

ESCALANDO EL MONTE IMPROBABLE

Richard Dawkins



METATEMAS 53

LIBROS PARA PENSAR LA CIENCIA

Nos encontramos aquí en los altos y al parecer inabordables riscos de **un** supuesto monte, el **monte Improbable**. Sus cimas representan, para **Richard Dawkins**, la combinación de perfección e improbabilidad que cualquiera puede encontrar en los seres vivos. Desde la conjunción de fuerza y sensibilidad de la trompa de un elefante hasta el camuflaje vital de un escarabajo hormiga, el mundo viviente está poblado de criaturas que parecen milagrosamente «diseñadas» para la vida que llevan, criaturas todas ellas que parecen haber alcanzado su punto óptimo, la cúspide imposible.

Gracias a **Dawkins** comprobamos que estos complejos y brillantes rasgos no se han conseguido por casualidad —lo que equivaldría a escalar con un simple salto la cara escarpada, cortada a pico, de la montaña—, sino por una evolución acumulativa y gradual —que representa la pausada y larga senda que asciende a la cumbre—, infinitamente lenta para los parámetros de la historia humana. Para ello, **Dawkins** conduce al lector a través de los espectaculares paisajes montañosos del mundo natural y nos invita a visitar, por ejemplo, el fascinante mundo de las telas de araña o a contemplar los higos como si fueran un jardín para una concurridísima colonia de insectos.

Ya en en sus libros anteriores, **Richard Dawkins** había revelado la gloriosa variedad y la unidad que subyace en la vida sobre la Tierra. En **Escalando el monte Improbable** contagia al lector su pasión por la interminable multiplicidad y adaptabilidad de los genes y sus asombrosas consecuencias, ofreciéndonos una atractiva y erudita descripción de muy variados fenómenos biológicos para los que propone explicaciones sencillas.

Fotografía del autor: © Lisa Lloyd

Richard Dawkins

**ESCALANDO EL MONTE
IMPROBABLE**

Ilustraciones originales de Lalla Ward

Traducción de Joandoménec Ros

Título original: *Climbing Mount Improbable*

1ª edición: abril 1998

© 1996 by Richard Dawkins

© de la traducción: Joandoméneç Ros, 1998

Diseño de la colección: Clotet-Tusquets

Reservados todos los derechos de esta edición para

Tusquets Editores, S.A. - Cesare Cantü, 8 - 08023 Barcelona

ISBN: 84-8310-583-7

Depósito legal: B. 11.467-1998

Fotocomposición: Edition Book - Aragón, 414, entio. 2ª - 08013 Barcelona

Impreso sobre papel Offset-F Crudo de Leizarán, S.A. - Guipúzcoa

Liberdúplex, S.L. - Constitución, 19 - 08014 Barcelona

Impreso en España

índice

P.	9	Agradecimientos
	11	1. Frente al monte Rushmore
	49	2. Grilletes de seda
	87	3. El mensaje de la montaña
	125	4. Emprendiendo el vuelo
	157	5. Las cuarenta sendas hacia la iluminación
	219	6. El museo de todas las conchas
	247	7. Embriones calidoscópicos
	281	8. Granos de polen y balas mágicas
	303	9. El robot repetidor
	327	10. «Un jardín cercado»
		Apéndices
	359	Procedencia de las ilustraciones
	361	Bibliografía
	366	índice onomástico

**A Robert Winston,
buen doctor y una buena persona**

AGRADECIMIENTOS

Este libro tiene su origen en mis Christmas Lectures de la Royal Institution, televisadas por la BBC con el título general de *Growing up in the Universe* [Creciendo en el universo]. Tuve que abandonar este título porque desde entonces han aparecido al menos otros tres libros con nombres casi idénticos. Además, mi libro ha crecido también y ha cambiado, de manera que no es justo decir que es el libro de las Christmas Lectures. No obstante, me gustaría dar las gracias al director de la Royal Institution por haberme honrado con la invitación a unirme al linaje histórico de conferenciantes de Navidad que se remonta a Michael Faraday. Bryson Gore, de la Royal Institution, junto con William Wollard y Richard Melman, de Inca Televisión, ejercieron una gran influencia en mis conferencias, que todavía se deja sentir en este libro a pesar de sus muchas transformaciones y ampliaciones.

Michael Rodgers leyó e hizo una crítica constructiva de los borradores iniciales, que tenían más capítulos, y sus consejos fueron decisivos para la reconstrucción de todo el libro. Fritz Vollrath y Peter Fuchs realizaron lecturas expertas del capítulo 2, mientras que Michael Land y Dan Nilsson hicieron lo mismo para el capítulo 5. Estos cuatro expertos me ofrecieron generosamente su saber cuando lo pedí en préstamo. Mark Ridley, Matt Ridley, Charles Simonyi y Lalla Ward Dawkins leyeron todo el borrador del libro y me proporcionaron estímulo alentador y críticas útiles en las proporciones necesarias. Mary Cunneane, de W. W. Norton, y Ravi Mirchandani, de Viking Penguin, mostraron hacia mí una bondadosa tolerancia y un criterio generoso a medida que el libro crecía, adquiriría vida propia y finalmente se reducía de nuevo a un formato más manejable. John Brockman acechaba alentadoramente en un segundo plano, nunca interfiriendo pero siempre dispuesto a dar su apoyo. Los expertos en ordenadores son héroes de los

que muy raramente se cantan sus gestas. En este libro he utilizado los programas de Peter Fuchs, Thiemo Krink y Sam Zschokke. Ted Kaehler colaboró conmigo en la concepción y la escritura del difícil programa de los artromorfos. En mi propio séquito de programas de «relojero» me he beneficiado con frecuencia del consejo y la ayuda de Alan Grafen y Alun ap Rishiart. El personal de las colecciones zoológica y entomológica del Museo Universitario de Oxford me cedió especímenes y consejos de experto. Josine Meijer fue una documentalista de ilustraciones dispuesta e ingeniosa. Mi esposa, Lalla Ward Dawkins, hizo los dibujos (pero no los esquemas), y su amor por la creación darwiniana resplandece en cada uno de ellos.

Debo dar las gracias a Charles Simonyi, no sólo por su inmensa generosidad al crear la plaza de comprensión pública de la ciencia que en la actualidad ocupo en Oxford, sino también por articular su visión (que coincide con la mía) del arte de explicar ciencia a una audiencia numerosa: no hablar con prepotencia; intentar inspirar a todos con la poesía de la ciencia y hacer las explicaciones tan fáciles como lo permita la propia integridad, pero sin descuidar las dificultades, y realizar un esfuerzo explicativo adicional de cara a aquellos lectores dispuestos a dedicar un esfuerzo comparable a comprender.

1

Frente al monte Rushmore



Acabo de asistir a una conferencia en la que el tema de debate era el higo. No era de carácter botánico, sino literario. Se habló del higo en la literatura, el higo como metáfora, las percepciones cambiantes del higo, el higo como símbolo de las partes pudendas y la hoja de higuera como modesta ocultadora de las mismas, «higo» como palabra gruesa, la construcción social del higo, cómo comer un higo en sociedad según D.H. Lawrence, «la lectura del higo» y, si mal no recuerdo, «el higo como texto». La *pensée* final del conferenciante fue la siguiente. Nos recordó el relato del Génesis en el que Eva tienta a Adán para comer el fruto del árbol de la ciencia. El Génesis no especifica, nos recordó, de qué fruto se trataba; por tradición, se acepta que era una manzana. Pero el conferenciante sospechaba que de hecho era un higo, y con este pequeño dardo picante terminó su charla.

Esta clase de cosas forma parte del repertorio de un determinado tipo de mente literaria, pero *a mí* me provoca una propensión a la literalidad. Era evidente que el conferenciante sabía que nunca existió un Jardín del Edén, ni tampoco un árbol de la ciencia del bien y del mal. Así pues, ¿qué intentaba comunicar realmente? Supongo que debía tener una vaga sensación de que «de alguna manera», «si se quiere», «en algún nivel», «en cierto sentido», «si así puede decirse», es en cierto modo «correcto» que el fruto del relato del Génesis «pudiera» haber sido un higo. Ya es bastante. No se trata de ser literalistas y puntillosos hasta el extremo, pero hay que decir que nuestro refinado conferenciante *se dejó* muchísimas cosas. En el higo subyace una paradoja genuina y una poesía real, con sutilezas capaces de ejercitar una mente inquisitiva y maravillas que harían las delicias de una mente estética. En este libro quiero situarme en una perspectiva desde la que poder explicar la verdadera historia del higo. Ahora bien, aunque figure entre

las más cabalmente complejas de toda la evolución, la historia del higo es sólo una entre millones, todas las cuales comparten la misma gramática y la misma lógica darwinianas. Para anticipar la metáfora central del libro, podría decirse que la higuera se encuentra en la cumbre de uno de los picos más altos del macizo del monte Improbable. Pero los picos de esa altura se conquistan mejor al final de la expedición. Antes de ello hay muchas cosas que contar, una visión completa de la vida por desarrollar y explicar, enigmas por resolver y paradojas por desmontar.

Como dije, la historia del higo es, en su nivel más profundo, la misma que la de cualquier otro ser vivo de este planeta. Aunque las distintas historias puedan diferir en el detalle superficial, todas son variaciones sobre el tema del DNA y sus 30 millones de vías de propagación. En nuestra ruta tendremos ocasión de observar las telarañas, la ingeniosidad estupefaciente, aunque inconsciente, de su fabricación y funcionamiento. Reconstruiremos la evolución lenta y gradual de las alas y de la trompa de los elefantes. Veremos que, por legendariamente difícil que pueda parecer su evolución, «el» ojo se ha desarrollado de hecho al menos cuarenta veces, y puede que hasta sesenta, de manera independiente en el conjunto del reino animal. Programaremos ordenadores que nos ayuden a visitar con la imaginación el gigantesco museo de los incontables organismos que han vivido y desaparecido, así como el de sus primos imaginarios, aún más numerosos, que nunca nacieron. Vagaremos por los senderos del monte Improbable, admirando en la distancia sus precipicios verticales, pero buscando siempre sin cesar las laderas de suave pendiente que hay del otro lado. Clarificaremos el significado de la parábola del monte Improbable, y otras muchas cosas. Empezaré por aclarar el problema del diseño* aparente en la naturaleza, su relación con el diseño humano genuino y su relación con el azar. Éste es el objetivo del capítulo 1.

El Museo de Historia Natural de Londres posee una singular colección de piedras que casualmente recuerdan objetos familiares: una bota, una mano, un cráneo de niño, un pato, un pez. Las donaron al

* En inglés, *design* es a la vez diseño y designio, entre otras acepciones. El autor utiliza a menudo ambos sentidos, lo que no siempre se ha podido reflejar adecuadamente en la traducción. (IV. *del T.*)

museo personas que sospechaban sinceramente que tal parecido podía tener algún significado. Sin embargo, la erosión de las piedras ordinarias origina tal confusión de formas que no es en absoluto sorprendente encontrar alguna que nos recuerde una bota o un pato. De todas las que son susceptibles de captar nuestra atención, el museo ha conservado aquellas que la gente recoge y guarda como curiosidades. Miles de piedras son desechadas porque son sólo eso, piedras. Las coincidencias de semejanza en esta colección de museo no tienen significado alguno, pero son divertidas. Lo mismo ocurre cuando creemos ver caras o formas animales en las nubes o los perfiles de los acantilados. Las semejanzas no son más que accidentes.

Se supone que la ladera escarpada de la figura 1.1 sugiere el perfil del desaparecido presidente Kennedy. Una vez sabido, puede advertirse un ligero parecido tanto con John como con Robert Kennedy. Pero hay quienes no lo perciben, y ciertamente es fácil aceptar que tal parecido es accidental. En cambio, no es posible persuadir a una persona razonable de que en el monte Rushmore, en Dakota del Sur, la erosión debida a los agentes meteorológicos produjo los rasgos de los presidentes Washington, Jefferson, Lincoln y Theodore Roosevelt. No hace falta que nos digan que éstos fueron esculpidos de forma deliberada (bajo la dirección de Gutzon Borglum). Es evidente que no son accidentales: llevan el diseño escrito por todas partes.

La diferencia entre el monte Rushmore y el perfil de John Kennedy obra de la meteorización (o el monte Saint Pierre en Mauricio, o cualquier otra curiosidad de este tipo debida a la erosión natural) es la siguiente. El enorme número de detalles que hacen que las caras del monte Rushmore se parezcan a las originales es demasiado grande para ser producto de la casualidad. Además, las caras son claramente reconocibles cuando se las observa desde ángulos diferentes. En cambio, el parecido casual con el presidente Kennedy de la figura 1.1 sólo se advierte contemplando el despeñadero desde cierto ángulo y con una iluminación particular. Sí, una roca puede erosionarse hasta adquirir la forma de una nariz si se la observa desde un punto concreto, y hasta puede que otro par de rocas haya rodado hasta una posición que sugiere la forma de unos labios. No es mucho pedir del azar que produzca una modesta coincidencia como ésta, en especial si el fotógrafo puede elegir entre todos los ángulos posibles y sólo uno ofrece el pare-

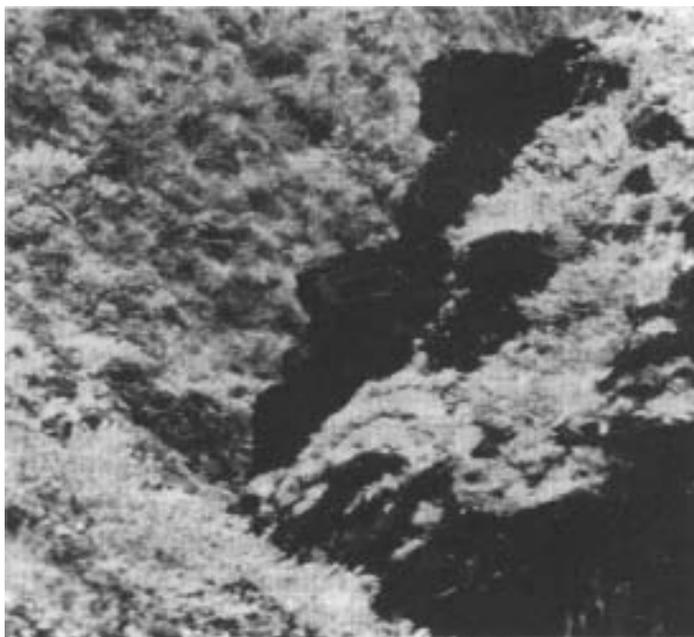


Figura 1.1. Un puro accidente. El perfil del presidente Kennedy en una ladera de Hawai.

cido (y existe el hecho adicional, al que volveré enseguida, de que el cerebro humano parece mostrar una activa inclinación a ver caras: las busca y las encuentra). Pero el monte Rushmore es otra cosa. Sus cuatro cabezas están claramente *diseñadas* (o lo que es lo mismo, responden a un diseño). Un escultor las concibió, las dibujó sobre el papel, realizó meticulosas medidas en todo el acantilado y supervisó equipos de operarios que manejaban taladros neumáticos y dinamita para esculpir las cuatro caras, cada una de ellas de dieciocho metros de altura. La intemperie *pudo* haber realizado la misma tarea que la dinamita diestramente distribuida. Ahora bien, de todas las maneras posibles en que una montaña puede erosionarse, sólo una ínfima minoría sería el retrato fiel de cuatro personas concretas. Aun sin conocer la historia del monte Rushmore, estimaríamos que las probabilidades en contra de que las cuatro caras hubieran sido accidentalmente esculpidas por la erosión eran astronómicamente altas (algo así como lanzar cuarenta veces una moneda al aire y obtener siempre cara).

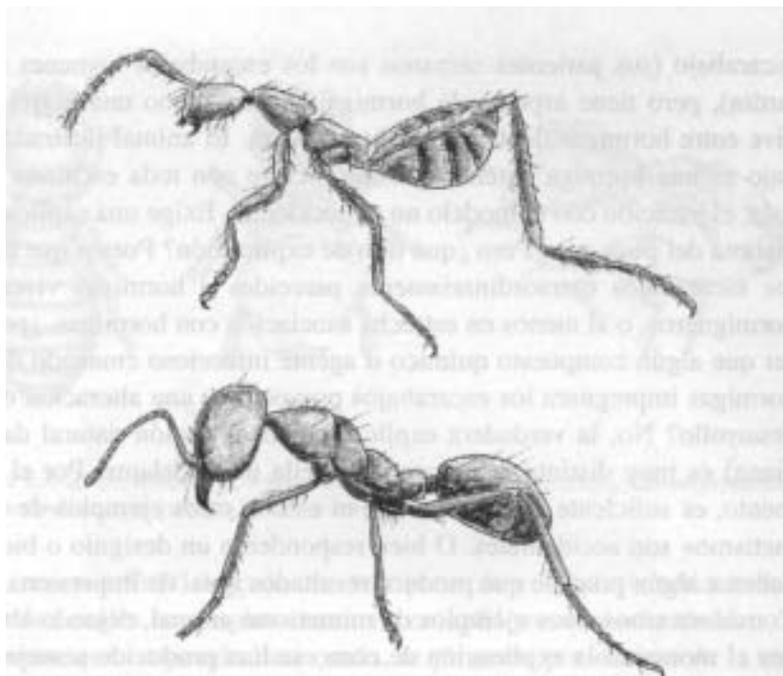


Figura 1.2. Una semejanza involuntaria, pero no accidental. Un escarabajo imitador de hormigas, *Labidus praedator* (a) y una hormiga, *Mimeceton antennatum* (b).

Creo que la distinción entre accidente y diseño está clara al menos en una primera aproximación, aunque quizá no siempre en la práctica, pero este capítulo presentará una tercera categoría de objetos más difíciles de distinguir. Los llamaré **diseñoides**. Los objetos diseñoides son organismos vivos y sus productos. Los objetos diseñoides **parecen** responder a un diseño, tanto que mucha gente (probablemente, ¡ay!, la mayoría) piensan que **han sido** diseñados. Quienes así lo creen se equivocan, pero no en su convicción de que los objetos diseñoides no pueden ser resultado del puro azar. Los objetos diseñoides no son accidentales. En realidad, han sido construidos por un magnífico proceso no aleatorio que crea una ilusión casi perfecta de diseño.

La figura 1.2 muestra una escultura viviente. En general, los escarabajos no se parecen a las hormigas. Así, si veo un escarabajo que se parece casi exactamente a una hormiga (un escarabajo que, además, pasa toda su vida en un hormiguero) sospecharé correctamente que la coincidencia significa algo. El animal ilustrado arriba es en realidad un

escarabajo (sus parientes cercanos son los escarabajos comunes o de jardín), pero tiene aspecto de hormiga, camina como una hormiga y vive entre hormigas dentro de un hormiguero. El animal ilustrado debajo es una hormiga auténtica. Como ocurre con toda escultura realista, el parecido con el modelo no es accidental. Exige una explicación distinta del puro azar. Pero ¿qué tipo de explicación? Puesto que todos los escarabajos extraordinariamente parecidos a hormigas viven en hormigueros, o al menos en estrecha asociación con hormigas, ¿podría ser que algún compuesto químico o agente infeccioso emanado de las hormigas impregnara los escarabajos provocando una alteración de su desarrollo? No, la verdadera explicación (la selección natural darwiniana) es muy distinta, y llegaremos a ella más adelante. Por el momento, es suficiente tener claro que ni este ni otros ejemplos de «mimetismo» son accidentales. O bien responden a un designio o bien se deben a algún proceso que produce resultados igual de impresionantes. Consideraremos otros ejemplos de mimetismo animal, dejando abierta por el momento la explicación de cómo se han producido semejanzas tan notables.

El ejemplo anterior pone de manifiesto el buen trabajo que puede hacer la carne de escarabajo cuando «se dedica a imitar» un tipo distinto de insecto. Obsérvese ahora el animal de la figura 1.3b. Recuerda un terme. Puede compararse con la figura 1.3a que es un terme de verdad. El espécimen de la figura 1.3b es un insecto, pero no es un terme. En realidad, es otro escarabajo. Admito haber visto mejores mimetas en el mundo de los insectos (entre ellos el escarabajo con aspecto de hormiga que hemos visto antes). En este caso el «escarabajo» es un tanto raro. Se diría que sus patas carecen de las obligadas articulaciones; recuerdan esos globos alargados que se retuercen al inflarlos. Puesto que, como cualquier otro insecto, los escarabajos poseen patas articuladas, se podría esperar una imitación más lograda de las patas articuladas de un terme. ¿Cuál es, pues, la solución de este acertijo? ¿Por qué este mimeta parece más un muñeco hinchable que un insecto real, articulado? La respuesta puede verse en la figura 1.3c, y constituye uno de los espectáculos más sorprendentes de toda la historia natural. La figura muestra el escarabajo imitador de termes visto lateralmente. La verdadera cabeza del escarabajo es una cosa minúscula (el lector puede ver el ojo junto a las antenas normales, articuladas) unida

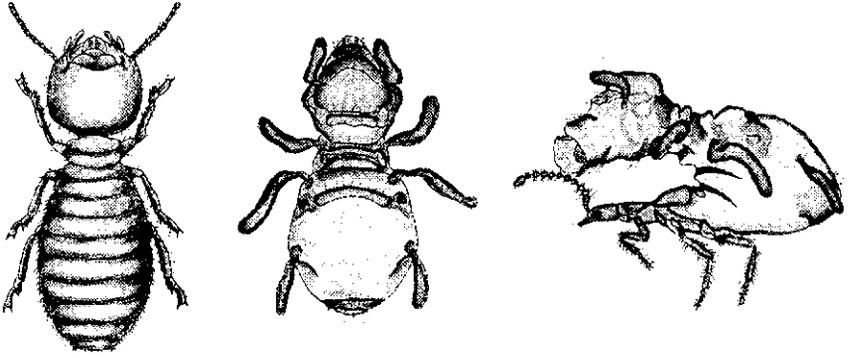


Figura 1.3. a) Un terme real, *Amitermes hastatus*; b) un escarabajo, *Coatonachthodes ovambolandicus*, que imita un terme; c) como se logra el truco.

a un tronco o tórax delgado con tres patas de coleóptero, articuladas, sobre las cuales se desliza normalmente. El truco se efectúa con el abdomen, que, arqueado hacia atrás, se proyecta por encima de la cabeza, el tórax y las patas como un parasol. Todo el «terme» está construido a partir de la mitad posterior del abdomen del escarabajo. La «cabeza de terme» es el extremo posterior, mientras que las «patas» y las «antenas de terme» son excrescencias abdominales colgantes. No es de extrañar que la calidad de este mimetismo no esté a la altura del de la figura 1.2. Incidentalmente, este escarabajo imitador de termes vive en los termiteros, ganándose la vida como parásito de manera muy parecida a como lo hace su primo el imitador de hormigas. Pero, cuando se consideran los materiales de partida, el escarabajo imitador de termes representa una proeza escultórica incluso más impresionante que el escarabajo hormiga. Este último ha modelado cada fragmento de su cuerpo hasta parecerse al fragmento correspondiente del cuerpo de una hormiga. El imitador de termes, en cambio, consigue su mimetismo modelando un fragmento completamente distinto de sí mismo, el abdomen, para parecerse globalmente al terme.

