. cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 2009). —, «Have humans stopped evolving?», http://www.edge.org/q2008/q08_8.html#pinker.
- -Richmond, B. G. y W. L. Jungers, «*Orrorin tugenensis* femoral morphology and the evolution of hominin bipedalism», *Science*, 319 (2008), pp. 1662-1665.
- -Rosenberg, N. A., J. K. Pritchard, J. L. Weber, H. M. Cann, K. K. Kidd, L. A. Zhivotovsky y M. W. Feldman, «Genetic structure of human populations», *Science*, 298 (2002), pp. 2381-2385.
- -Sagan, Carl, *Carl Sagan's Cosmic Connection: An Extraterrestrial Perspective*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000 (hay trad. cast, de

la versión original de la obra de Sagan: *La conexión cósmica*, Plaza & Janés, 1990).

- -Suwa, G., R. T. Kono, S. Katoh, B. Asfaw y Y. Beyene, «A new species of great ape from the late Miocene epoch in Ethiopia», *Nature*, 448 (2007), pp. 921-924.
- -Tishkoff, S. A. et al., «Convergent adaptation of human lactase persistence in Africa and Europe», *Nature Genetics*, 39 (2007), pp. 31-40.
- -Tocheri, M. W., C. M. Orr, S. G. Larson, T. Sutikna, Jatmiko, E. W. Saptomo, R. A. Due, T. Djubiantono, M. J. Morwood y W. L. Jungers, «The primitive wrist of *Homo floresiensis* and its implications for hominin evolution», *Science*, 317 (2007), pp. 1743-1745.
- -Wood, B., «Hominid revelations from Chad», *Nature*, 418 (2002), pp. 133-135.

Capítulo 9. A vueltas con la evolución

- -Brown, D. E., *Human Universals*, Temple University Press, Filadelfia, 1991.
- -Coulter, A., *Godless: The Church of Liberalism*, Crown Forum (Random House), Nueva York, 2006.
- -Dawkins, R., *Unweaving the Rainbow: Science, Delusion y the Appetite for Wonder*, Houghton Mifflin, Nueva York, 1998 (hay trad, cast.: *Destejiendo el arco iris: ciencia, ilusión y el deseo de asombro*, Tusquets, Barcelona, 2000).
- -Einstein, A., *The World as I See It*, Citadel Press, Secaucus, NJ, 1999 (hay trad, cast.: *Mi visión del mundo*, Tusquets, Barcelona, 2005).
- -Feynman, R., *The Pleasure of Finding Things Out*, programa Nova de la televisión pública de Estados Unidos, Public Broadcasting System (PBS).
- -Harvard University Press, forum de autores. Entrevista con Michael Ruse y J. Scott Turner, «Off the Page», http://harvardpress.typepad.com/off_the_page/j_scott_turner/index.html.
- -McEwan, I., «End of the world blues», en *The Portable Atheist*, C. Hitchens, ed., Da Capo Press, Cambridge, MA pp. 351-365.
- -Miller, G., *The Mating Mind: How Sexual Choice Shaped the Evolution of Human Nature*, Doubleday, Nueva York, 2000.

- -Pearcey, N., «Darwin meets the Berenstain bears: Evolution as a total worldview», en *Uncommon Dissent: Intellectuals Who Find Darwinism Unconvincing*, W. A. Dembski, ed., ISI Books, Wilmington, DE, 2004, pp. 53-74.
- -Pinker, S., *The Language Instinct: The New Science of Language and Mind*, HarperCollins, Nueva York, 1994 (hay trad, cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 2009). —, «Survival of the clearest», *Nature*, 404 (2000), pp. 441-442.
- —, *The Blank Slate: The Modern Denial of Human Nature*, Penguin, Nueva York, 2003 (hay trad, cast.: *La tabla rasa: la negación moderna de la naturaleza humana*, Paidós, Barcelona, 2007).
- -Price, J., L. Sloman, R. Gardner, P. Gilber y P. Rohde, «The social competition hypothesis of depression», *British Journal of Psychiatry*, 164 (1994), pp. 309-315.
- -Thornhill, R. y C. T. Palmer, *A Natural History of Rape: Biological Bases of Sexual Coercion*, MIT Press, Cambridge, MA, 2000.
- -Wilson, E. O., *Sociobiology: The New Synthesis*, Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, MA, 1975 (hay trad, cast.: *Sociobiología*, Omega, Barcelona, 1980).