De todas las «estatuas» animales, mi favorita es la del dragón de mar foliáceo (figura 1.4). Se trata de un pez, una especie de caballito de mar, cuyo cuerpo adopta la forma de un alga marina. Esto le confiere protección, porque vive entre algas y allí es difícilísimo de ver. Su mimetismo es demasiado bueno y misterioso para ser simplemente ac-



Figura 1.4. Perfección del camuflaje. Una hembra de dragón de mar foliáceo. *Phycodurus eques*, de Australia.

cidental. Se encuentra más cerca del monte Rushmore que del perfil de Kennedy. Mi confianza se basa, por un lado, en la impresión que nos producen los muchos detalles que lo asemejan a algo que no es, y por otro en el hecho de que, por regla general, los peces no tienen excrecencias de este estilo. A este respecto, el logro del dragón de mar foliáceo es comparable al del mimeta del terne, más que al del mimeta de la hormiga.

Hasta aquí hemos hablado de objetos que nos impresionan de la misma forma en que lo hace una escultura realista, objetos que sabemos que no pueden ser accidentales porque se parecen de manera sorprendente a otros objetos. Los dragones de mar foliáceos y los escarabajos imitadores de hormigas son estatuas diseñoides: es como si hubieran sido diseñados por un artista con objeto de parecerse a otra cosa. Pero las estatuas son sólo una de las clases de objetos que los seres humanos diseñan. Otros artefactos humanos nos impresionan no porque se parezcan a algo, sino porque de manera inequívoca resultan útiles para algún propósito. Un avión es útil para volar; un cuenco es útil para contener agua; un cuchillo es útil para cortar cosas.

Si ofreciéramos una recompensa a cambio de piedras que, de

forma natural, tuviesen un borde lo bastante afilado para cortar cosas, o cuya forma fuese adecuada para contener agua, probablemente recibiríamos varios sustitutos eficaces de cuchillos y receptáculos. Los pedernales suelen fracturarse de manera que se forma un borde afilado, y si recorriéramos los pedregales y canteras del mundo es seguro que encontraríamos algunos cuchillos naturales funcionales. Entre la riqueza de formas que pueden adoptar las piedras erosionadas, siempre habría algunas con concavidades capaces de retener agua. Ciertos tipos de cristal se incrustan de manera natural alrededor de una esfera hueca que, aunque irregular, cuando se hiende por la mitad produce dos receptáculos útiles. Dichas piedras tienen su propio nombre: se denominan geodas. Tengo una sobre mi mesa que empleo como pisapapeles, y la usaría para beber si no fuera por la dificultad de limpiar su interior repleto de picos.

Es fácil idear medidas de eficiencia que demuestren que los receptáculos naturales son menos eficientes que los manufacturados. La eficiencia es una medida del beneficio en relación al coste. El beneficio de un receptáculo podría medirse como la cantidad de agua que puede contener. El coste podría medirse convenientemente en unidades equivalentes como la cantidad de material de la propia marmita. Podríamos definir por lo tanto la eficiencia como la capacidad de un receptáculo dividida por el volumen del material de que está hecho. La piedra hueca de mi mesa puede contener 87,5 cc de agua. El volumen de la piedra misma (que medí mediante el famoso método de Arquímedes-en-el-baño-¡Eureka!) es de 130 cc. Así pues, la eficiencia de este «cuenco» es de 0,673. Es una eficiencia muy baja, lo que no debe sorprender, puesto que la piedra nunca fue diseñada para contener agua. El que pueda contenerla es un hecho casual. Acabo de efectuar las mismas medidas sobre una copa de vino, cuya eficiencia resulta ser de alrededor de 3,5, y sobre una jarra de plata para servir leche proporcionada por un amigo. Esta última es aún más eficiente: su capacidad es de 250 cc, mientras que la plata de que está hecha desplaza sólo 20 cc, lo que da una eficiencia de 12,5.

No todos los receptáculos diseñados por el hombre son eficientes en este sentido. En la alacena de mi cocina tengo un cuenco rechoncho con una capacidad de 190 cc frente a unos voluminosos 400 cc de mármol. Su «eficiencia», por lo tanto, resulta ser de sólo 0,475, inferior in-

cluso a la de la piedra hueca que no ha sido diseñada en absoluto para contener agua. ¿Cómo puede ser esto? La respuesta es reveladora. Este cuenco de mármol no es otra cosa que un mortero. No ha sido diseñado para contener líquido, sino que es un molino manual para moler especias y otros condimentos con una mano de almirez (una maza que se golpea con fuerza contra el fondo del recipiente). No se puede utilizar una copa de vino como mortero: se haría añicos. La medida de eficiencia que hemos inventado para los receptáculos no es adecuada cuando éste tiene que servir como mortero. Hay que usar alguna otra relación beneficio/coste, en la que el beneficio tenga en cuenta la resistencia a los golpes dados con una mano de almirez. ¿Podría cumplir la geoda antes considerada los requisitos de un mortero bien diseñado? Probablemente pasaría la prueba de resistencia, pero si intentáramos usarla como mortero pronto se haría evidente su inadecuación, pues las anfractuosidades del interior impedirían moler los granos. La medida de la eficiencia para un mortero debería corregirse incluyendo algún índice de uniformidad de la curvatura interna. Que mi almirez de mármol obedece a un diseño se puede adivinar a partir de otras evidencias, como su sección perfectamente circular, su borde elegantemente torneado y su base elevada.

Podríamos inventarnos una medida de eficiencia similar para los cuchillos, y no me cabe duda de que los pedernales lascados que acertáramos a encontrar en una cantera saldrían malparados en su comparación no ya con las hojas de acero de Sheffield, sino con los pedernales elegantemente esculpidos que los museos exhiben en sus colecciones del Neolítico.

En comparación con sus equivalentes diseñados, los receptáculos y cuchillos accidentales de origen natural son también ineficientes en otro sentido. Para encontrar un cuchillo de pedernal con un filo adecuado o un receptáculo de piedra que retenga convenientemente el agua hace falta examinar y descartar un gran número de piedras inútiles. Cuando medimos la capacidad de un receptáculo y dividimos este volumen por el de la piedra o arcilla que lo constituye, sería más justo añadir en el denominador el coste del material desechado. En el caso de una cacerola fabricada por el hombre haciendo girar un torno, este coste adicional sería negligible. En el caso de una escultura esculpida, el coste de los ripios desechados sería medible, pero pequeño. En el

caso de los *objets trouvés*, el coste del descarte de material sería colosal. La mayoría de piedras no sirve para contener agua ni para cortar. Una industria que se basara por entero en *objets trouvés*, en objetos encontrados al azar para emplearlos como utensilios en lugar de utensilios manufacturados, tendría en los montones de objetos alternativos descartados por inservibles un enorme peso muerto de ineficiencia. Diseñar es más eficiente que buscar al azar.

Dirijamos ahora nuestra atención hacia los objetos diseñoides (seres vivos de los que se diría que han sido diseñados, pero que en realidad han sido conformados por un proceso completamente distinto). Comencemos por los receptáculos diseñoides. La planta insectívora de la figura 1.5 podría considerarse un tipo de receptáculo, pero tiene una elegante «relación de economía» comparable a la copa de vino medida por mí, incluso al jarro de plata. Tiene todo el aspecto de haber sido excelentemente diseñada no ya para contener agua, sino para ahogar insectos y digerirlos. Produce un sutil perfume que los insectos encuentran irresistible. El olor, apoyado por un atractivo diseño de color, atrae a las presas hacia la parte superior del ascidio. Allí los insectos se encuentran sobre un tobogán cuyo carácter resbaladizo es más que accidental, pues está sembrado de pelos dirigidos hacia abajo, colocados expresamente para impedir su último esfuerzo. Cuando caen, como pasa casi siempre, dentro del oscuro vientre del ascidio, encuentran algo más que agua en la que ahogarse. Los detalles, que me reveló mi colega el doctor Barrie Juniper, son notables y voy a referirlos brevemente.

Una cosa es atrapar insectos, pero las plantas carnívoras carecen de mandíbulas, músculos y dientes con los que reducirlos a un estado adecuado para la digestión. Quizá las plantas pudieran desarrollar dientes y mandíbulas masticadoras, pero en la práctica existe una solución más fácil. El agua del ascidio alberga una rica comunidad de queresas y otros organismos. No viven en parte alguna más que en las charcas cerradas que crean las plantas carnívoras con ascidios, y poseen las mandíbulas de las que carece la propia planta. Los cadáveres de las víctimas ahogadas de la planta carnívora son devorados y descompuestos por las piezas bucales y los jugos digestivos de sus cómplices, las queresas. La planta en sí subsiste a base de los detritos y productos de excreción, que absorbe a través del revestimiento del ascidio.

La planta carnívora no acepta simplemente los servicios de las que-

resas que casualmente caen en su piscina privada, sino que trabaja activamente para proporcionarles un servicio que éstas, a su vez, necesitan. Si se analiza el agua de una planta carnívora de ascidios se encontrará un hecho singular. No es fétida, como cabría esperar de un agua estancada en tales condiciones, sino extrañamente rica en oxígeno, sin el cual las activas queresas no podrían medrar. ¿De dónde procede este oxígeno? Todo parece indicar que la planta misma está diseñada para oxigenar el agua. Curiosamente, las células que tapizan los ascidios son más ricas en clorofila que las células externas expuestas al sol y al aire. Esta sorprendente inversión del sentido común aparente es explicable: las células interiores están especializadas en secretar oxígeno directamente al agua del interior del ascidio. La planta carnívora no se limita a tomar prestadas sus mandíbulas vicarias: las alquila, utilizando el oxígeno como moneda.

Hay otras trampas diseñaoides bastante comunes. La atrapamoscas [*Dionaea muscipula*] es tan elegante como la planta carnívora del género *Nepenthes* antes citada, con el refinamiento añadido de contar con partes móviles. El insecto presa dispara la trampa al tocar unos pelos sensitivos de la planta, cuyas «mandíbulas» se cierran vigorosamente. La telaraña es la más familiar de todas las trampas animales, y le haremos justicia en el próximo capítulo. Un equivalente subacuático es la red que construyen las larvas de los tricópteros, insectos que viven en los ríos. Estas larvas son también notables por sus logros como constructoras de habitáculos. Las distintas especies utilizan piedrecillas, palitos, hojas o conchas de caracoles diminutos.

Un espectáculo familiar en diversas partes del mundo es la trampa cónica de la hormiga león. Este temible animal es la larva de (¿qué podría parecer más apacible?) una crisopa.* La hormiga león acecha en el fondo de su pozo justo bajo la arena, esperando que caigan en él hormigas y otros insectos. El pozo adquiere su forma cónica casi perfecta (lo que hace difícil que las víctimas puedan salir de él arrastrándose) no por designio sino como consecuencia de algunas leyes físicas sencillas, explotadas por la conducta excavatoria del insecto, que expulsa la arena desde el fondo con violentas sacudidas de la cabeza. Esta forma

* Neuróptero cuyo nombre popular genérico en inglés es *lacewing*, literalmente, «alas de encaje». (N. del T.)



*Figura 1.5. Un receptáculo diseñoide, el ascidio de una planta insectívora, *Nepenthes pervillei*, de las Seychelles.*

de excavación tiene el mismo efecto que vaciar un reloj de arena por debajo: la arena se dispone de forma natural en un cono perfecto de pendiente predecible.

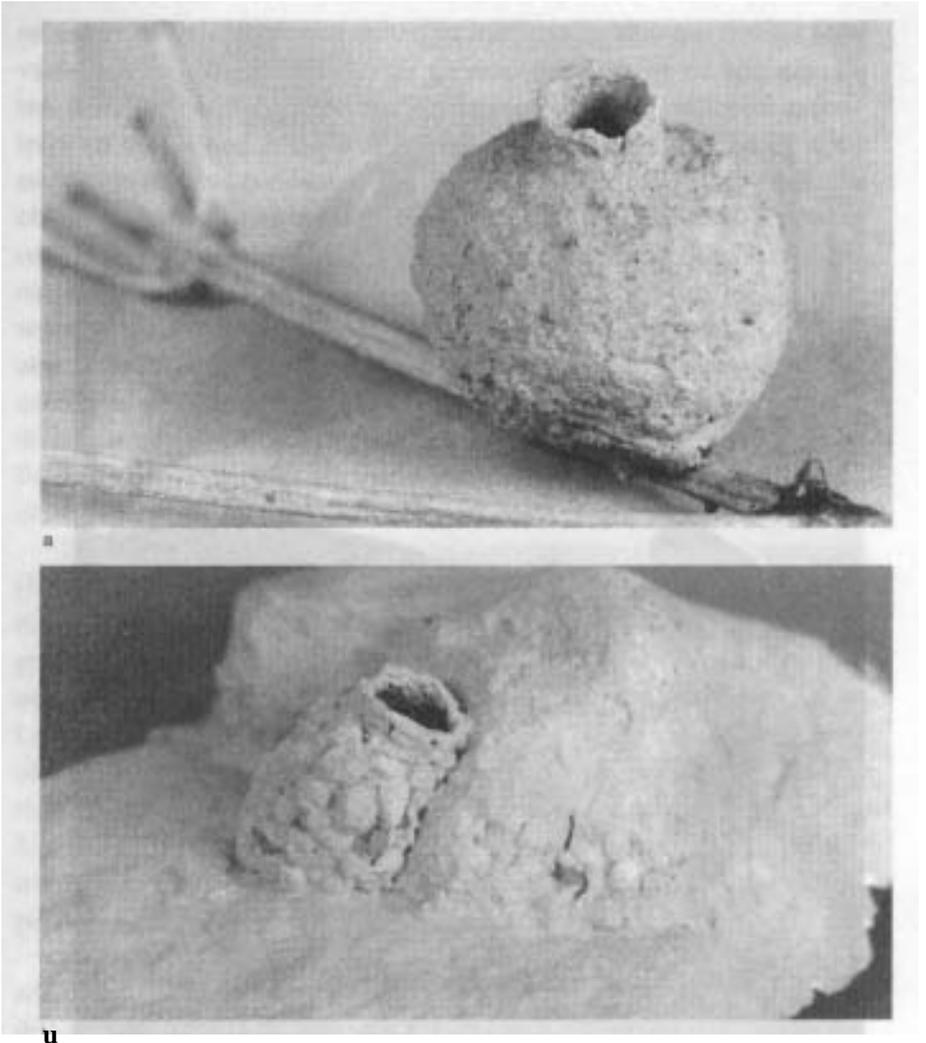


Figura 1.6. Receptáculos diseñoides fabricados por artesanos animales: a) avispa alfarera, y b) abeja albañil.

La figura 1.6 nos devuelve a los receptáculos. Muchas avispas solitarias ponen sus huevos sobre presas previamente agujoneadas y paralizadas que esconden después en un agujero sellado para hacerlo invisible. La larva se alimenta de la presa del interior y finalmente emerge como adulto alado para completar el ciclo. La mayoría de especies de

avispas solitarias excavan su agujero de nidificación en el suelo. La avispa alfarera, en cambio construye su «agujero» con arcilla: una olla esférica, sobre un árbol, instalada de manera inconspicua sobre una ramita (fig. 1.6a). Al igual que la planta carnívora, este receptáculo obtendría una puntuación favorable en nuestra prueba de eficiencia para el diseño aparente. Las abejas solitarias anidan igualmente en agujeros, pero alimentan a sus larvas con polen en vez de presas animales. Como hace la alfarera entre las avispas, muchas especies de abeja albañil construyen su propio nido en forma de recipiente. El de la figura 1.6b no está hecho de arcilla, sino de piedrecillas cementadas. Además de su semejanza con un receptáculo eficiente de fabricación humana, hay otro hecho extraordinario acerca del ejemplar de la fotografía: aunque sólo se ve uno, en realidad hay cuatro receptáculos. Los otros tres han sido recubiertos por la abeja con fango endurecido para conseguir un ajuste primoroso con la roca circundante. Ningún depredador podría detectar las larvas en desarrollo dentro de las cápsulas. La única razón por la que mi colega Christopher O'Toole pudo localizar este grupo en el transcurso de una visita a Israel es que la abeja aún no había terminado de recubrir la última cápsula.

Estas cápsulas, obra de insectos, tienen todos los sellos distintivos del «diseño». En este caso, y a diferencia de la planta carnívora, sí son fruto de la destreza de una criatura (aunque con toda probabilidad inconsciente). Las cápsulas de la avispa alfarera y la abeja albañil parecen estar, pues, más próximas a los receptáculos manufacturados que a los de la planta carnívora. Pero ni una ni otra diseñan sus cápsulas de manera consciente o deliberada. Aunque los insectos las modelan activamente a partir de arcilla o piedrecitas, el proceso no se diferencia esencialmente de la construcción de los propios cuerpos de la avispa o la abeja durante el desarrollo embrionario. Esto puede parecer extraño, pero permítaseme explicarme. El sistema nervioso se desarrolla de manera que músculos, extremidades y mandíbulas del insecto vivo se mueven de acuerdo con pautas coordinadas concretas. La consecuencia de estos movimientos mecánicos de las extremidades es el modelado de un montón de arcilla en forma de receptáculo. Muy probablemente el insecto no sabe lo que hace ni por qué lo hace. No tiene el concepto de receptáculo ni como obra de arte ni como contenedor ni como cámara de incubación. Sus músculos simplemente se mueven de

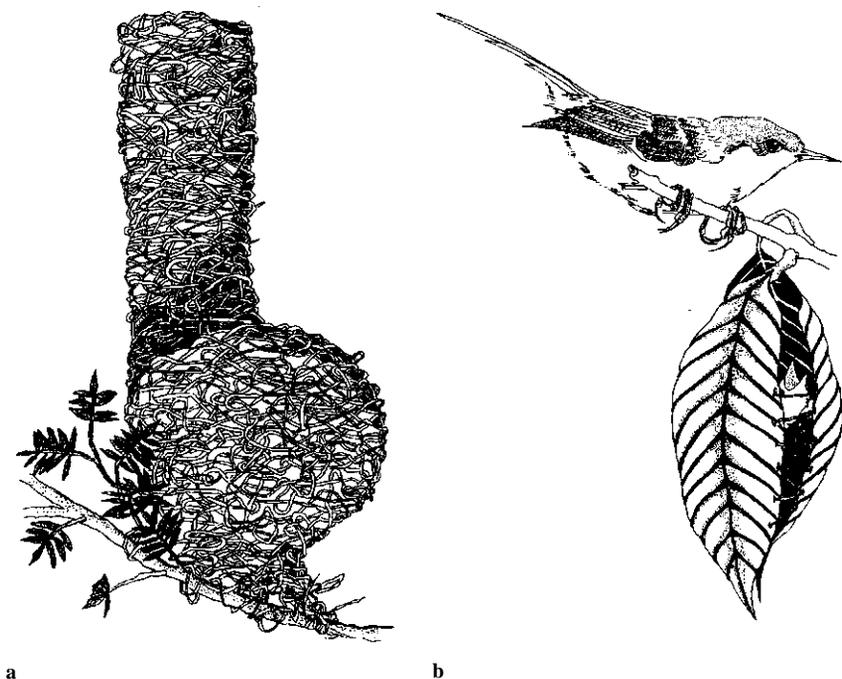


Figura 1.7. Artesanía diseñoide. a) Nido de tejedor, y b) curruca costurera, *Orthotomus sutorius*, con su nido.

la manera que les dictan sus nervios, y el resultado es un receptáculo. Es por esto por lo que no vacilamos en clasificar las cápsulas de avispas y abejas como diseñoides, y no como diseños modelados por la volición creativa del animal (aunque no por eso dejamos de admirarlos). Para ser sincero, en realidad no puedo saber a ciencia cierta si las avispas carecen de volición creativa y diseño auténticos. Me basta con que mi explicación funcione, tanto si las avispas poseen estas facultades como si no. Lo mismo vale para los nidos y pérgolas de aves (figura 1.7) y para las casitas y redes de los tricópteros, pero no así para las esculturas del monte Rushmore ni para las herramientas que se utilizaron para labrarlas: éstas sí obedecen a un diseño.

Karl von Frisch, el famoso zoólogo austríaco que descifró la danza de las abejas, escribió: «Si por un momento imagináramos que los termites fueran tan grandes como los seres humanos, sus mayores termite-



Figura 1.8. Rascacielos para insectos, alineados en dirección norte-sur. Termiteros de termes brújula, en Australia.

ros, ampliados a la misma escala, tendrían casi un kilómetro y medio de altura, cuatro veces la altura del Empire State Building de Nueva York». Los rascacielos de la figura 1.8 son obra de los termes brújula de Australia. Se les llama así porque sus termiteros siempre están alineados en dirección norte-sur, de manera que los viajeros extraviados pueden emplearlos como brújula (igual que, dicho sea de paso, las antenas parabólicas: en Inglaterra todas parecen estar orientadas hacia el sur). La ventaja para los termes es que de esta forma las amplias superficies planas del termitero son caldeadas por el sol de las primeras horas de la mañana y de las últimas horas de la tarde, pero al mismo tiempo se protege del terrible sol del mediodía presentando sólo un borde estrecho en dirección norte. Sería ciertamente disculpable pensar que los termes han diseñado por sí mismos este ingenioso truco. Pero el principio que hace que su comportamiento de construcción parezca inteligente es idéntico al que hace que las mandíbulas y patas de los termes parezcan haber sido diseñados. Nada de ello obedece a un diseño. Unas y otras estructuras son diseñoides.

Los artefactos animales como las casas de tricópteros y termes, los nidos de algunas aves o las cápsulas de las abejas albañiles son fasci-

nantes, pero representan un caso especial entre los objetos diseñoides, una curiosidad intrigante. El término «diseñoide» hace referencia fundamentalmente a los propios cuerpos de los organismos y sus partes. El cuerpo de un organismo vivo no es ensamblado por diestras manos, picos o mandíbulas, sino por los intrincados procesos del desarrollo embrionario. Una mente adicta a los sistemas de clasificación exhaustivos podría ver «objetos diseñoides de segundo orden» en artefactos tales como las cápsulas de avispas, o quizá una categoría intermedia entre diseñados y diseñoides, pero pienso que esto sólo serviría para complicar las cosas. Es cierto que la cápsula está hecha de barro, no de células vivas, y está modelada por movimientos de las patas que se parecen superficialmente a los movimientos de las manos de un alfarero humano. Pero todo el «designio», toda la elegancia del diseño, toda la adaptación del receptáculo para el desempeño de una tarea útil, tienen orígenes muy diferentes en uno y otro caso. La vasija humana es concebida y planificada a través de un proceso creativo de imaginación en la cabeza del alfarero, o mediante la imitación deliberada del estilo de otro alfarero. La cápsula de la avispa adquiere su elegancia y adaptación a su función a través de un proceso muy distinto (de hecho, a través del mismo proceso que confirió elegancia y adaptación al cuerpo mismo de la avispa). Esto se hará más evidente yendo un poco más lejos en nuestra discusión de los organismos vivos en tanto que objetos diseñoides.

Una de las formas que tenemos de reconocer tanto el designio propiamente dicho como el pseudodesignio diseñoide es la impresión que nos producen las semejanzas entre unos y otros. Es evidente que las cabezas del monte Rushmore son producto de un designio porque se parecen a presidentes reales. Es también evidente que el parecido del dragón de mar foliáceo con un alga no es tampoco accidental. Pero este mimetismo (como el del escarabajo terme o el insecto palo) no es en absoluto la única clase de semejanza que nos causa impresión en el mundo vivo. A menudo nos sorprende el parecido entre una estructura viva y un artefacto humano que realiza la misma función. El «mimetismo» entre el ojo humano y la cámara fotográfica es tan bien conocido que es innecesario ilustrarlo aquí. Con frecuencia son los ingenieros las personas más cualificadas para analizar el funcionamiento de organismos animales y vegetales, porque los mecanismos eficientes,

sean diseñados o diseñoides, obedecen forzosamente a los mismos principios.

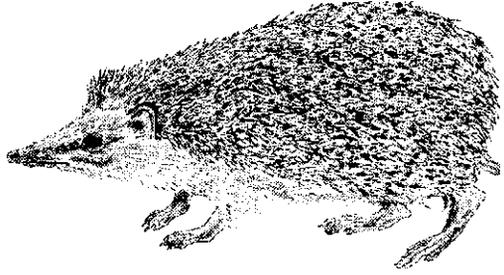
A veces el cuerpo de distintos seres vivos ha convergido hacia una misma forma no por imitación, sino porque la morfología que comparten les resulta útil a cada uno por separado. El erizo y el tenrec espinoso de la figura 1.9 son tan similares que dibujar ambas especies parece casi una pérdida de tiempo. Aunque tienen cierto parentesco (ambos pertenecen al orden insectívoros), otras evidencias indican que están lo bastante alejados para poder afirmar que las púas de uno y otro evolucionaron de manera independiente, presumiblemente por razones paralelas. Cada uno de los animales espinosos se ha dibujado junto a un pariente musarañiforme más cercano. La figura 1.10 proporciona otro ejemplo. Los animales que nadan velozmente cerca de la superficie del mar suelen converger hacia una misma forma. Es la que los ingenieros reconocerían como fusiforme o hidrodinámica. La ilustración muestra un delfín (mamífero), un ictosaurio extinguido (que se puede considerar el equivalente reptiliano de un delfín), un marlín azul (pez óseo) y un pájaro bobo (ave). Este fenómeno se conoce como «evolución convergente».

La convergencia aparente no siempre tiene un significado tan claro. Quienes dignifican la cópula cara a cara como evidencia de humanidad superior (aunque no sean misioneros) pueden deleitarse con los milpiés de la figura 1.11. Si llamamos convergencia a esto, probablemente no se deba a necesidades convergentes sino, más bien, a que un macho y una hembra pueden yuxtaponer sus cuerpos de muchas maneras, y puede haber muchas y variadas razones para decidirse por cualquiera de ellas.

Esto nos lleva, después de un círculo completo, a nuestro tema inicial del puro azar. Hay seres vivos que se parecen a otros objetos, pero cuya semejanza probablemente no es lo bastante fuerte para constituir algo más que un accidente. La paloma apuñalada o de corazón sangrante [*Gallucolumba luzonica*] posee un penacho de plumas rojas situado de tal manera que crea la ilusión de una herida mortal en el pecho, pero es poco probable que esta semejanza tenga algún significado. Igualmente accidental es la semejanza del *coco-de-mer** con unas an-

* Coco de mar, fruto de la palmera *Lodoicea sechellarum*, así llamado porque la ciencia conoció antes dichos frutos, que se dispersan flotando en el mar, que la planta que los producía. (*N. del T.*)

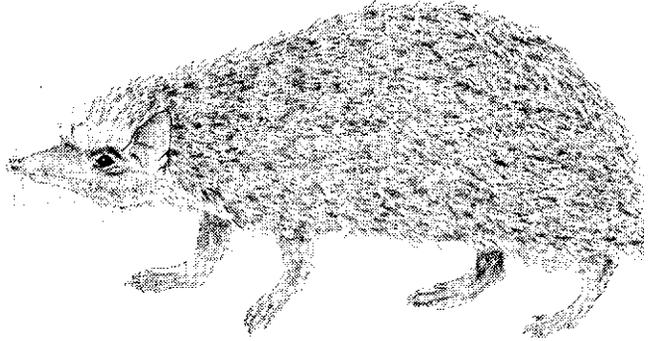
a



b



c



d

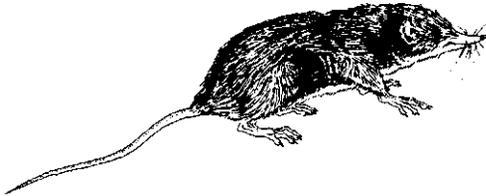


Figura 1.9. Los animales con necesidades similares suelen parecerse más entre sí de lo que se parecen a sus parientes más próximos. El erizo moruno, *Erinaceus algirus* (a), es un primo cercano de la musaraña erizo, *Neotetracus sinensis* (b). El tenrec erizo mayor, *Setifer setosus* (c), es un primo cercano del tenrec colilargo, *Microgale melanorrhachis* (d).

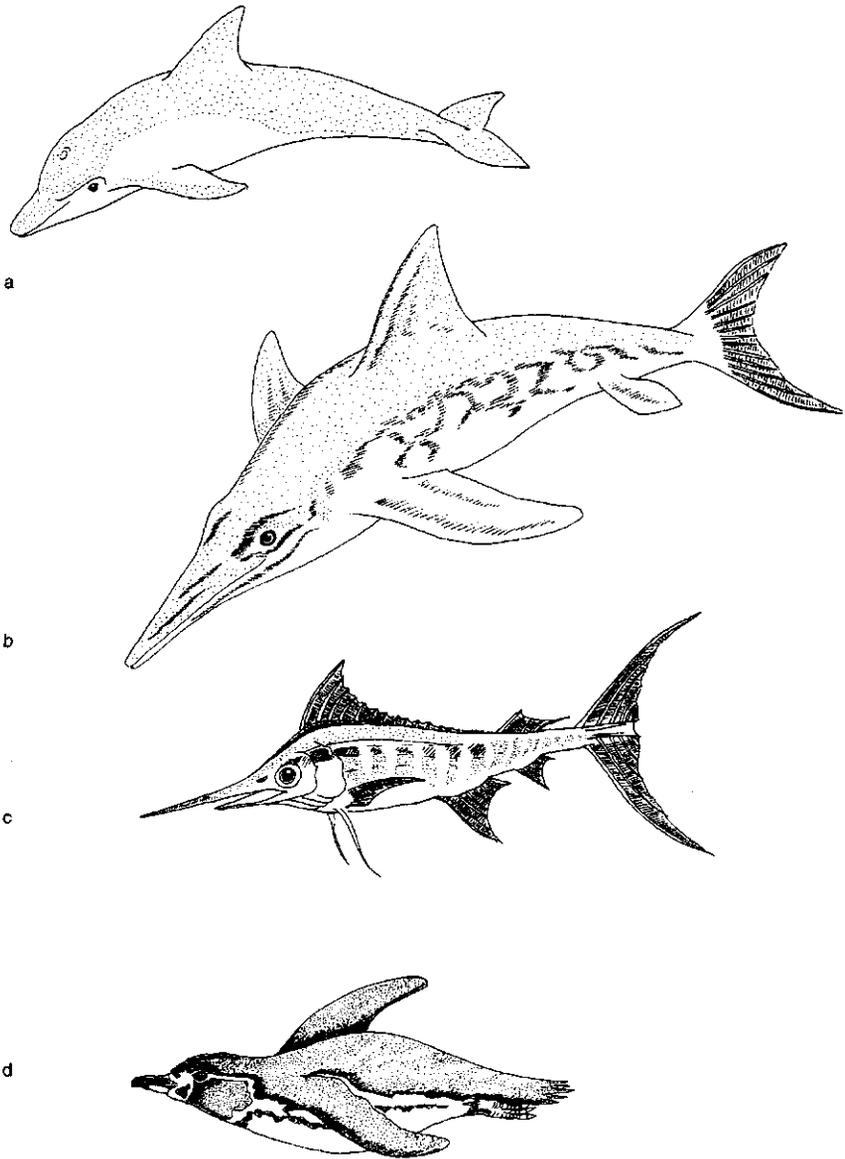


Figura 1.10. Evolución convergente: perfiles hidrodinámicos surgidos de forma independiente: a) Delfín mular, *Tursiops truncatus*; b) *Ichthyosaurus*, ictiosaurio; c) marlín azul o aguja de costa, *Makaira nigricans*; y d) pájaro bobo de las Galápagos, *Spheniscus mendiculus*.

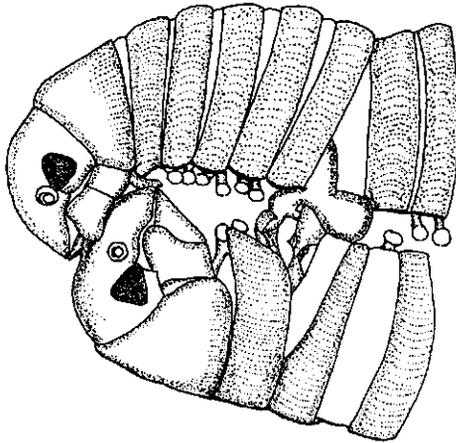


Figura 1.11. Milpiés, *Cylindroiulus punctatus*, copulando en la posición del misionero.

cas femeninas (figura 1.12a). Como ocurre con el perfil rocoso de Kennedy, la razón para creer que estos parecidos son pura coincidencia es estadística. El corazón sangrante de la paloma viene a ser sólo una cuchillada de plumas rojas. En cuanto al «mimetismo» aparente del *coco-de-mer*, hay que reconocer que no deja de causar impresión, pues implica más de un rasgo; incluso tiene un remedo de vello púbico. Pero el cerebro humano trabaja activamente en busca de semejanzas morfológicas, en especial con aquellas partes de nuestro cuerpo que encontramos particularmente interesantes. Sospecho que esto es lo que hay detrás de nuestra percepción del *coco-de-mer*, o de nuestro reconocimiento del perfil de Kennedy en la ladera rocosa.

Lo mismo puede decirse de la calavera o mariposa de la muerte (figura 1.12b). En realidad, nuestro cerebro tiene un afán casi indecente por ver caras, lo que constituye la base de una de las ilusiones más sorprendentes descritas por los psicólogos. Si uno coge una máscara ordinaria de las que se venden en las tiendas de disfraces y la sostiene verticalmente con la cara interna mirando a otra persona (sobre un fondo que haga conspicuos los agujeros de los ojos) es probable que el observador la perciba como una cara maciza. Esto tiene una consecuencia de lo más curiosa, que uno puede descubrir haciendo girar lentamente la máscara de un lado a otro. Recuérdese que el cerebro del observador «piensa» que se trata de una cara maciza, pero en realidad el objeto es

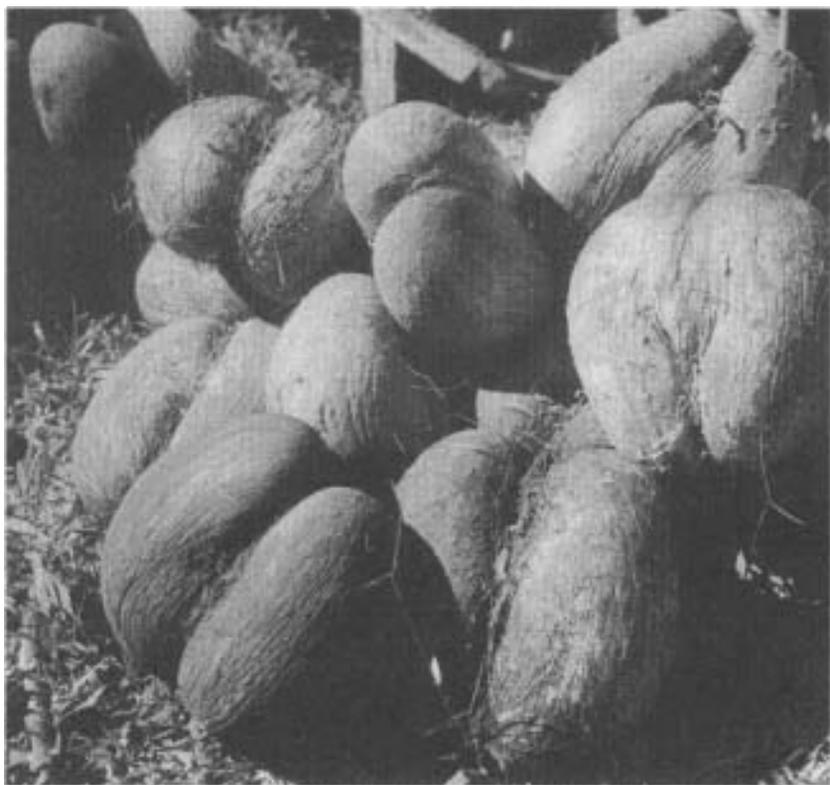


Figura 1.12 (página opuesta). Semejanzas accidentales en la naturaleza: a) *coco-de-mer* (coco de Seychelles) y b) calavera o mariposa de la muerte, *Acherontia átropos*.

una máscara hueca. Cuando la máscara se hace girar hacia la derecha, la única manera de reconciliar la información de los ojos con la pre-sunción del cerebro es suponer que está girando en la dirección opuesta. Esto es exactamente lo que percibe el observador: se produce la ilusión de que la cara está girando en sentido opuesto al de la rotación real.

Así pues, parece bastante probable que el parecido del dibujo de la mariposa de la muerte con una calavera sea puramente accidental. Debo añadir, sin embargo, que Robert Trivers (uno de nuestros teóricos de la evolución más respetados, ahora en la Universidad de Rutgers, Nueva Jersey) cree que las manchas que semejan caras en el dorso de los insectos podrían ser una adaptación para asustar depreda-



dores potenciales como las aves (en el dibujo del dorso de la polilla tendemos a ver una calavera humana, pero también podría ser la cara de un mono). Puede que tenga razón, en cuyo caso yo debiera haberle colocado a este insecto mi etiqueta de «diseñoide». Lo mismo puede aplicarse, por una razón distinta, a otro aparente mimeta de caras, el cangrejo samurai japonés. Este cangrejo muestra en el dorso la imagen (debo decir que no especialmente impresionante) de los feroces rasgos de un guerrero samurai.* Se ha sugerido que, durante siglos, los pescadores japoneses, inducidos por el afán natural del cerebro humano por ver caras, han advertido un cierto parecido con una cara en el dorso de algunos cangrejos de esta especie. Por razones de superstición o respeto, los pescadores no querían matar aquellos cangrejos que ostentaban una cara vagamente humana (y menos una cara de guerrero samurai), de manera que los devolvían al mar. Según esta teoría, muchas vidas de cangrejos se salvaron gracias a la cara humanoide de su dorso, y

* Es una opinión discutible; Cari Sagan mostró estos cangrejos en su serie televisiva *Cosmos* y en el libro del mismo título, y en muchos ejemplares el parecido del caparazón con una cara de samurai es absolutamente asombroso. (*N. del T.*)

los cangrejos con los rasgos humanos más pronunciados de cada generación contribuyeron con una fracción desproporcionada de descendientes a la generación siguiente. De esta forma las generaciones posteriores figuraban «en cabeza», es decir tenían una ventaja inicial sobre las precedentes, y la semejanza fue aumentando gradualmente.

Cuando discutíamos la manera de adquirir un cuchillo de piedra por el simple expediente de encontrarlo, acordamos que uno puede «fabricar» un cuchillo afilado a través del examen de todas las piedras del mundo y el descarte de las obtusas (que serían la gran mayoría). Si uno busca en un número suficientemente elevado de pedregales y canteras seguramente acabará por encontrar una piedra que tenga no sólo una hoja aguzada, sino un mango conveniente. Decir que la industria farmacéutica trabaja examinando un gran número de moléculas generadas al azar y comprobando después la eficacia de una minoría prometedora no deja de ser una hipersimplificación parcial, pero habíamos convenido en que *encontrar*, como medio para obtener un utensilio funcional, era algo absolutamente ineficiente. Es mucho mejor tomar un material adecuado como la piedra o el acero y pulirlo o esculpirlo con un designio en mente. Pero no es así como se construyen los objetos diseñoides (es decir, seres vivos que parecen obedecer a un designio ilusorio). Los seres vivos son en última instancia el resultado de un proceso más parecido al puro «encontrar», pero diferente de aquél en un aspecto muy significativo.

Quizá parezca un tanto excéntrico por mi parte el pararme a considerar una piedra, pero vamos a ver hasta dónde nos lleva esto. Una piedra no tiene hijos. Si las piedras tuvieran hijos iguales a ellas, éstos heredarían de sus progenitores el atributo de tener hijos, lo cual implica nietos y biznietos durante un número indeterminado de generaciones. Se podría pensar que esto no es más que una especulación forzada y, en cualquier caso, ¿qué importa? Para contestar a esto, veamos algo cuya filiosidad pueda ser igualmente accidental, pero que deje descendientes.

Las hojas duras y acintadas de algunos carrizos y cañas poseen bordes bastante afilados. Probablemente este filo no es más que un subproducto accidental de otras propiedades de la hoja. Uno puede cortarse con una hoja de carrizo, lo cual es suficiente para tener cuidado pero no para provocar sospechas de designio. Sin duda hay hojas más

afiladas que otras, y uno podría recorrer la ribera de un estanque en busca de la hoja de carrizo más afilada que pudiera encontrar. Aquí es donde nos separamos de las piedras. No nos limitemos a cortar con nuestro cuchillo de caña, *reproduzcámoslo*, o hagamos que lo reproduzca la misma planta de la que fue arrancado. Hagamos que las plantas más cortantes se interpolinicen, eliminemos las plantas sin filo: no importa cómo lo hagamos, mientras consigamos que la plantas más filosas sean responsables de la mayor parte de la reproducción. No de una vez, sino # generación en generación. Con el paso de las generaciones advertiremos que, aunque siga habiendo cañas filosas y cañas sin filo, la caña promedio se habrá ido haciendo cada vez más cortante. Pasadas 100 generaciones, es probable que hayamos conseguido criar algo que nos permita un afeitado decente. Si hubiéramos perseguido la rigidez junto con la filiosidad, podríamos acabar degollándonos con una caña rota por un descuido.

En cierto sentido, no habremos hecho otra cosa que *encontrar* la cualidad buscada: no es necesario tallar, rebajar, moldear ni afilar, basta con seleccionar lo mejor de lo que ya está presente. Hemos buscado las hojas filosas y desestimado las romas. Es como encontrar pedernales cortantes, pero con una adición significativa: el proceso es acumulativo. Las piedras no se reproducen, pero las hojas (o, mejor dicho, las plantas que producen hojas) sí. Una vez hemos encontrado la mejor hoja de una generación, no nos limitamos a usarla hasta que se haya desgastado, sino que aseguramos nuestra obtención produciendo más hojas como ella, transmitiendo su virtud para poder contar con ella en el futuro. Este proceso es acumulativo y no termina nunca. Uno sigue encontrando y encontrando, pero, dado que la genética permite una ganancia acumulativa, el mejor ejemplar que podamos encontrar en una generación posterior será mejor que el mejor de cualquier generación precedente. Esto, como veremos en el capítulo 3, es lo que significa «escalar el monte Improbable».

El carrizo cuyas hojas se hacen cada vez más afiladas no es más que una invención ilustrativa. Existen, por supuesto, ejemplos reales del mismo principio en plena acción. Todas las plantas de la figura 1.13 derivan de la col silvestre, *Brassica oleracea*. Esta es una planta bastante humilde que se parece más bien poco a un repollo. Los seres humanos han tomado esta variedad silvestre y, en apenas unos cuantos

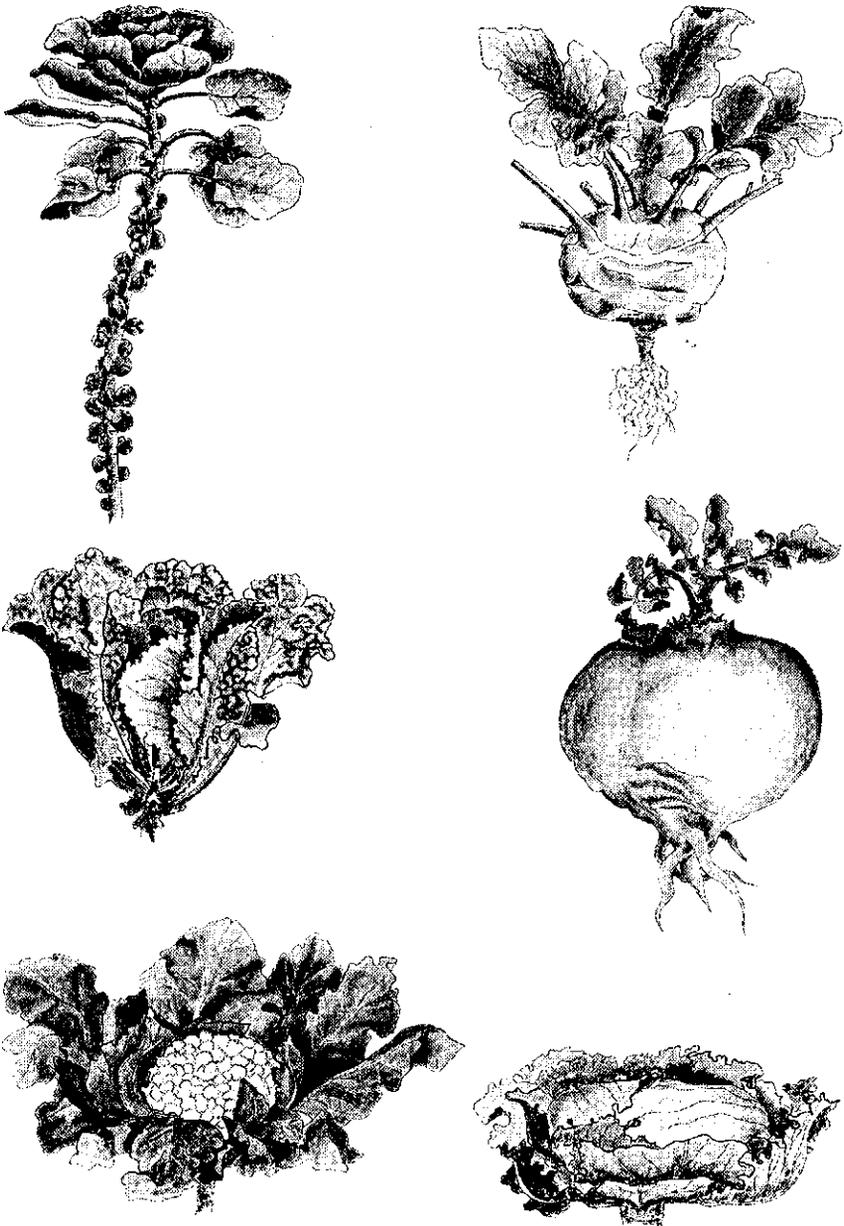


Figura 1.13. Todas estas hortalizas han sido producidas a partir del mismo antepasado, la col silvestre, *Brassica oleracea*. En el sentido de las agujas del reloj, empezando por la parte superior izquierda: coles de Bruselas, colirrábano, colinabo o nabo de Suecia, col de tambor, coliflor y coles de Saboya o rizadas.

siglos, la han modelado en todas estas variedades tan distintas de plantas comestibles. Con los perros ha ocurrido algo parecido (figura 1.14).

Aunque ciertamente se dan híbridos entre perros y chacales y entre perros y coyotes, la mayoría de autoridades en la materia acepta hoy que todas las razas de perros domésticos descienden de un antepasado lobuno (arriba, a la izquierda) que vivió hará unos cuantos miles de años. Es como si hubiéramos tomado carne de lobo y la hubiéramos modelado como una pieza de alfarería. Ahora bien, es obvio que no hemos amasado ni moldeado literalmente la carne de lobo hasta darle la forma, por ejemplo, de un galgo o un tejonero. Hemos obtenido estas razas mediante hallazgo acumulativo o, dicho de forma más convencional, cría selectiva o selección artificial. Los criadores de galgos *encontraron* individuos con más aspecto de galgo que el promedio. Los cruzaron entre sí y después seleccionaron los individuos con más aspecto de galgo de la siguiente generación, y así sucesivamente. Como es natural, esto no pudo ser tan meridianamente simple, pues los criadores no tenían en la cabeza el concepto del galgo moderno como objetivo a largo plazo. Puede que simplemente les agradasen los rasgos físicos que ahora reconocemos como propios de un galgo, o quizá éstos rasgos visibles fueran sólo un subproducto de la selección de alguna otra cualidad, como la eficacia en la caza de conejos. Pero galgos y tejoneras, grandes daneses y bulldogs, fueron producidos por un proceso más parecido al hallazgo que al modelado. Aún así, conviene diferenciarlo del hallazgo simple, porque es generacionalmente acumulativo. Por eso lo denomino *hallazgo acumulativo*.

Los objetos accidentales simplemente se encuentran. Los objetos diseñados no son hallazgos en absoluto: son modelados, moldeados, amasados, montados, articulados, tallados, para que el objeto individual adopte una forma determinada. Los objetos diseñados se encuentran de manera acumulativa, bien por parte de los seres humanos en el caso de los perros domésticos y las coles cultivadas, bien por parte de la naturaleza en el caso de, por ejemplo, los tiburones. El hecho de la herencia asegura que las mejoras *accidentales* que son *encontradas* en cada generación se acumulen a lo largo de las generaciones. Al cabo de muchas generaciones de hallazgos acumulativos se produce un objeto diseñoide que puede dejarnos boquiabiertos por la perfección de su diseño. Pero este diseño es sólo aparente, porque no obedece a un

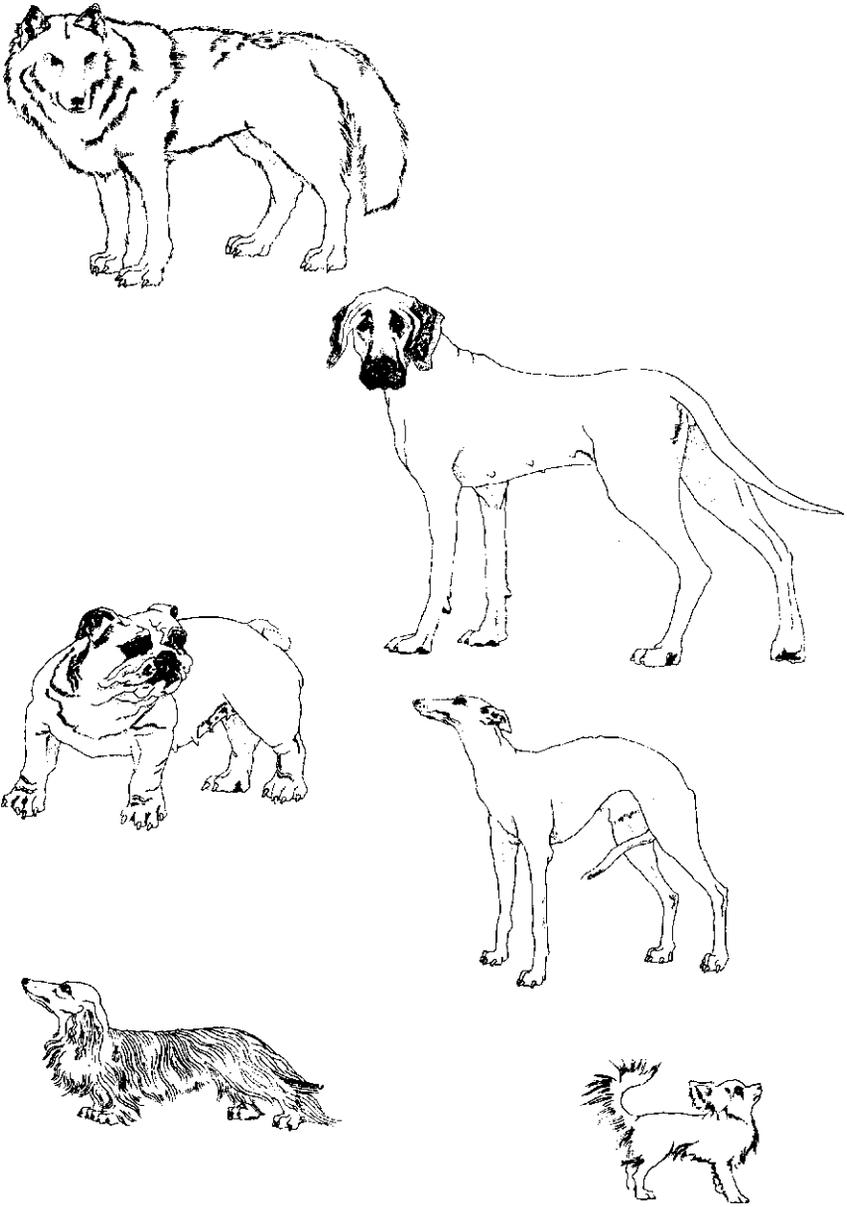


Figura 1.14. La capacidad de la selección artificial para modelar animales. Todos estos perros domésticos han sido criados por el hombre a partir del mismo antepasado salvaje, un lobo (arriba): gran danés, bulldog inglés, galgo, tejonero de pelo largo y chihuahua de pelo largo.

designio, sino que se ha llegado a él a través de un proceso completamente distinto.

Sería interesante poder demostrar este proceso siempre que quisiéramos. Los tiempos de generación de los perros son algo menores que el de nuestra especie pero, aun así, forzar en alguna medida apreciable la evolución de los perros lleva bastante más tiempo del que dura una vida humana. Los seres humanos han obtenido chihuahuas en aproximadamente la diezmilésima parte del tiempo que le llevó a la naturaleza obtener lobos a partir de sus antepasados insectívoros, que tenían el tamaño (pero no la forma) de un chihuahua y vivieron en la época en la que se extinguieron los dinosaurios. Aun así, la selección artificial de organismos reales (al menos de organismos mayores que las bacterias) es demasiado lenta para ofrecer una demostración capaz de impresionar a criaturas impacientes y de vida corta como nosotros. Se puede acelerar mucho el proceso con un ordenador. Los ordenadores, sean cuales sean sus defectos, son sumamente rápidos y pueden simular cualquier cosa que pueda definirse de manera precisa, lo que incluye procesos reproductivos como los de animales y plantas. Si uno simula la herencia, la condición más básica de la vida, y permite que se produzcan mutaciones aleatorias ocasionales, es verdaderamente sorprendente lo que puede evolucionar ante nuestros ojos en unos cuantos cientos de generaciones de cría selectiva. Exploré este enfoque en mi libro *El relojero ciego*, utilizando un programa informático del mismo nombre. Con este programa se pueden generar, por selección artificial, criaturas que denominaré «biomorfos informáticos».

Los biomorfos informáticos se obtienen todos a partir de un antepasado común con este aspecto: de forma muy parecida a la generación de todas las razas de perros a partir de un lobo. En la pantalla del ordenador se generaban progenies con «mutaciones genéticas» aleatorias, y una persona elegía un miembro de cada progenie para reproducirlo. Esto requiere una explicación. En primer lugar, ¿qué significa hablar de «progenie», de «genes» y de «mutaciones» en el caso de estos objetos informáticos? Todos los biomorfos comparten la misma «embriología»: se construyen básicamente como un árbol ramificado, o como una serie fragmentaria de árboles unidos. Los detalles del árbol o árboles (como el número de ramas y los ángulos y longitudes de éstas) son controlados por «genes», que no son otra cosa que núme-

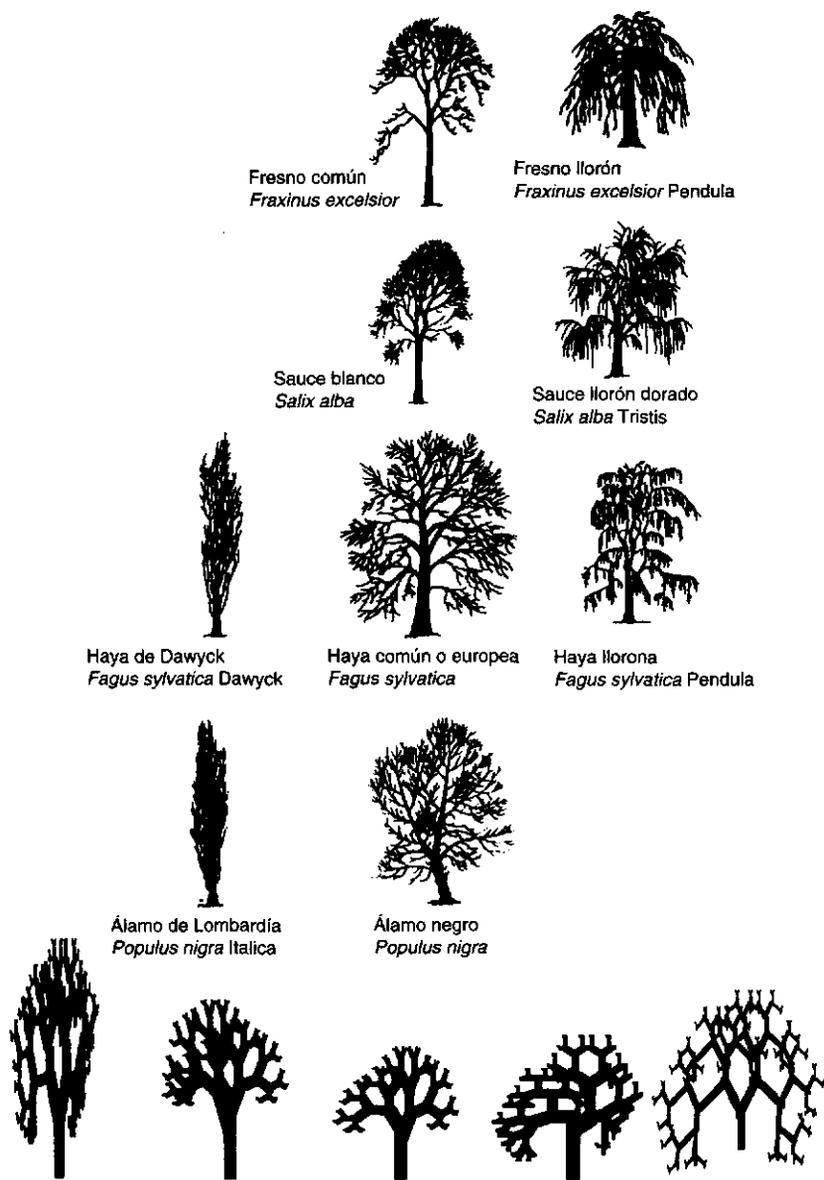
ros en el ordenador. Los genes de los árboles reales, al igual que los nuestros y los de las bacterias, son mensajes codificados escritos en el lenguaje del DNA. El DNA es copiado de generación en generación con gran fidelidad, aunque no absoluta. En cada generación, el DNA es «leído» y ejerce su influencia sobre la forma del animal o la planta. La figura 1.15 muestra que, tanto en árboles reales como en biomorfos generados por ordenador, la modificación de tan sólo unos cuantos genes puede alterar la forma de toda la planta al alterar las reglas programadas de crecimiento. Los genes de los biomorfos no están formados por DNA, pero para nuestro propósito esta diferencia es trivial. El DNA es información codificada digitalmente, exactamente igual que los números en un ordenador, y los «genes» numéricos son transmitidos a lo largo de las generaciones de biomorfos de manera muy parecida a como lo hace el DNA a través de las generaciones de plantas o animales.

Cuando un biomorfo tiene un hijo, éste hereda todos los genes de su progenitor (sólo uno, porque no hay sexo), pero con una cierta posibilidad de mutación aleatoria. Una mutación es un ligero aumento o reducción, al azar, en el valor numérico de un gen. Así pues, puede ser que un hijo tenga un ángulo de ramificación algo más agudo que su progenitor porque el valor numérico de su gen 6 haya aumentado de 20 a 21. Cuando está en el modo «reproducción de biomorfos», el ordenador dibuja un biomorfo en el centro de la pantalla rodeado por una progenie de descendientes mutados aleatoriamente. Puesto que sus genes han cambiado sólo ligeramente, los descendientes poseen siempre un parecido familiar con el progenitor y entre sí, pero suelen mostrar ligeras diferencias que el ojo humano puede detectar. El programa permite seleccionar uno de los numerosos biomorfos que aparecen en la pantalla para «reproducirlo». Todos los biomorfos desaparecen excepto el elegido, que se desliza hasta el lugar del progenitor, en el centro de la pantalla, y después «engendra» una nueva progenie de descendientes imitantes a su alrededor. A medida que se van sucediendo las generaciones, el seleccionador humano puede guiar la evolución de manera muy parecida a como los criadores guiaron en el pasado la evolución de los perros domésticos, pero con mucha más rapidez. Una de las cosas que me sorprendieron la primera vez que escribí el programa fue la velocidad con que pueden evolucionar los individuos apartándose de la

forma arbórea original. Descubrí que podía acabar en un «insecto», una «flor», un «murciélago», una «araña» o un «avión». Cada uno de los biomorfos de la figura 1.16 es el producto final de cientos de generaciones de cría mediante selección artificial. Puesto que estas criaturas se reproducen en un ordenador, uno puede hacer que pasen muchas generaciones en cuestión de minutos. Unos cuantos minutos jugando con este programa en un ordenador moderno y rápido le proporciona a uno una sensación vivida y de primera mano de cómo funciona la selección darwiniana. Los biomorfos del parque safari de la figura 1.16 me recuerdan avispas, mariposas, arañas, escorpiones, platelmintos, piojos y otras «criaturas» de aspecto vagamente biológico, aunque no se correspondan con especies *concretas* de este planeta. Pero todos son primos de los árboles entre los que se encuentran, y del escuadrón de «aviones» del ángulo superior derecho. De hecho, son primos muy cercanos. Todos tienen el mismo número de genes (dieciséis). Sólo difieren en los valores numéricamente codificados de dichos genes. Uno puede pasar de cualquier criatura del parque safari a cualquier otra, o a uno cualquiera de los billones de biomorfos posibles, simplemente mediante cría selectiva.

La versión más reciente del programa puede generar biomorfos que varían también de color. Se basa en el programa antiguo, pero tiene una «embriología» más complicada y nuevos genes que determinan el color de las ramas. También hay genes añadidos que determinan si cada rama del árbol es una línea, un rectángulo o un óvalo, si la forma referida está llena o vacía, y el grosor de las líneas. La figura 1.17 no acaba de transmitir lo llamativos que pueden ser estos biomorfos coloreados, porque por razones de composición se ha impreso en blanco y negro. Cuando ejecuto el programa de color me encuentro siguiendo callejones evolutivos que conducen no hasta insectos o escorpiones, sino hasta flores y formas abstractas que podrían quedar bien en el papel pintado o en los azulejos del baño.

Los biomorfos son «seleccionados artificialmente» por un agente humano. En este sentido son como repollos o perros con pedigrí. Pero no es éste el tema principal de este libro. Siguiendo al mismo Darwin, utilizo la selección artificial como modelo de un proceso diferente: la selección natural. Ha llegado por fin el momento de hablar de la selección natural propiamente dicha. La selección natural es igual que la ar-



«Árboles» biomorfos generados por ordenador que difieren entre si en apenas unos pocos genes

Figura 1.15. Árboles verdaderos y árboles biomorfos generados por ordenador, que muestran de qué manera las variedades de la misma especie pueden modificarse debido a cambios relativamente menores en las reglas de crecimiento. Varias especies de árboles tienen una variedad llorona y varias especies han convergido hacia una forma de Lombardía, rectilínea.

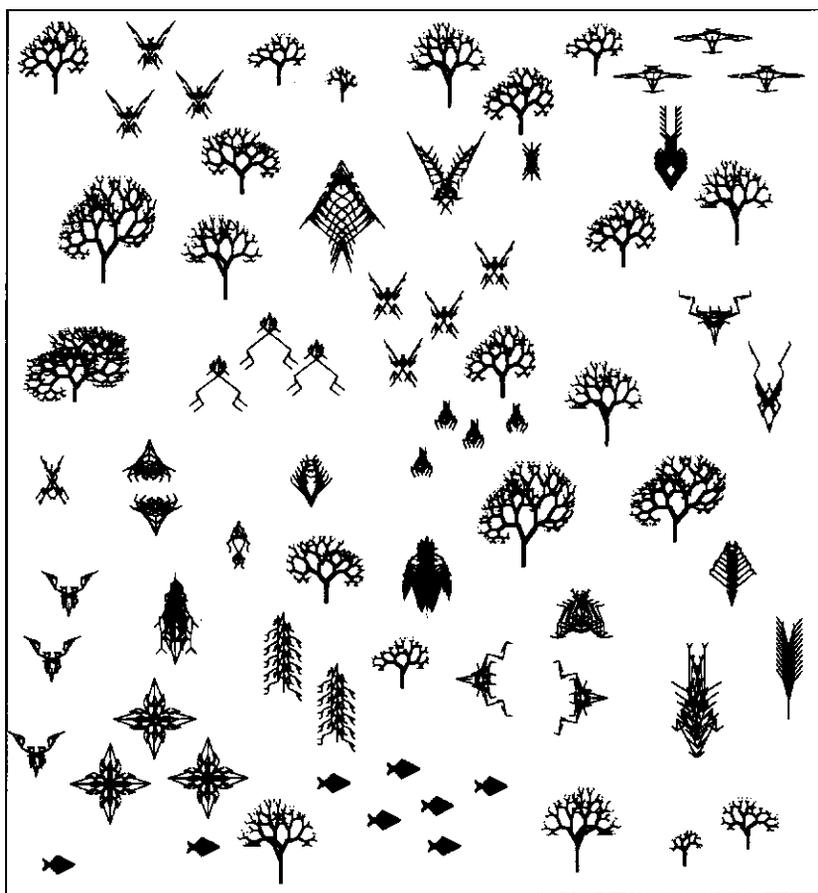


Figura 1.16. Parque safari de biomorfos en blanco y negro, generados mediante el programa de ordenador «Relojero ciego».

tificial, pero sin el agente humano. En lugar de una persona que decide qué descendiente morirá y cuál se reproducirá, es la naturaleza la que «decide». Las comillas son vitales, porque la naturaleza no decide de forma consciente. Es algo tan obvio que insistir en ello puede parecer superfluo, pero es sorprendente la cantidad de gente que sigue creyendo que la selección natural implica algún tipo de elección personal. No se puede estar más equivocado. Lo que pasa es que unos descendientes tienen lo que se necesita para sobrevivir y reproducirse y otros no, por lo que es más probable que mueran. El resultado es que, a me-



Figura 1.17. Parque safari de biomorfos generados mediante el programa de ordenador «Relojero de color», y que aquí aparecen en tonos de gris por razones de economía. Los grandes triángulos de fondo, negro y blanco, se añadieron por razones puramente decorativas.

dida que pasan las generaciones, el organismo promedio típico de la población se hace cada vez mejor en las artes de sobrevivir y reproducirse. Cada vez mejor, debo especificar, en relación a algún estándar absoluto. No necesariamente más efectivo en la práctica, porque la supervivencia está continuamente amenazada por otros organismos que también están evolucionando y perfeccionando sus artes. Una especie puede hacerse progresivamente mejor en el arte de eludir a los depredadores, pero al mismo tiempo los depredadores mejoran progresivamente en el arte de capturar presas, por lo que no necesariamente hay una ganancia neta. Este tipo de «carrera de armamentos evolutiva» es interesante, pero no nos adelantemos a los acontecimientos.

La selección artificial es relativamente fácil de conseguir en el ordenador, y los biomorfos son un buen ejemplo de ello. Mi sueño es simular también la selección natural. Lo ideal sería poder establecer las condiciones para que se den carreras de armamentos evolutivas en las que «depredadores» y «presas» surjan en la pantalla y se espoleen mutuamente en una evolución progresiva mientras nosotros observamos el proceso cómodamente sentados. Desafortunadamente, esto es muy difícil por la siguiente razón: he dicho que algunos descendientes tienen más probabilidades de morir, y parece que debería ser relativamente fácil simular una muerte no aleatoria; ahora bien, para constituir una buena simulación de una muerte natural, la defunción del organismo informático tiene que deberse a alguna imperfección interesante (como poseer patas cortas que le hagan correr más despacio que los depredadores). Los biomorfos, como las formas insectiformes de la figura 1.16, poseen a veces apéndices imaginables, como patas. Pero no utilizan esas «patas» para nada, y no tienen depredadores que les persigan. Tampoco tienen presas ni plantas que les sirvan de alimento. En su mundo no hay meteorología ni enfermedades. En teoría podemos simular estos factores, pero modelar cualquiera de ellos por separado apenas sería menos artificial que la propia selección artificial. Deberíamos hacer algo así como decidir arbitrariamente que los biomorfos largos y delgados pueden huir de los depredadores mejor que los cortos y gordos. No es difícil pedirle al ordenador que mida las dimensiones de los biomorfos y elija como reproductores a los más espigados. Pero la evolución que resultaría sería poco interesante: veríamos que los biomorfos se tornarían más esbeltos de generación en generación, lo cual

no se diferenciaría en nada de lo que conseguiríamos seleccionando artificialmente a ojo a los más esbeltos de cada generación. No poseería las cualidades emergentes de la selección natural, que una buena simulación tendría que poner de manifiesto.

La selección natural auténtica es mucho más sutil. En cierto sentido es también mucho más complicada, aunque en otro es profundamente simple. Hay que decir que la mejora a lo largo de cualquier dimensión, como puede ser la longitud de las patas, es una mejora dentro de unos límites. En la vida real una pata puede ser, efectivamente, demasiado larga. Las patas largas son más susceptibles de romperse y de enredarse en la maleza. Con un poco de ingenio, podríamos programar en el ordenador analogías tanto de la rotura como del enredo. Podríamos basarnos en una física de las fracturas: encontrar una forma de representar líneas de tensión, resistencias a la tracción, coeficientes de elasticidad... todo puede simularse si uno sabe cómo funciona. El problema está en todo aquello que desconocemos o pasamos por alto, lo que quiere decir casi todo. La longitud óptima de las patas depende de innumerables factores. Peor aún, la longitud es sólo uno de los innumerables aspectos de las patas de un animal que, de manera interactiva, influyen en su supervivencia. Están el grosor de la pata, su rigidez, su fragilidad, el peso que hay que desplazar, el número de articulaciones de la pata, el número de patas, su forma más o menos ahusada, etc. Y sólo hemos tomado en consideración las patas. Todas las partes del animal influyen de manera mutuamente interactiva en su probabilidad de supervivencia.

Siempre que pretendamos sumar todas las contribuciones teóricas a la supervivencia de un animal en un ordenador, el programador tendrá que tomar decisiones arbitrarias, humanas. Lo ideal sería simular una física y una ecología completas, con depredadores simulados, presas simuladas, plantas simuladas y parásitos simulados. Todas estas criaturas modelo deberían ser capaces de evolucionar a su vez. La manera más fácil de evitar las decisiones arbitrarias podría ser dejar de lado el ordenador y construir robots tridimensionales que se persiguieran unos a otros en un mundo tridimensional real. Pero entonces podría acabar siendo más barato olvidarse de ordenadores y robots y observar animales reales en el mundo real, ¡con lo cual volveríamos al punto de partida! Esta idea es menos frívola de lo que parece, y volveré a ella en

otro capítulo. Entretanto, hay alguna pequeña cosa que podemos hacer con un ordenador, pero sin biomorfos.

Uno de los hechos fundamentales que contribuyen a que los biomorfos sean tan poco proclives a la selección natural es que están contruidos a base de píxeles fluorescentes sobre una pantalla bidimensional. Este mundo bidimensional se presta poco a la física de la vida real. Magnitudes tales como la agudeza de los dientes de un depredador, o como la robustez de la armadura de una presa, o como la potencia muscular para deshacerse de un atacante, o como la virulencia de un veneno, no surgen de manera natural en un mundo de píxeles bidimensionales. ¿Podemos pensar en un caso real de, por ejemplo, una relación depredador-presa que se preste de manera natural, sin una artificiosidad forzada, a la simulación en una pantalla bidimensional? Por fortuna sí podemos. Ya he mencionado las telas de araña al hablar de las trampas diseñoides. Las arañas tienen un cuerpo tridimensional y viven en un mundo complejo de física normal, como la mayoría de animales. Pero existe un aspecto concreto de la forma de cazar de algunas arañas que se adapta de manera peculiar a la simulación en dos dimensiones. Una telaraña típica es, a todos los efectos y propósitos, una estructura bidimensional. Los insectos que captura se mueven en la tercera dimensión, pero a la hora de la verdad, cuando un insecto es capturado o escapa, toda la acción se desarrolla en un plano bidimensional, el plano de la telaraña. La telaraña es el mejor candidato que se me ocurre para una simulación interesante de la selección natural en una pantalla de ordenador bidimensional. El capítulo siguiente se consagra en gran parte a las telas de araña, empezando por la historia natural de las telarañas reales y pasando luego a los modelos informáticos y su evolución mediante selección «natural» en el ordenador.

Grilletes de seda



Una buena manera de ordenar nuestra comprensión de cualquier organismo vivo consiste en imaginar, con algo más que licencia poética, que este ser (o, si se prefiere, su hipotético «diseñador») se enfrenta a una cadena de problemas o tareas. Primero planteamos el problema inicial y después pensamos en soluciones posibles que tengan sentido. A continuación observamos lo que hacen realmente los organismos. Con frecuencia esto nos permite reparar en un nuevo problema al que se enfrentan los animales de dicha especie, y la cadena continúa. Esto es lo que hice en el segundo capítulo de *El relojero ciego* en relación a los murciélagos y sus complejas técnicas de ecolocación. Seguiré la misma estrategia en este capítulo. Una advertencia previa: no debe pensarse que la secuencia que parte de un problema y desemboca en otro se desarrolla a lo largo de la vida de un animal. Se trata en todo caso de una secuencia temporal a escala evolutiva, aunque a veces puede ser más una secuencia lógica que temporal.

Nuestra tarea fundamental consiste en encontrar un método eficiente para capturar insectos. Una posibilidad es la solución del vencejo: echarse a volar como las propias presas, surcando el aire a gran velocidad con la boca abierta y valiéndose de unos ojos penetrantes para apuntar con precisión. Este método funciona para vencejos y golondrinas, pero absorbe una costosa inversión en equipos de vuelo y maniobra a gran velocidad, así como un sistema de dirección de alta tecnología. Lo mismo cabe decir de la solución del murciélago, equivalente nocturno del vencejo, que utiliza ecos sonoros en lugar de rayos luminosos para guiar el misil.

Una solución completamente distinta es la de «sentarse y esperar». Las santateresas y los camaleones (tanto los verdaderos como ciertos lagartos que han evolucionado de manera independiente y convergente

hasta parecerse a ellos) sacan partido de esta solución al estar muy camuflados y moverse de manera angustiosamente lenta y furtiva hasta el golpe final, explosivo, que se realiza con los brazos o la lengua. El alcance de la lengua del camaleón le permite capturar una mosca situada en un radio comparable a la longitud de su propio cuerpo. El alcance de los brazos prensores de la santateresa es proporcionalmente del mismo orden de magnitud. Uno pensaría que este diseño podría mejorarse alargando aún más el radio de captura. Pero la construcción y mantenimiento de lenguas y brazos mucho más largos que la longitud del propio cuerpo tendría un coste prohibitivo: las moscas adicionales que pudieran capturarse no compensarían este coste extra. ¿Podemos idear una manera más barata de ampliar el «alcance» o radio de captura?

¿Por qué no construir una red? Las redes tienen que estar hechas de algún material que desde luego no será gratuito, pero, a diferencia de la lengua de un camaleón, el material de la red no tiene que moverse, de manera que no requiere un tejido muscular voluminoso. Puede hacerse tan fino como la más tenue de las gasas, y cubrir así un área mucho mayor a bajo coste. Si se toma la proteína que de otro modo se utilizaría en la construcción de unos brazos o una lengua musculados y se reprocesa en forma de seda, se ampliará enormemente el radio de acción. Nada impide que la red pueda ocupar una superficie 100 veces mayor que la del propio cuerpo sin dejar por ello de estar formada por secreciones glandulares comparativamente baratas.

La seda es un producto muy extendido entre los artrópodos (la mayor división del reino animal, a la que pertenecen tanto los insectos como las arañas). Las orugas rama se amarran a un árbol con una única hebra de dicho material. Las hormigas tejedoras cosen hojas utilizando la seda segregada por sus larvas, que sostienen entre las mandíbulas como lanzaderas vivientes (figura 2.1). Muchas orugas se envuelven en un capullo de seda antes de metamorfosearse en un adulto alado. Las orugas acampadoras cubren su árbol con gasa. Para formar su capullo, un solo gusano de seda [larva de la mariposa nocturna *Bombyx mori*] hila alrededor de kilómetro y medio de ese material. Pero, por mucho que nuestra industria sedera se base en estos gusanos, las más grandes productoras de seda del reino animal son las arañas, y sorprende que la seda de estos animales no sea más utilizada por la humanidad (uno de

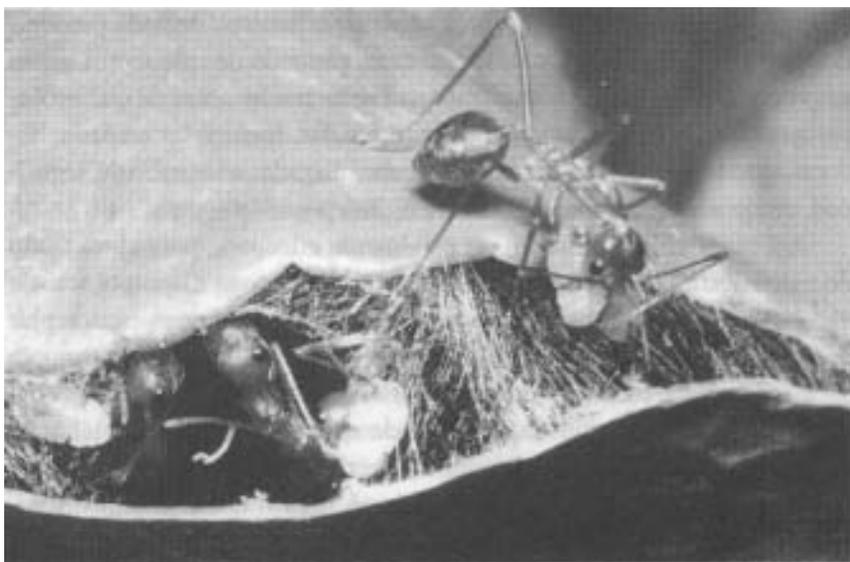


Figura 2.1. Obreras con seda. Hormigas tejedoras o costureras que utilizan larvas como lanzaderas vivientes, *Oecophylla smaragdina*, de Australia.

sus escasos usos es la elaboración de retículas de precisión para microscopios). En su hermoso libro *Self-Made Man*, el zoólogo y artista Jonathan Kingdon especula con la idea de que la seda de araña pudo haber inspirado a los niños humanos el invento de una de las piezas más vitales de la tecnología, el cordel. También las aves reconocen las buenas cualidades de la seda de araña como material: se conocen 165 especies que incorporan seda de araña al tejido de sus nidos (pertenecientes a veintitrés familias distintas, lo que sugiere que el descubrimiento se ha hecho muchas veces de forma independiente). Una araña tejedora típica, la araña de jardín o de la cruz (*Araneus diadematus*)

* Voy a utilizar nombres latinos, y espero que se me perdonará un pie de página pedagógico sobre las convenciones que los rigen, porque un número sorprendentemente alto de personas cultas (quizá las mismas que dan un respingo cuando se refieren a la obra maestra de Darwin como *El origen de las especies*) los escriben mal. Los nombres latinos de los organismos tienen dos partes: un nombre genérico (p. ej. *Homo*) seguido de un nombre específico (p. ej. *sapiens*, la única especie sobreviviente del género *Homo*), y ambos se escriben en cursiva o subrayados. Los nombres de unidades taxonómicas mayores no se escriben en cursiva. El género *Homo* pertenece a la familia Homínidos. Los nombres genéricos son únicos; sólo existe un género *Homo* y sólo un género *Vespa*. Las especies comparten a veces el nombre con especies de otros géneros, pero no hay confusión debido a la singularidad del nombre genérico: *Vespa vulgaris*, una avispa, no corre peligro de ser confundida con *Octopus vulgaris*, un

segrega por sus espitas posteriores seis tipos distintos de seda producidos por glándulas abdominales separadas, pasando de uno a otro según su propósito. Las arañas ya utilizaban la seda mucho antes de que evolucionara en ellas la habilidad para tejer telarañas. Incluso las arañas saltadoras, que nunca tejen redes, saltan al vacío ligadas a un cabo de seguridad, como alpinistas encordados a la última posición segura.

Así pues, el hilo de seda, especialmente adecuado para el trenzado de redes destinadas a la captura de insectos, ha estado disponible desde antiguo en la caja de herramientas de las arañas. Podemos contemplar la red como una forma de estar en muchos sitios a la vez. A su propia escala, la araña es como una golondrina con una boca de ballena, o como un camaleón con una lengua de quince metros. Una telaraña es un dispositivo de una economía soberbia. Mientras que la lengua musculosa de un camaleón supone a buen seguro una fracción sustancial de su peso corporal total, el peso total de la seda de una telaraña (hasta veinte metros de hebras en una telaraña grande) no llega a la milésima parte del peso del cuerpo de la araña. Es más, la araña recicla la seda usada comiéndosela, de manera que se malgasta muy poca. Sin embargo, la tecnología de la red plantea problemas propios.

Un problema no trivial para una araña tejedora es el asegurar que la presa, tras precipitarse en la telaraña, quede pegada a ella. Hay dos peligros. De entrada, el insecto podría muy bien rasgar la telaraña y atravesarla. Este problema podría resolverse haciendo que la seda sea muy elástica, pero esto agravaría el segundo de los dos peligros: el insecto rebotaría entonces en la telaraña como si de un trampolín se tratara. La seda ideal, la fibra de los sueños de un investigador químico, debería poder estirarse mucho para absorber el impacto de un insecto en vuelo rápido, pero al mismo tiempo, y para evitar el efecto trampolín, debería amortiguar suavemente el retroceso. Al menos algunos tipos de seda de araña tienen precisamente estas propiedades, gracias a la estructura notablemente compleja de la propia seda, dilucidada por el profesor Fritz Vollrath y sus colegas de Oxford (ahora en Aarhus, Dinamarca). La seda que aparece ampliada en las figuras 2.2 y 2.3 es

pulpo. El nombre genérico se escribe siempre con mayúscula y el nombre específico nunca (antiguamente se aceptaba la mayúscula inicial cuando derivaba de un nombre propio, hoy día incluso *Darwinii* se escribe *darwinii*). Si el lector ve alguna vez escrito *Homo Sapiens* u *homo sapiens* (y lo verá con cierta frecuencia), sepa que son graffas incorrectas. (*N. del A.*)

en realidad mucho más larga de lo que parece, porque la mayor parte de su longitud está arrollada en el interior de cuentas acuosas. Es como un collar cuyas cuentas contuviesen hilo sobrante enrollado. El arrollamiento se consigue mediante un mecanismo no del todo conocido, pero el resultado es indudable. Los hilos de la telaraña pueden estirarse hasta diez veces su longitud de reposo, y vuelven a encogerse lo bastante despacio para que la presa no salga rebotada de la red.

La siguiente propiedad que requiere la seda para no dejar escapar la presa es pegajosidad. La sustancia que reviste la seda en el sistema de arrollamiento que acabamos de describir es, además de acuosa, pegajosa. Un solo contacto y el insecto queda adherido. Pero no todas las arañas consiguen la consistencia pegajosa de la misma manera. Un grupo distinto, el de las arañas cribeladas, produce una seda de filamentos múltiples emanada de una espita especial denominada críbelo. La araña peina las hebras con un peine especial incorporado en sus patas. La seda «rastrillada» de esta manera se ahueca en una maraña de hebras (figura 2.4). Esta maraña no es visible a simple vista, pero es ideal para enganchar las patas del insecto atrapado. Los hilos «cribelados» funcionan tan bien como las hebras glutinosas antes descritas; simplemente obtienen su adherencia de otra manera. En un aspecto, las arañas cribeladas tienen una ventaja, y es que sus hilos conservan su adherencia durante más tiempo. Las arañas que usan material viscoso deben reconstruir su tela cada mañana. Es verdad que esto no suele requerir más de una hora (un tiempo casi increíblemente corto), pero cada minuto cuenta para la selección natural.

Ahora bien, los filamentos pegajosos plantean un nuevo (e irónico) problema. Unos hilos lo bastante pegajosos para atrapar un insecto constituyen también una trampa para la propia araña. Las arañas no poseen una inmunidad mágica, pero la tecnología evolutiva ha dado con una mezcla de soluciones parciales a este riesgo de «gol en propia puerta». Las patas de las arañas que emplean pegamento están impregnadas de un aceite especial que proporciona cierta protección. Esto se ha demostrado sumergiendo las patas de la araña en éter, que elimina el escudo oleoso y con él la protección. Una segunda solución parcial adoptada por las arañas es que algunas de las hebras no sean pegajosas, en concreto los radios principales que irradian del centro de la telaraña. La araña se desplaza sólo sobre estos radios, para lo cual se vale de

unos pies modificados que terminan en pequeñas garras, y evita la espiral pegajosa arrollada sobre el andamiaje constituido por los radios. Esto es facilitado en cualquier caso por el hecho de que la araña acostumbra a pararse y esperar en el centro de la tela, de modo que los radios constituyen el camino más corto hacia cualquier punto de la red. (Las arañas macho también tejen telarañas. Para una explicación de mi lenguaje sexista, véase la página 59.)

Fijémonos ahora en la serie de problemas que plantea para una araña la construcción efectiva de su tela. No todas las arañas son iguales y, en lo relevante, tomaré como ejemplo la familiar araña de jardín *Araneus diadematus*. Nuestro primer problema (el de la araña, mejor dicho) es cómo tender el primer filamento a través de la abertura en donde se va a ubicar la telaraña, digamos entre un árbol y una roca. Una vez salvada la distancia mediante este primer filamento vital, la araña puede utilizarlo como puente. ¿Pero cómo construir este primer puente? La solución pedestre sería bajar caminando, fijar el extremo de un hilo y luego volver a subir todo el camino arrastrando el hilo. Así actúan algunas arañas, pero otras han encontrado soluciones más imaginativas. Echemos a volar una cometa. ¿No podríamos explotar de alguna manera las propiedades aéreas y ligeras de la propia seda? Sí. He aquí cómo lo hace una araña: si hay viento suficiente, suelta un único filamento terminado en una pequeña vela o cometa plana de seda. La cometa es pegajosa y, si aterriza sobre una superficie firme al otro lado de la abertura, queda adherida. Si la cometa no se fija la araña la recupera, recicla la preciosa seda comiéndosela y vuelve a intentarlo con una nueva cometa. Una vez tendido un puente utilizable a través de la abertura, la araña asegura su propio extremo del filamento pegándolo al sustrato. Ahora el puente está listo para cruzarse.

Es improbable que este puente inicial esté tirante, porque la longitud del filamento será la que casualmente tenga: no estará hecho a la medida de un hueco concreto. La araña puede ahora acortarlo para convertirlo en uno de los flancos de la tela, o bien estirarlo en forma de V para convertirlo en dos de los radios principales de la red. Aquí el problema es que, aunque puede tirarse del filamento para formar la V, es improbable que éste sea lo bastante largo para dar lugar a dos radios de longitud respetable. La solución de la araña a este problema no es modificar el puente, sino utilizarlo como soporte mientras lo reem-

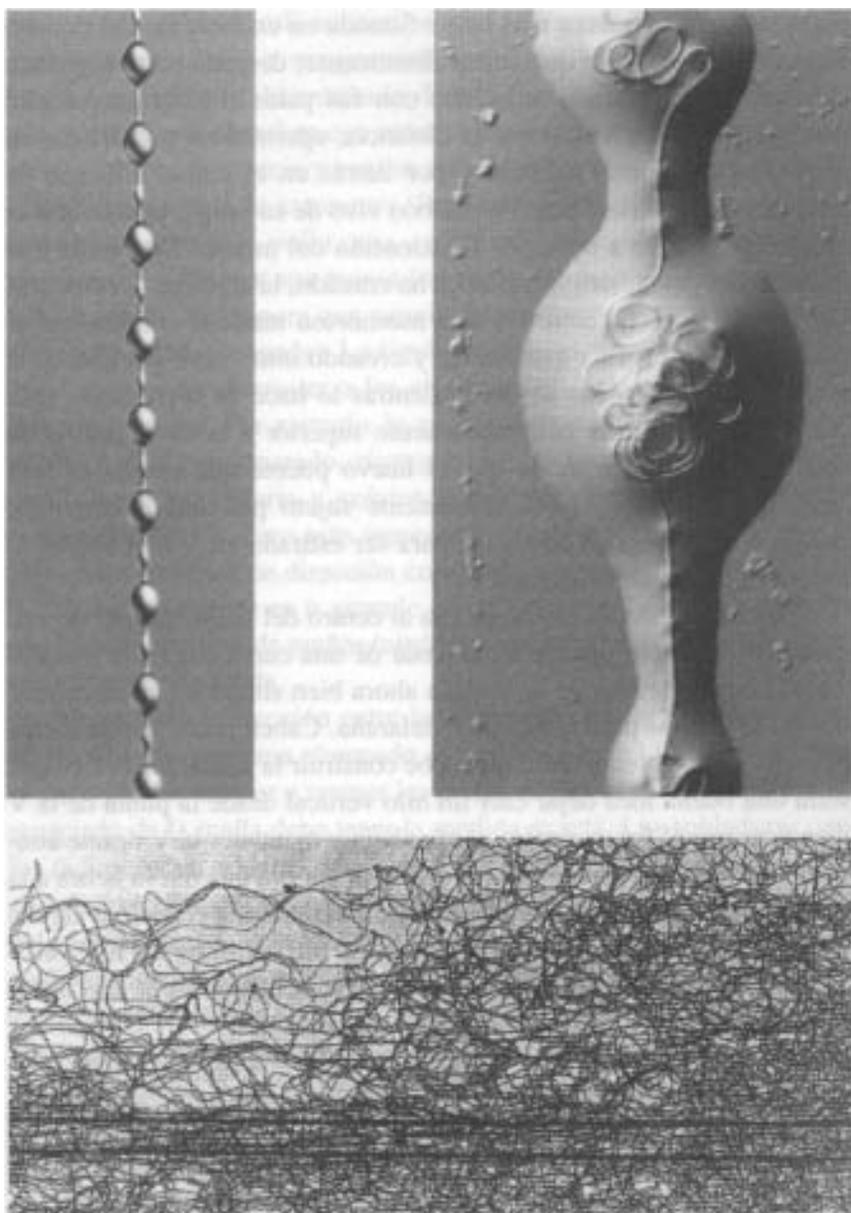


Figura 2.2. Minúsculas cuentas a lo largo de un filamento de seda de una telaraña.

Figura 2.3. Una cuenta ampliada para mostrar en su interior la hebra arrollada, que funciona como un «molinete».

Figura 2.4. Una forma alternativa de adquirir adherencia: la hebra rastrillada de una araña cribelada.

plaza por otro filamento más largo. Situada en un extremo del puente, segrega un nuevo hilo que sujeta firmemente; después corta el puente existente mordiéndolo y sujetando con sus patas el extremo cortado, tras lo cual vuelve a atravesar la distancia, agarrándose por delante en los restos del puente cortado y por detrás en el nuevo hilo que va arriando. La araña es como un eslabón vivo de su propio puente que se mueve lentamente a través de la extensión del mismo. En cuanto a la fracción del puente original que ya ha cruzado, la araña se la come una vez cumplida su función. De esta asombrosa manera, comiéndose el puente viejo a medida que avanza y creando uno nuevo por detrás, la araña cruza de un lado al otro. Mientras lo hace va segregando seda por detrás a una tasa controladamente superior a la de ingestión de seda por delante, de modo que el nuevo puente que resulta es más largo que el viejo. Ahora, firmemente sujeto por ambos extremos, cuelga con la longitud adecuada para ser estirado en V con objeto de formar el centro de la telaraña.

Para hacer esto, la araña retorna al centro del nuevo puente de manera que su propio peso lo haga pasar de una curva combada a una/V tensa. Los dos brazos de la V están ahora bien situados para constituir dos de los radios principales de la telaraña. Caben pocas dudas acerca de cuál es el siguiente radio que debe construir la araña. Está claro que sería una buena idea dejar caer un hilo vertical desde la punta de la V para asegurar el futuro centro desde abajo y mantener la V tirante aunque la araña ya no esté allí. Así pues, la araña fija una nueva hebra a la punta de la V y se deja caer como una plomada hasta el suelo o alguna otra superficie adecuada sobre la que fija el otro extremo del hilo vertical. Ahora los tres radios principales de la telaraña están adecuadamente emplazados formando una bien dibujada Y.

Las dos tareas siguientes son instalar los radios que faltan y el marco de la tela. La araña suele combinar ambas de manera ingeniosa, para lo cual emplea técnicas de una destreza asombrosa, como soldar hilos dobles y hasta triples que luego son separados a medida que el animal se desplaza por los radios previamente tendidos. En el borrador original de este capítulo yo explicaba con todo detalle cómo se ejecuta esta hechicería de cunita,* pero al final mi cabeza daba vueltas y acabó

* Juego de niños en el que se trenza un cordel con los dedos. (*N. del T.*)

enredándose. Uno de mis editores se quejó de que la lectura de este párrafo le daba mareos y me persuadió para que lo eliminara, cosa que hice a regañadientes. El resultado de esta fase de la construcción de la tela es una rueda completa con entre veinticinco y treinta radios (el número varía con la especie y con los individuos) que constituye el armazón básico de toda la estructura. Pero la telaraña sigue siendo en su mayor parte espacio vacío, una especie de rueda de bicicleta fácilmente atravesable por una mosca (en cualquier caso, los filamentos no son pegajosos, de manera que aunque la mosca chocara con alguno de ellos no quedaría atrapada). La siguiente tarea es tejer una tupida malla de filamentos transversales a los ejes radiales. Esto puede hacerse de diversas maneras. Por ejemplo, la araña puede rellenar cada sector entre dos radios por separado, zigzagueando de un lado a otro desde el centro hasta la periferia y volviendo después al centro para rellenar el siguiente hueco. Pero esto representa numerosos cambios de dirección, y los cambios de dirección consumen energía y tiempo. Una solución mejor consiste en ir girando en espiral sobre la tela, y esto es lo que hace la mayoría de arañas tejedoras, aunque ocasionalmente retornan al punto de partida.

Ahora bien, la elección entre la disposición en zigzag o en espiral no es el único problema planteado. La colocación del hilo viscoso que se encargará de atrapar y retener las presas es una tarea de precisión. El espaciado de la malla debe tener la medida exacta. Las soldaduras con los radios deben situarse de manera que la red no se deforme en una maraña irregular que deje agujeros a través de los cuales puedan escabullirse las presas. Si la araña se empeñara en conseguir este delicado posicionamiento a la vez que se mantiene en equilibrio sobre los radios, es probable que su propio peso los desalineara haciendo que el hilo espiral pegajoso se soldase en un lugar incorrecto o con una tensión inadecuada. Además, en la periferia de la telaraña el espacio entre radios suele ser demasiado grande para que las patas de la araña puedan abarcarlo. Ambos problemas pueden soslayarse construyendo la espiral de dentro a fuera. Cerca del centro los espacios son pequeños y los radios se refuerzan mutuamente, por lo que el peso de la araña apenas causa distorsiones. A medida que el movimiento en espiral aleja a la araña del centro, los espacios entre ejes se hacen necesariamente mayores, pero esto no es problema, porque los filamentos tendidos en

la vuelta previa de la espiral pueden ofrecer el soporte necesario entre los huecos que se amplían. El inconveniente de esto es que el filamento óptimo para cazar insectos es tan fino y elástico que no puede ofrecer este soporte durante el proceso de construcción. Aunque la telaraña acabada constituye una estructura robusta, estamos hablando de una telaraña incompleta, y por lo tanto débil.

Este es el principal problema que plantea la instalación de la fina espiral de captura, pero no es el único. Recuértese que, aunque los radios no son pegajosos y la araña puede agarrarse a ellos, ahora estamos hablando de la seda pegajosa específicamente diseñada para atrapar presas. Ya hemos visto que las arañas no son totalmente inmunes a la viscosidad de sus propias telarañas y, aunque lo fueran, utilizar cada vuelta de la espiral como puente para el tendido de la siguiente podría robarles algo de su precioso carácter pegajoso. Así, aunque pueda parecer una buena idea construir la espiral pegajosa de dentro a fuera apoyándose en las vueltas previas, esto puede ser, tanto en sentido metafórico como literal, una trampa.

La solución de la araña a todas estas dificultades se le podría haber ocurrido a un constructor humano: un andamiaje temporal. Efectivamente, la araña construye una espiral de dentro a fuera, pero no es la espiral tenue y pegajosa que actúa como trampa. Se trata de una espiral «auxiliar» que le servirá de apoyo para construir la espiral viscosa definitiva. Esta espiral auxiliar es algo más abierta y no es pegajosa. No serviría para capturar insectos. Pero es más robusta y, una vez endurecida, sostiene eficazmente la red confiriendo a la araña un salvoconducto entre radio y radio a la hora de construir la espiral pegajosa definitiva. La espiral auxiliar sólo da siete u ocho vueltas alrededor de la telaraña. Una vez emplazada ésta, la araña cierra sus glándulas de seda no pegajosa y descubre su artillería pesada: las espitas especializadas en segregar la mortífera seda adherente. Entonces vuelve sobre sus pasos, desplazándose de fuera a dentro en una espiral más cerrada y con un espaciamiento más uniforme. Utiliza la espiral auxiliar no sólo como andamiaje y soporte, sino también como referencia visual (o, mejor dicho, táctil), y a medida que se desplaza va cortándola tramo a tramo, después de que cada uno ha servido a su propósito. Cada vez que se cruza con un radio, suelda cuidadosamente sobre él la nueva espiral fina y pegajosa, a veces mediante una elegante juntura que re-

cuerda las del alambre de tela de gallinero o los nudos de una red de pesca. Dicho sea de paso, el andamiaje temporal no supone un derroche de seda, porque sus restos permanecen pegados a los radios, donde posteriormente serán comidos junto con el resto de la telaraña cuando la araña termine por dismantelarla. La seda auxiliar no es devorada de inmediato, presumiblemente porque desenganchar los fragmentos individuales de los radios supondría una pérdida innecesaria de tiempo.

Cuando la araña llega al final de su trayectoria espiral centrípeta, la tela está prácticamente terminada. Sólo quedan unos cuantos reajustes de tensión por hacer, una tarea de precisión y habilidad que recuerda la afinación de un instrumento de cuerda. Tras instalarse en el centro, la araña tira suavemente con sus patas para apreciar la tensión, realiza los leves estiramientos o acortamientos que estima convenientes y luego gira para repetir la maniobra desde otro ángulo. Algunas arañas tejen una complicada pieza de ganchillo alrededor del centro, que puede utilizarse para afinar la tensión de la telaraña.

La mención de los instrumentos de cuerda sugiere una digresión masculina. En este relato me he referido a las arañas como «ellas», no porque los machos no construyan telarañas (de hecho, hasta las arañas recién nacidas pueden construir telarañas diminutas), sino porque las hembras son más grandes y prominentes. El tamaño mayor de las hembras, junto con el hecho de que las arañas, sea cual sea su edad o sexo, tienden a devorar cualquier cosa que se mueva y sea más pequeña que ellas, plantea un serio problema a los machos. Las arañas sirven de alimento a escarabajos, hormigas, ciempiés, sapos, lagartos, musarañas y multitud de aves. Grupos enteros de avispas se han especializado en la captura de arañas para dar de comer a sus larvas. Pero es probable que los principales depredadores de las arañas sean otras arañas, y ni siquiera respetan las fronteras específicas. Cualquier araña que se aventure en la red de otra estará en peligro de muerte, pero éste es un riesgo que un macho debe correr si quiere cumplir con su obligación.

La solución adoptada por el macho varía de una especie a otra. En algunos casos envuelve una mosca en un paquete de seda y la ofrece a la hembra. Luego espera hasta que los colmillos de la hembra estén bien hundidos en la mosca antes de poner a trabajar su aparato sexual. Los machos que no ofrecen un paquetito con mosca se arriesgan a ser comidos. En otras ocasiones, sin embargo, los machos consiguen su

propósito ofreciendo un envoltorio vacío, o arrebatan la comida de las mandíbulas de la hembra y se fugan con ella después de aparearse, quizá para ofrecerla a otra hembra. En otras especies el macho saca partido del hecho de que, justo después de la muda y antes de que su nuevo caparazón se haya endurecido, una araña se encuentra relativamente indefensa; en diversas especies éste es el único momento en que los machos tienen oportunidad de copular, cuando la hembra se muestra mansa y complaciente, o al menos está desarmada.

Otras especies utilizan una técnica más curiosa, que explica mi comentario sobre los instrumentos de cuerda. Las arañas tejedoras viven en un mundo de sedosa tensión. Las hebras de seda son como patas o antenas inquisitivas, casi como ojos y oídos extra. El mundo es percibido a través de un lenguaje de atiesamientos y aflojamientos, estiramientos y relajaciones, sumas de tensiones cambiantes. La fibra sensible del corazón de la hembra está hecha de seda tirante y bien templada. Si un macho desea cortejarla y evitar (o al menos posponer) ser comido, hará bien en pulsarla. El propio Orfeo no tenía mejor causa. En algunos casos el macho se coloca en un margen de la telaraña de la hembra y puntea la tela como si tocara el arpa (figura 2.5). Este tañido rítmico nunca puede proceder de un insecto presa, y parece apaciguar a la hembra. En algunas especies el macho guarda las distancias fijando por su cuenta un «filamento de cópula» especial a la telaraña de la hembra, y pulsa este hilo especial como haría un *jazzman* con un bajo de caja de té de una sola cuerda. Las vibraciones se transmiten a lo largo del filamento de cópula y resuenan por toda la telaraña de la hembra suprimiendo, o al menos retardando, su habitual instinto depredador y atrayéndola hasta el origen de la pulsación a través del filamento de cópula, donde tiene lugar el apareamiento. El final de la historia no siempre es feliz para el cuerpo mortal del macho, pero para entonces sus genes inmortales ya están viajando como polizones en el interior de la hembra. El mundo está lleno de arañas cuyos antepasados masculinos murieron después de aparearse, pero está privado de arañas cuyos antepasados potenciales no consiguieron aparearse en primera instancia.

Antes de dejar esta discusión sobre sexo y seda contaré otro relato, y después cada cual puede pensar lo que quiera. Hay especies de arañas en las que el macho amarra con seda a la hembra, estilo Gulliver,

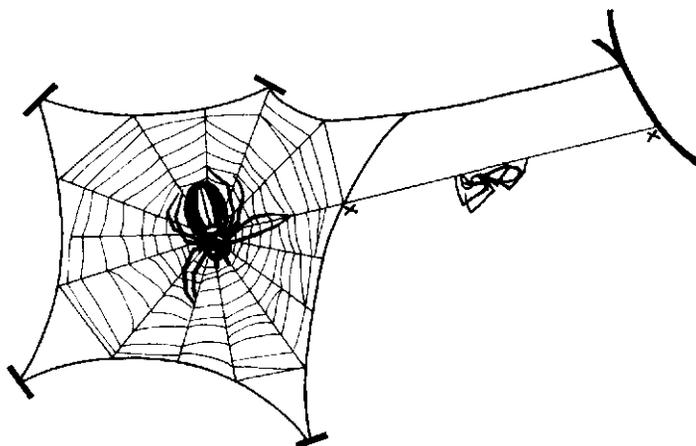


Figura 2.5. Discreción: araña macho con un filamento de apareamiento fijado a la telaraña de la hembra.

antes de aparearse con ella (figura 2.6). Uno pensaría que el macho está aprovechándose del eclipsamiento momentáneo del instinto depredador de la hembra para sujetarla y así poder escapar cuando ésta recupere las ganas de comer. Explicaré lo que me han contado a mí: el caso es que, después de la cópula, la hembra no tiene dificultad alguna en librarse por sí misma de sus ataduras y marcharse con paso largo. Puede que este cautiverio ritual sea el vestigio simbólico de unas ataduras ancestrales de veras. O quizá la hembra se ve impedida sólo lo suficiente para dar tiempo al macho a huir; después de todo, él no puede querer que la hembra permanezca atada para siempre: si no pudiese liberarse para poner sus huevos, toda la peligrosa empresa sería en vano desde el punto de vista genético.

Volvamos al tema principal de las telarañas y de la forma en que son construidas y usadas. Habíamos dejado a la araña en el centro de su malla acabada mientras le daba los últimos toques. Para seguir con nuestra lista de problemas y soluciones, una malla que sea lo bastante fina para capturar insectos también será demasiado fina para permitir que la araña se desplace de un lado a otro de la misma. El largo rodeo obligado por el margen de la telaraña suele evitarse mediante el simple recurso de una «zona libre». Por lo general se trata de un anillo central sin filamentos pegajosos. En algunas especies, como las del género Zy-

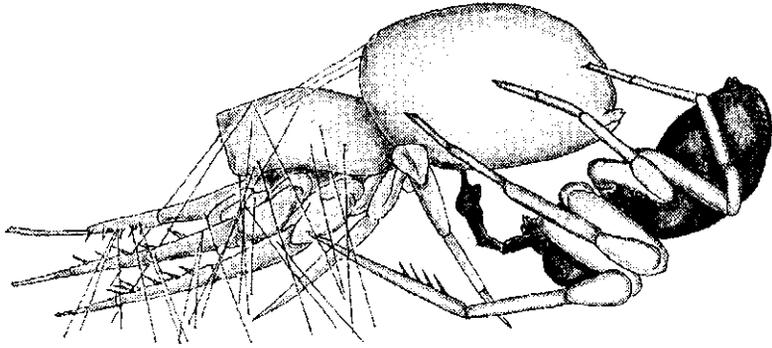


Figura 2.6. Araña macho amarrando con filamentos a una hembra de mayor tamaño.

giella, sólo se deja abierto un único segmento radial. Aunque he interpretado este hueco como un pasadizo de un lado a otro de la telaraña, puede que sea menos importante para este fin de lo que uno podría pensar, pues *Zygiella* no se sitúa en el centro como hacen muchas arañas, sino que se instala en su propio refugio tubular al margen de la tela, por una razón que me lleva al siguiente problema que tienen que resolver estos animales.

Las arañas, como hemos visto, no son invulnerables a los ataques (de las aves, por ejemplo). Excepto cuando es iluminada desde ciertos ángulos o está tachonada de rocío, una telaraña resulta bastante difícil de ver en razón de su tenuidad. Su constructora, posada sin ambages en el centro, suele ser su rasgo más conspicuo. Cuando una es gorda y visible para las aves, situarse fuera de la propia telaraña tiene muchas ventajas. Por otra parte, la propia naturaleza de la estrategia de caza de una araña implica el que ésta se instale y espere a su presa durante largo tiempo, y el centro es el lugar obvio de espera, porque es donde convergen todas las vías principales de seda no pegajosa. Un dilema de este estilo invita al compromiso, y las diferentes especies se comprometen de forma diversa. Nuestra hembra de *Zygiella* puede situarse fuera de la malla, pero nunca pierde el contacto con el centro de la tela, con el que está conectada mediante un hilo señalizador especial. Este es un hilo tensado que transmite de forma instantánea las vibraciones de la tela a la araña en reposo. Cuando la araña detecta las vibraciones de una presa, en un instante se abalanza hasta el centro a través del hilo señalizador, y de allí a cualquier radio que la lleve lo más cerca

posible de la presa que se debate. El hilo señalizador se encuentra en el centro exacto del segmento abierto antes descrito. Para reabrir la cuestión de por qué está abierto, quizá la presencia de una escalera de filamentos pegajosos la estorbaría en su rapidísima arremetida hasta el centro de la telaraña, o quizá limitaría la eficiencia del hilo señalizador como transmisor de vibraciones.

Situarse completamente fuera de la telaraña es la opción elegida por *Zygiella*, que sin duda paga el precio de llegar con un cierto retraso hasta la presa que se debate en la red (si el lector se pregunta por qué es tan importante la velocidad, pronto llegaremos a ello). Otro compromiso es quedarse en el centro, pero pasando tan inadvertido como sea posible. Con frecuencia las arañas construyen un denso tapiz central tras el que pueden esconderse o camuflarse. Algunas arañas tienen una banda o bandas de seda zigzagueante muy densa que quizá sirva para desviar la atención de la propia araña, que se agazapa en medio de ella (pero también se ha sugerido que tales bandas serían en realidad parte del aparato que las arañas poseen para afinar las tensiones de la telaraña). Algunas arañas tejen ornamentos adicionales de seda que recuerdan «falsas arañas», y se ha sugerido que servirían para desviar los picotazos de las aves. Pero también se ha sugerido que funcionan de una manera muy distinta, reflejando la luz ultravioleta (invisible para nosotros) de tal manera que, a los ojos de los insectos, podrían parecer manchas de cielo azul o, en otras palabras, agujeros.*

Ya he mencionado la necesidad que tiene una araña de salir corriendo a escena tan pronto como un insecto quede atrapado en la telaraña. ¿Por qué preocuparse? ¿Por qué no esperar simplemente a que el insecto deje de debatirse? La respuesta es que los movimientos de los insectos suelen ser efectivos. A menudo consiguen librarse, en especial los insectos grandes y fuertes como las avispas, y aunque no lo logren pueden dañar de manera importante la telaraña en el intento. Cómo evitar que un insecto se debata una vez capturado es el siguiente problema que tiene que solucionar nuestra araña.

* Existe todavía otra posibilidad, documentada asimismo para algunas especies. Las bandas de seda conspicuas (que a veces se cruzan, formando cruces o aspas) en las telarañas servirían para advertir a los pájaros y otros animales relativamente grandes de la presencia de un obstáculo que de otro modo resultaría invisible, para evitar que las destruyan accidentalmente obligando a las arañas a fabricarlas de nuevo. (*N del T.*)

La solución básica es brutalmente simple: abalanzarse hacia donde está el insecto y mordearlo hasta matarlo, guiándose por las vibraciones de sus forcejeos. Si la presa deja de debatirse por un momento, la araña puede intentar localizarla tirando de los ejes radiales y notando, a partir de las tensiones de los diferentes hilos, cuál es el que está cargado con un insecto. Una vez se llega hasta la presa, hay que sujetarla y administrarle una inyección de veneno letal o paralizante. La mayoría de arañas posee unos colmillos o garfios agudos y huecos con glándulas venenosas (unas pocas, como la famosa viuda negra, son peligrosas para nosotros, pero la mayoría de arañas comunes no pueden perforar nuestra piel y, aunque pudieran, no tienen suficiente veneno para hacer mella en un animal corpulento). Una vez ha hundido sus colmillos venenosos en la presa, la araña suele permanecer allí durante varios minutos, a la espera de que cese el forcejeo.

He descrito la mordedura venenosa como el método básico para someter a una víctima que se debate, pero no es el único. La mayoría de las soluciones alternativas, como cabe esperar de una araña, implican el uso de la seda. Incluso antes de asestar su mordisco, la mayoría de arañas tejedoras envuelven a su víctima con algo de seda para suplementar la que ya habrá enredado sus patas y cuerpo. Si se trata de una avispa u otra presa peligrosa, por lo general la araña la ahoga en seda, envolviéndola con ella varias veces, y finalmente perfora el blanco sudario con sus garfios para dar el *coup de grâce* ponzoñoso.

Las mariposas y polillas, con sus enormes alas cubiertas de escamas, plantean problemas especiales. Estas escamas se desprenden con facilidad (el polvo que se adhiere a nuestros dedos cuando tocamos una mariposa está constituido por escamas diminutas), lo cual contribuye a que sus poseedores puedan escapar de las telarañas, porque el polvo de escamas parece neutralizar la pegajosidad de las hebras. Cuando se sienten amenazadas, las polillas suelen plegar sus alas y dejarse caer al suelo. Sea por esto o simplemente porque las hebras todavía enredadas en sus alas les impiden emprender el vuelo enseguida, cuando una polilla escapa de una telaraña suele hacerlo cayendo al suelo. Esto abre una nueva vía de acción para las arañas, que no han desaprovechado la oportunidad.

Michael Robinson, en la actualidad director del Zoo Nacional de Washington, y su esposa Barbara descubrieron una notable telaraña en

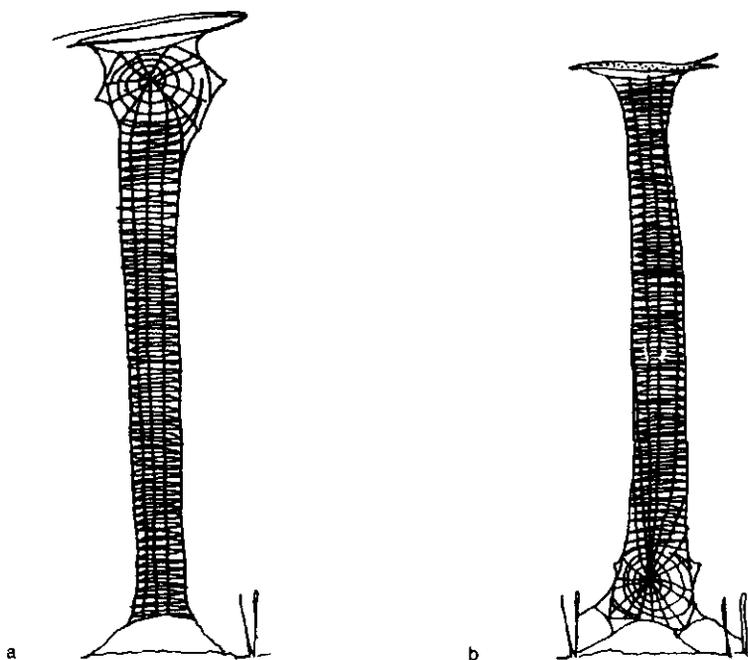


Figura 2.7. Telarañas en escalera, surgidas por evolución independiente: a) de Nueva Guinea; b) de Colombia.

la jungla de Nueva Guinea (figura 2.7a). La telaraña en escalera de Nueva Guinea es básicamente una telaraña ordinaria, pero con el lado inferior prolongado en una banda vertical de alrededor de un metro de longitud. La araña se sitúa en el centro, cerca de la parte superior. Cuando una polilla choca con una telaraña normal tiene muchas posibilidades de librarse y caer. Pero la araña de escalera de Nueva Guinea ha dispuesto una larga extensión de telaraña para recibir a la polilla en su caída. Al revolotear mientras cae por la telaraña, la polilla pierde el polvo escamoso, lo que incrementa las posibilidades de que quede retenida el tiempo suficiente para que la araña baje corriendo por la escalera y le aseste su mordedura letal. Poco después del descubrimiento de los Robinson en Nueva Guinea, su colega William Eberhard encontró un equivalente en el Nuevo Mundo, en Colombia (figura 2.7b). Que esta escalera se inventó de manera independiente de la otra viene certificado por una diferencia de detalle: su centro se halla en la base de la

escalera y no arriba. Pero funciona exactamente de la misma manera y aparentemente por la misma razón: ambas especies se han especializado en comer polillas.

Así, pues, la telaraña en escalera es una solución al problema de cómo impedir que la presa escape, solución que es especialmente eficaz contra las polillas. Otra técnica utilizada por algunas especies es la trampa de resorte. La red de *Hyptiotes* no es una telaraña completa, sino que está reducida a un triángulo con sólo cuatro radios. Existe una hebra adicional fijada al vértice del triángulo que mantiene toda la red tensa. Pero este cable de retén principal, en lugar de estar fijado a una superficie firme, es sujetado por la propia araña, que se constituye así en eslabón viviente para la fijación de la tela a una superficie sólida. La araña mantiene el cable tenso con sus patas anteriores y utiliza su tercer par de patas para sostenerse. Inmóvil en esta peligrosa posición suspendida, espera a que un insecto tropiece con la red, momento en que reacciona al instante soltando la trampa, que cae sobre el insecto arrastrando a su dueña con ella. Ahora el insecto se encuentra enmarañado sin esperanza en la red que ha caído sobre él. La araña envuelve a la víctima en más seda y se la lleva en forma de paquete fuertemente fajado. Sólo entonces muerde finalmente a la desgraciada criatura, le inyecta jugos digestivos y succiona lentamente sus restos licuados a través de la pared del paquete de seda. Ahora la red triangular no está en condiciones de ser utilizada de nuevo, y debe ser reconstruida desde el inicio.

Presumiblemente, *Hyptiotes* ha resuelto el problema de que una telaraña en tensión, aunque buena para capturar un insecto en primera instancia, es vulnerable a un forcejeo potente. A un insecto inmovilizado por filamentos pegajosos le resultará más fácil liberarse si tales filamentos están tensos. Pero si los filamentos están flojos, no tiene ningún sentido tirar de ellos, y uno se encuentra cada vez más enmarañado en seda viscosa. Al igual que las alas de un avión supersónico tienen una forma óptima para el despegue y otra distinta para el vuelo rápido, la tensión óptima de una telaraña para capturar presas es diferente de la tensión óptima para mantenerlas enredadas. Muchos aviones adoptan una solución de compromiso: no ser demasiado malo en ninguna de las dos funciones. Otros (los cazas de geometría variable) obtienen lo mejor de ambos mundos al variar la geometría de sus alas,

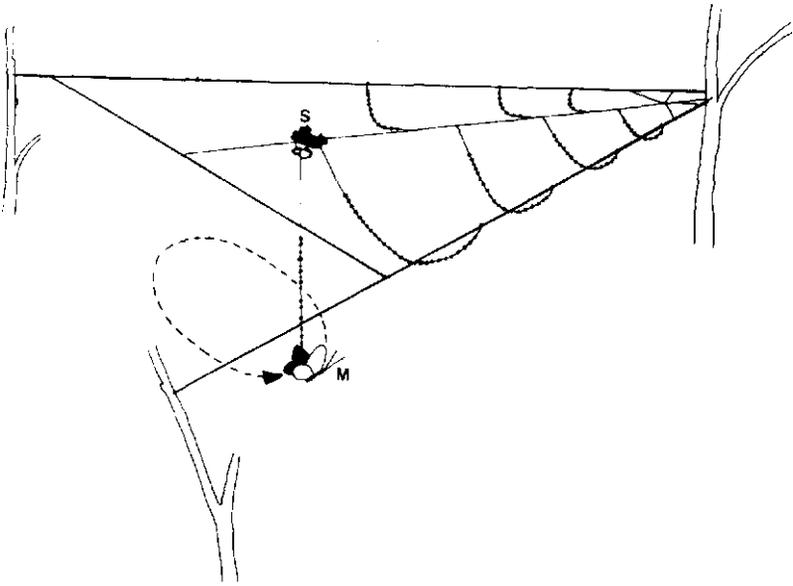


Figura 2.8. La telaraña triangular de *Pasilobus* con filamentos de corte fácil.

aun a costa de un mecanismo complicado. *Hyptiotes* construye una red de tensión variable.

Las arañas que construyen telas ordinarias parecen preferir la tensión elevada apta para la captura en primera instancia, y se basan en su propia velocidad para correr por la red, agarrar y someter a la presa antes de que pueda escapar. Otras arañas parecen haber adoptado la solución opuesta, y construyen redes con filamentos aflojados (figura 2.8). *Pasilobus* construye una malla triangular con un filamento único que biseca el ángulo principal. Los filamentos de captura pegajosos se reducen a unas pocas hebras colgantes. Lo que tienen de interesante estas hebras aflojadas (éste es otro elegante descubrimiento de Michael y Barbara Robinson en Nueva Guinea) es que se rompen muy fácilmente por un extremo. Cuando una polilla, por ejemplo, tropieza con una hebra de este tipo y se pega a ella, la rompe rápidamente por la unión más frágil, pero permanece fijada al filamento. Ahora la víctima vuela dando vueltas y vueltas como un avión de juguete suspendido de un cordel. Para la araña es tarea fácil tirar del hilo y despachar la presa. La ventaja de una disposición tal puede residir de nuevo en que el insecto

no puede liberarse forcejeando, porque todo es tan laxo que no puede encontrar un punto de apoyo firme. O puede que la principal ventaja de los filamentos de desprendimiento rápido esté relacionada con uno de los primeros problemas de nuestra lista: cómo absorber el impacto de un insecto en vuelo rápido sin que rebote como en un trampolín. Igual que la otra variante de red triangular, parece probable que el triángulo de *Pasilobus* sea el descendiente reducido de una telaraña completa. En cualquier caso, existe otro género, *Poecilopachys*, que utiliza el mismo principio de desprendimiento rápido en una telaraña completa. En este caso, y a diferencia de la mayoría de telarañas, la red es horizontal, no vertical.

Si pensamos en el triángulo de *Pasilobus* como una versión reducida de la telaraña de *Poecilopachys*, la reducción suma en la misma dirección es el filamento único de la araña boleadora, *Mastophora* (figura 2.9). Las bolas o boleadoras son un arma inventada originalmente por los indígenas sudamericanos, que todavía utilizan los gauchos para cazar (por ejemplo) los ñandúes de Darwin, las grandes aves incapaces de volar que viven en las pampas. Consisten en un peso, tal como un par de bolas o piedras, al final de una cuerda. Las boleadoras son lanzadas hacia la presa con el fin de que se enreden en sus patas y la hagan caer. El joven Charles Darwin experimentó con las bolas mientras montaba a caballo y consiguió capturar a su propia montura (para regocijo de los gauchos pero no, presumiblemente, del caballo). Las presas de la araña boleadora son siempre polillas macho de la familia noctuidos, y por una razón. Las polillas hembra de esta familia seducen a su pareja desde cierta distancia liberando un perfume único. La araña boleadora atrae con engaño a estos machos mediante la síntesis de un perfume muy similar. La «bola» es un burujo de seda prensada al final de un filamento único que la araña sostiene con una «mano», y que hace ondear hasta que enreda una polilla, tras lo cual tira del sedal. En conjunto, se trata de un dispositivo de más alta tecnología que la sencilla bolsa de piedras del gaucho. La bola es en realidad un filamento de seda muy arrollado y embutido en una gota de agua, como las cuentas pegajosas de una telaraña corriente. Cuando la araña voltea su bola, la seda se desenrolla automáticamente, del mismo modo que el hilo de un pescador de caña se desenrolla cuando lanza. Si la polilla es alcanzada, queda pegada y vuela dando vueltas y más vueltas. El resto de la histo-

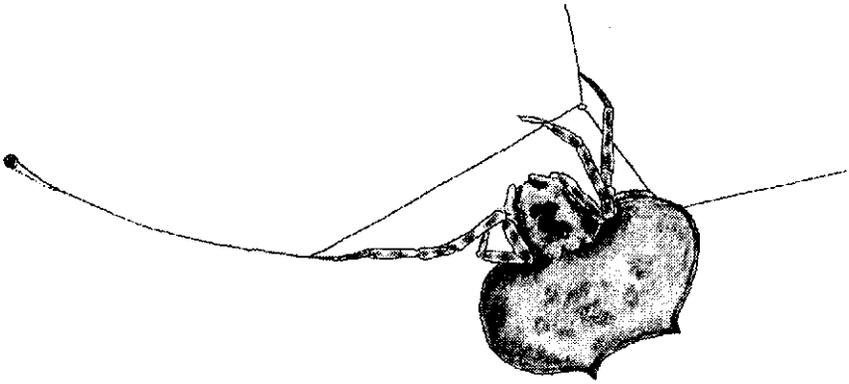


Figura 2.9. Araña boleadora.

ria es muy parecido al caso de *Pasilobus*. La pieza se cobra tirando del hilo y luego es mordida. La araña boleadora vive en Sudamérica, y es una idea encantadora pensar que los indios pudieran haberse inspirado en ella para sus boleadoras.

Hemos estado considerando variantes y reducciones de la telaraña típica. Es hora de volver a la telaraña propiamente dicha. Al final del capítulo anterior planteábamos la pregunta de cómo tomar un modelo informático de selección artificial como el programa de los biomorfos y transformarlo en un modelo de selección natural, con la elección realizada por la ciega naturaleza en lugar del ojo humano. Acordamos que el inconveniente de los biomorfos era que no tenían nada que se correspondiera con un mundo real, físico, en el que sobrevivir y tener éxito o fracasar. Podíamos imaginar que algunos biomorfos actuaban como depredadores, quizá persiguiendo a otros biomorfos que se comportaban como presas. Pero no parece haber una forma natural, no forzada, de decidir qué rasgos de los biomorfos los harán buenos, o no tan buenos, a la hora de capturar presas o de escapar de los depredadores. El ojo humano puede ver un par de colmillos babeantes y amenazadores en el extremo de un biomorfo (figura 1.16). Pero estas fauces abiertas, por terribles que se nos antojen, no pueden probarse en la práctica porque no se mueven, no habitan en un mundo de física real en el que su agudeza les permita atravesar caparazones o pieles reales. Colmillos y piel son sólo modelos de píxeles sobre una pantalla fluorescente bidi-

mensional. La agudeza y la dureza, la fragilidad y la toxicidad, son magnitudes que no tienen significado alguno en la pantalla del ordenador más allá de los significados artificiosos definidos como números arbitrarios por el programador. Uno puede organizar un juego de ordenador en el que unos números entren en batalla con otros, pero el ropaje gráfico de estos números es cosmético y superfluo. «Arbitrario» y «artificioso» no dejan de ser términos exageradamente modestos. En este punto, al final del capítulo anterior, caíamos con alivio en la telaraña. He aquí una pieza de naturaleza que podía ser simulada de manera no arbitraria.

Las telarañas de la vida real funcionan en gran medida en dos dimensiones. Si la malla es demasiado abierta, las moscas pasarán directamente a su través. Si es demasiado tupida, las arañas rivales conseguirán prácticamente el mismo resultado con un coste menor en seda, y por lo tanto dejarán más descendientes que llevarán sus genes, más prudentes desde el punto de vista económico. La selección natural encuentra el compromiso más eficiente. Una telaraña dibujada en la pantalla de un ordenador posee propiedades que interactúan, de manera en absoluto arbitraria, con moscas dibujadas en la misma pantalla. El tamaño del agujero de la malla es una magnitud claramente significativa en la pantalla del ordenador, en relación al tamaño de la «mosca» informática. La cantidad total de hilo («coste de la seda») es otra magnitud significativa. La relación entre ambas, que define la eficiencia, puede medirse con un grado aceptablemente pequeño de artificiosidad forzada. Incluso se puede incorporar algo de física en el modelo de ordenador, y Fritz Vollrath (del que aprendí gran parte de lo que he escrito en este capítulo), con sus colegas físicos Lorraine Lin y Donald Edmonds, han empezado muy bien. Es más fácil simular «elasticidad» y «tensión de rotura» en la «seda» de ordenador que simular, por ejemplo, «agilidad» para «eludir» a un «depredador» informático, o «alerta» a la hora de «avistar» a uno. Pero en este capítulo nos ocuparemos fundamentalmente de modelos de comportamiento de construcción de telarañas.

A la hora de redactar las reglas de simulación para una araña informática, el programador puede echar mano de gran cantidad de investigación detallada sobre las reglas que siguen efectivamente las arañas reales, y los puntos de decisión que tachonan el flujo conductual de las arañas. El profesor Vollrath y su grupo internacional de especialistas

en arañas se encuentran en primera línea de dicha investigación, y por lo tanto están bien situados para incorporar dicho conocimiento en un programa de ordenador. En realidad, escribir un programa de ordenador es una manera muy adecuada de resumir el conocimiento acerca de cualquier conjunto de reglas. Sam Zschokke es el miembro del grupo que se ha encargado de la tarea de resumir, en lenguaje informático, la información descriptiva sobre la conducta observada de las arañas tejedoras. Su programa se llama «MoveWatch» [Observación de movimientos]. Peter Fuchs y Thiemo Krink, basándose en trabajos previos de Nick Gotts y Alun ap Rhisiart, se han concentrado en la tarea inversa de programar «arañas informáticas» que cazan «moscas informáticas». Su programa se denomina «NetSpinner»[Hilador de redes].

La figura 2.10 es la ilustración que hace MoveWatch de los movimientos de un individuo de la especie *Araneus diadematus* al tejer una telaraña concreta. Adviértase que no se trata de imágenes de una telaraña, aunque superficialmente lo parezcan. Lo que tenemos aquí es una telescopización en el espacio de los movimientos en el tiempo de una araña, que se obtuvo filmando al animal en vídeo mientras construía su red. Su posición en instantes sucesivos se suministró al ordenador en forma de un par de coordenadas sobre una cuadrícula. A continuación el ordenador trazó líneas entre las posiciones sucesivas. Las líneas de «espiral pegajosa» (figura 2.10e), por ejemplo, representan la trayectoria de la araña mientras estaba construyendo la espiral pegajosa. No representan la posición exacta de ninguna hebra de seda (si lo hicieran, estarían espaciadas de manera más uniforme). En cambio, están concentradas en «ondas», lo que refleja que la araña utilizó la espiral auxiliar, temporal, como soporte mientras construía la espiral pegajosa (figura 2.10d).

Estos esquemas no representan modelos de conducta de arañas informáticas. Por el contrario, son descripciones informáticas del comportamiento de arañas reales. Veamos ahora NetSpinner, el programa complementario que simula el comportamiento de una araña. Podemos hacer que se comporte como cualquiera de una gran variedad de arañas teóricas. NetSpinner simula el comportamiento de arañas artificiales de la misma manera que el programa de biomorfos simulaba la anatomía de organismos parecidos a insectos. Construye «redes» en la pantalla del ordenador ateniéndose a normas de comportamiento cuyos de-

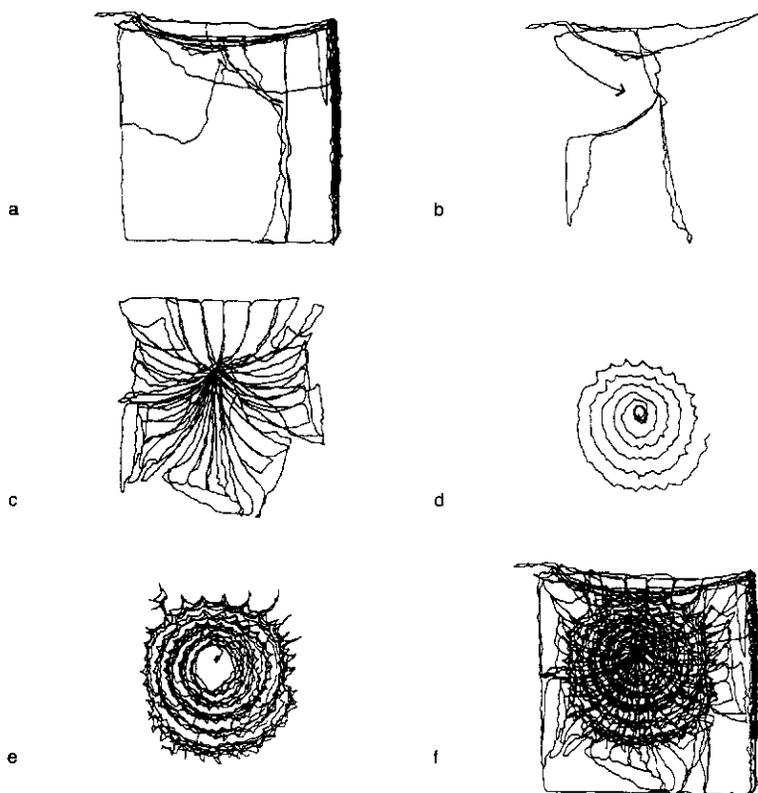


Figura 2.10. Seguimiento por ordenador de las posiciones de una araña determinada (*Araneus diadematus*) mientras teje la telaraña; programa MoveWatch, escrito por Sam Zschokke: a), b) preliminares; c) radios; d) espiral auxiliar; e) espiral pegajosa; f) todos los movimientos superpuestos.

talles varían en función de la influencia de determinados «genes». Como en los biomorfos, los genes no son más que números en la memoria del ordenador, y son transmitidos de generación en generación. Dentro de cada generación, los genes influyen en el comportamiento de la araña artificial y, por ende, en la forma de la «red». Por ejemplo, un gen puede controlar el ángulo entre los ejes radiales; una mutación en dicho gen cambiará el número de radios mediante un ajuste numérico a una regla de comportamiento en la araña informática. Como en el programa de los biomorfos, se permite que los genes cambien ligeramente de forma aleatoria con el paso de las generaciones. Estas mu-

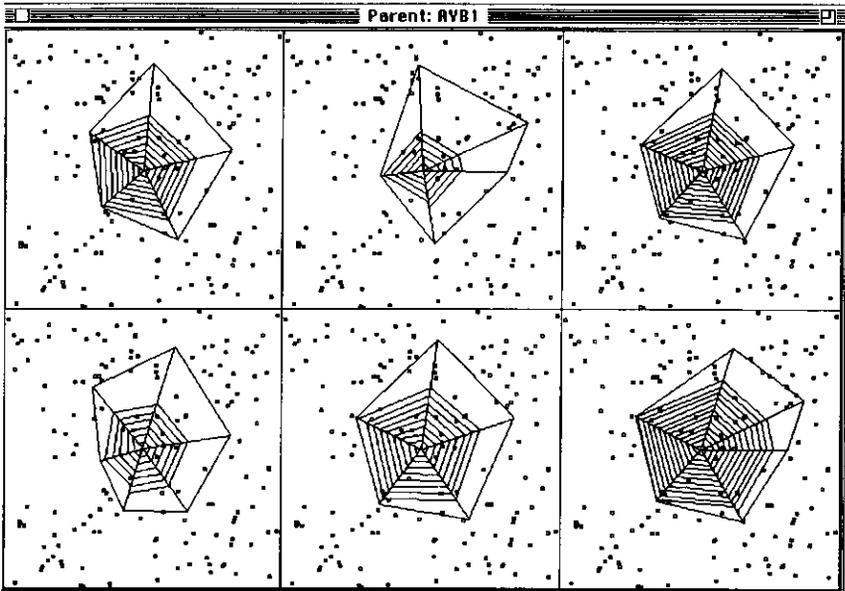


Figura 2.11. Telarañas generadas por ordenador, bombardeadas con moscas generadas por ordenador. Programa NetSpinner, escrito por Peter Fuchs y Thiemo Krink.

taciones se traducen en cambios en la forma de la red, y por ello están sujetas a selección.

Podemos contemplar las seis redes de la figura 2.11 como si fueran biomorfos (por el momento, ignoremos los puntos). La red situada en la parte superior izquierda es la progenitora; las otras cinco son descendientes mutantes. Naturalmente, en la vida real las redes no generan otras redes, son las arañas (que construyen redes) las que generan otras arañas (que construyen otras redes). Pero hay un sentido importante en el que lo que acabo de decir de las redes puede aplicarse también a los cuerpos. Los genes (que construyen progenitores humanos) dan origen a genes (que construyen niños humanos). En el modelo de ordenador, los genes que construyen la red progenitora de la parte superior izquierda (a través de su influencia sobre el comportamiento de una araña imaginaria que no vemos en pantalla) son los genes que han mutado para dar origen a los genes que construyen las redes hijas de las otras cinco casillas.

Naturalmente, como hacíamos con los biomorfos, podríamos se-

leccionar a ojo una de las seis redes para que se reproduzca, lo que significaría que *sus* genes serían los elegidos para pasar (sujetos a mutación) a la generación siguiente. Pero esto sería selección artificial. La razón básica para pasar de biomorfos a telarañas era que en ellas veíamos una posible oportunidad para simular la selección natural: selección mediante la eficiencia medible en la captura de «moscas», y no en función de un capricho estético humano.

Observemos ahora las manchas de la figura. Son «moscas» que el ordenador ha disparado al azar sobre las redes. Si se observa atentamente, se puede comprobar que a las seis telarañas se les ha lanzado el mismo conjunto de moscas distribuidas aleatoriamente. Éste es el tipo de cosas que un ordenador, en contraste con la vida real, hace siempre a menos que uno se tome la molestia de decirle que no lo haga. No es importante en este caso, e incluso facilita la comparación entre las telarañas. La comparación implica en parte que el ordenador cuenta el número de moscas «capturadas» por cada una de las seis redes. Si esto fuera todo, la red de la parte inferior derecha ganaría el concurso, porque su espiral pegajosa abarca el mayor número de moscas. Pero el número absoluto de moscas no es la única variable importante: está también el coste de la seda. La red central superior utiliza la menor cantidad de seda, de modo que si éste fuera el único criterio ganaría la competición. La verdadera ganadora es la red que captura el mayor número de moscas *menos* una función de coste computada a partir de la longitud de la seda. Según este cálculo más elaborado, la ganadora es la red central inferior. Ésta es la elegida para reproducirse y transmitir los genes que la construyeron a la siguiente generación. Como en el programa de los biomorfos, este proceso de reproducir a los ganadores durante muchas generaciones fomenta una tendencia evolutiva gradual. Pero mientras que en los biomorfos la dirección de la tendencia era guiada puramente por el capricho humano, en el caso de NetSpinner la dirección de la evolución es guiada automáticamente hacia la mejora de la eficiencia. Es lo que pretendíamos: un modelo de ordenador de la selección natural y no de la selección artificial. ¿Qué es lo que evoluciona bajo estas condiciones? Es realmente gratificante comprobar lo reales que resultan las telarañas que surgen cuando se hace funcionar el programa durante toda la noche, lo que representa cuarenta generaciones (figura 2.12).

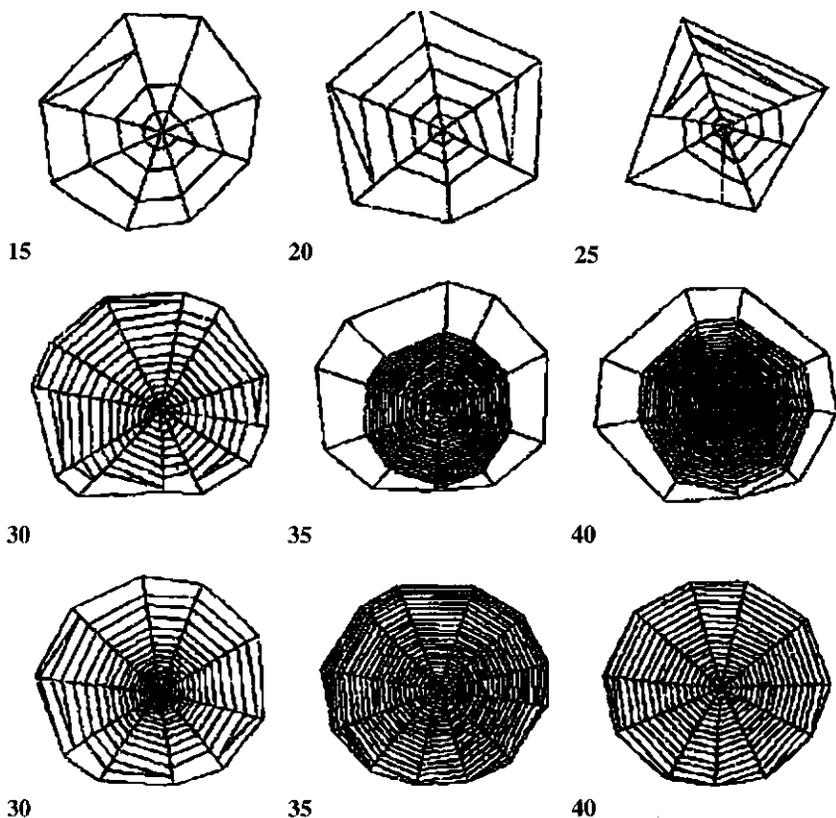


Figura 2.12. Evolución durante una noche de una telaraña producida por NetSpinner, reproducida aquí cada cinco generaciones.

Las imágenes que he mostrado hasta aquí fueron producidas por NetSpinner II, cuyo principal artífice es Peter Fuchs (NetSpinner I fue una versión preliminar que no comentaré). NetSpinner III, una versión posterior del programa, obra de Thiemo Krink, gana por la mano a los biomorfos en un aspecto adicional importante: la reproducción sexual. Tanto los biomorfos como las telarañas de NetSpinner II se reproducen sólo asexualmente. ¿Qué puede significar el que las arañas informáticas se reproduzcan sexualmente? Uno no ve arañas copulando literalmente en la pantalla (aunque sin duda podría conseguirse, con climax canibalístico ocasional y todo). Lo que hace el programa es disponer

los enlaces genéticos de la reproducción sexual, la recombinación de la mitad de los genes de un progenitor con la mitad de los del otro.

He aquí cómo se hace esto. En cualquier generación existe una población, o «demo», de media docena de arañas, cada una de las cuales construye una red. La forma de la red está regida por un «cromosoma» o ristra de genes. Cada gen influye sobre una «regla» específica de construcción, como ya hemos visto. Después las redes son bombardeadas con «moscas». Se calcula la «bondad» de la telaraña igual que antes, en función del número de «moscas» capturadas menos una función de la «seda» utilizada. Una proporción fija de la población de arañas muere en cada generación, y las que mueren son las que tienen las redes menos eficientes. Las demás arañas se aparean entre sí aleatoriamente para producir una nueva generación de arañas. «Aparearse» significa que los cromosomas de ambas arañas se «emparejan» e intercambian una porción de su longitud. Esto puede parecer extraño y forzado, pero no es más que lo que hacen los cromosomas reales, tanto los de las arañas como los nuestros, en la reproducción sexual.

El proceso continúa y la población evoluciona generación tras generación, pero con un refinamiento ulterior. No hay únicamente un demo de seis arañas sino (por ejemplo) tres demos semiseparados (figura 2.13). Cada uno de los tres demos evoluciona aisladamente, pero de vez en cuando un individuo «migra» a otro demo, llevando sus genes con él. Volveremos a la teoría que subyace tras esto en el capítulo 4. Por el momento diremos que los tres demos evolucionan hacia telarañas mejoradas, es decir, más eficientes en la captura económica de moscas. Algunos demos pueden meterse en callejones evolutivos sin salida. Se podría pensar que los genes de las arañas migrantes son una inyección de «ideas» frescas procedentes de otra población. Es casi como si una subpoblación próspera enviara genes que «sugieren» a una población con menos éxito una solución mejor al problema de construir una red.

En la generación uno tenemos en los tres demos una gran variedad de formas de redes, la mayoría de las cuales no es especialmente eficiente. Como en el ejemplo asexual de la figura 2.12, lo que observamos a medida que pasan las generaciones es una reducción gradual de la variación hacia una forma más eficiente. Pero ahora la reproducción sexual promueve la compartición de «ideas» dentro de cada demo, de

modo que los miembros de un demo acaban siendo bastante similares entre sí. Por otro lado, la separación genética entre los demos hace que existan diferencias visibles entre los miembros de demos distintos. En un punto de la generación once, los genes de dos redes migran del demo 3 al demo 2, «infectando» a este último con «ideas» procedentes del primero. Llegados a la generación cincuenta (de hecho mucho antes en algunos casos), las telarañas han evolucionado hasta convertirse en dispositivos buenos, estables y eficientes para la captura de moscas.

Así, algo parecido a la selección natural puede funcionar en un ordenador para producir telarañas artificiales más eficientes que las redes de partida a la hora de capturar presas. Esto se acerca bastante más a la selección natural que la selección puramente artificial de los biomorfos. Sin embargo, ni siquiera NetSpinner constituye todavía una selección natural auténtica. NetSpinner tiene que hacer un cálculo para decidir qué telarañas son lo bastante buenas para la reproducción y cuáles no. El programador tiene que decidir cuál es el coste de una determinada longitud de «seda», en la misma moneda que el valor de una «mosca». El programador puede cambiar a voluntad el factor de conversión de la moneda. Puede, por ejemplo, doblar el «precio» de la seda, lo cual contribuirá a reducir el éxito reproductor de telarañas más amplias o más densas que derrochan seda a cambio de unas pocas moscas más. El programador debe decidir el factor de conversión monetaria, y puede asignarle cualquier valor a voluntad. Éste es sólo uno de los muchos factores de conversión ocultos bajo la superficie. El programador tiene que decidir asimismo la tasa de conversión de la «carne» de mosca en arañitas, que podría variar. La medida en que las arañas mueren por razones que no tienen nada que ver con la bondad de sus redes también es decidida implícitamente por el programador. La decisión es arbitraria, y una decisión distinta podría producir un resultado evolutivo diferente.

En la vida real, ninguna de tales decisiones es arbitraria. De hecho, no hay decisiones en absoluto, y no se utiliza ninguna maquinaria computacional para hacerlas. Simplemente ocurren, de forma natural y sin alharacas. La carne de mosca *es* convertida en carne de araña, y el factor de conversión simplemente *existe*. Si venimos nosotros detrás y lo calculamos, es cosa nuestra. La conversión se produce de forma au-

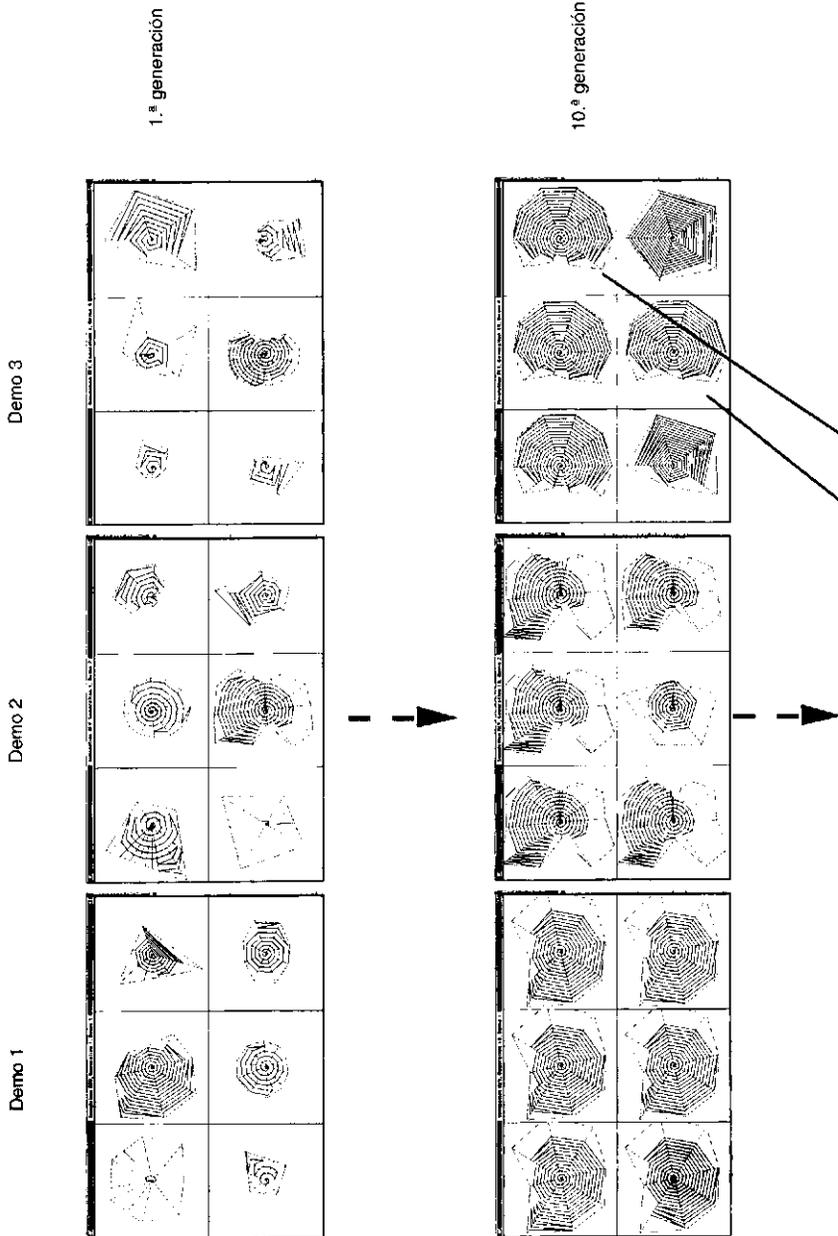
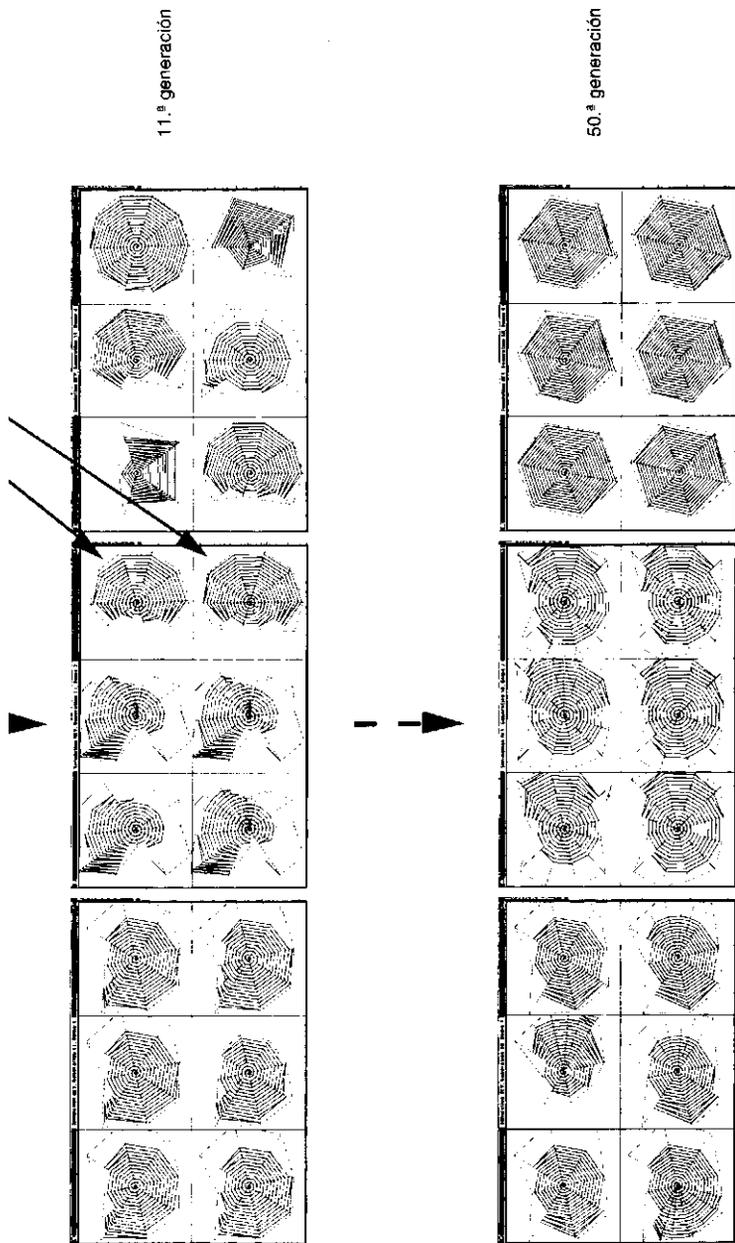


Figura 2.13. Cincuenta generaciones de evolución de tres demos con reproducción sexual de telarañas generadas por ordenador, producidas por selección «natural» en NetSpinner. En la generación once, dos genotipos de telaraña del demo 3 migraron al



demo 2, donde estuvieron disponibles para entrecruzamiento (lo que se indica en ilustración mediante las flechas continuas).

tomática, tanto si alguien la expresa en términos matemáticos como si no. Lo mismo vale para la conversión de carne de insecto en seda. En efecto, NetSpinner supone que todas las moscas son iguales entre sí, pero en la vida real pueden existir complicaciones de detalle formidables, y también éstas simplemente surgen sin aspavientos. Dejando aparte el hecho de que unos insectos son mayores que otros, puede haber diferencias cualitativas sutiles. Supóngase que la producción de seda requiere un determinado aminoácido del que hay poca cantidad. Los distintos tipos de insectos varían en cuanto a su riqueza en este aminoácido particular. Así, el cálculo exacto del valor de un insecto debe tener en cuenta qué tipo de insecto es, además de su tamaño. NetSpinner puede computar este factor, pero sería otro cálculo arbitrario. En la vida real tal cosa simplemente ocurre, de forma automática y sin artefactos. Otra complicación es que, presumiblemente, el valor de las capturas adicionales se reduce con el grado de saciedad de una araña. NetSpinner ignora este aspecto, pero la vida real no. NetSpinner podría hacer un cálculo arbitrario que permitiera introducir esta complicación. En la vida real esto simplemente pasa, lo queramos o no. No hay que hacer ningún cálculo explícito.

Lo que estoy diciendo es tan evidente que apenas es necesario insistir en ello, pero es tan importante que hay que hacerlo. Cada vez que se pretende incorporar una complicación de detalle adicional a NetSpinner, un avisado programador humano tiene que escribir páginas adicionales de difícil lenguaje de ordenador. En la vida real, en cambio, existe una notable *falta* de cálculo explícito. El factor de conversión de proteína de mosca en proteína de seda está ahí, simple y automáticamente. El hecho de que una mosca sea más valiosa para una araña hambrienta que para una saciada no requiere ningún cálculo. Sería sorprendente que el alimento no fuera más valioso para una araña hambrienta que para una saciada. Estamos acostumbrados a contemplar los modelos informáticos como simplificaciones del mundo real, pero en cierto sentido los modelos informáticos de la selección natural no son simplificaciones, sino complicaciones del mundo real.

La selección natural es un proceso sumamente simple, en el sentido de que se requiere muy poca maquinaria para que funcione. Desde luego, sus efectos y consecuencias son complejos en grado extremo, pero para poner en marcha la selección natural en un planeta real todo

lo que se precisa es la existencia de información heredada. Para poner en marcha un modelo de selección natural que funcione en un ordenador, ciertamente hace falta el equivalente de la información heredada, pero además se necesitan otras muchas cosas. Se precisa una compleja maquinaria para el cálculo de multitud de costes y beneficios, así como de las conversiones pertinentes asumidas.

Más aún, es necesario establecer una física completamente artificial. Escogimos las telarañas porque, de todos los dispositivos que pueden encontrarse en el mundo natural, figuran entre los más sencillos de traducir en términos informáticos. Alas, columnas vertebrales, dientes, garras, aletas y plumas: en principio podríamos crear modelos informáticos de todos ellos y el ordenador podría programarse para juzgar la eficiencia de las formas variantes. Pero ello supondría una tarea de programación complicada hasta la exasperación. Un ala, una aleta o una pluma no pueden exhibir sus cualidades a menos que se las coloque en un medio físico (aire o agua) con propiedades tales como resistencia, elasticidad y pautas de turbulencia, todas ellas difíciles de simular. Una columna vertebral o los huesos de una extremidad no pueden exhibir sus cualidades a menos que se los coloque en un sistema físico de tensiones, palancas y fricciones. La dureza, la fragilidad, las elasticidades de combadura y compresión, todas estas cualidades deberían estar representadas en el ordenador. Simular las interacciones dinámicas entre una multitud de huesos, apuntalados en ángulos diversos y enlazados mediante ligamentos y tendones, es una tarea de cómputo formidable que implica decisiones arbitrarias a cada paso. Simular el flujo de aire y la turbulencia alrededor de un ala es un problema tan difícil que los ingenieros aeronáuticos suelen recurrir a maquetas en túneles de viento antes que intentar simularlos en un ordenador.

No obstante, no debo subestimar la labor de los modeladores informáticos. En 1987 se fundó la disciplina conocida como «vida artificial», y tuve el honor de ser invitado a su bautizo oficial en Los Alamos, antaño hogar de la bomba atómica y ahora escenario de investigaciones más constructivas. Christopher Langton, inspirador y organizador de la conferencia original de 1987 y sucesivas, ha fundado una revista dedicada a la vida artificial de la que acaba de aparecer el primer volumen. Contiene artículos que suavizan el pesimismo del párrafo

anterior. Por ejemplo, tres norteamericanos, Demetri Terzopoulos, Xiaoyuan Tu y Radek Grzeszczuk, han programado una simulación espectacular de peces informáticos que se comportan como peces reales e interactúan en un medio acuático simulado por ordenador. El mundo informático en el que nadan estos peces posee su propia física simulada, basada en la física real del agua. Gran parte del esfuerzo de programación se consagra a la simulación de un único pez, del que se establece adecuadamente el comportamiento. Después este pez de trabajo se multiplica con variaciones, y todos los «peces» resultantes son liberados en el «agua», donde se «perciben» e interactúan mutuamente. Por ejemplo, evitan «colisionar» entre sí y se asocian en «cardúmenes».

Cada pez informático tiene una anatomía formada por veintitrés nodos, dispuestos en un espacio tridimensional simulado y conectados entre sí mediante noventa y un «muelles» (figura 2.14). Doce de estos muelles son capaces de contraerse: son los «músculos» del pez artificial. Los sinuosos movimientos de natación de un pez real, giros incluidos, se simulan mediante ondas de contracción controladas que pasan entre los «músculos». El pez puede aprender de la experiencia con vistas a mejorar la secuencia de contracciones musculares para nadar, girar y perseguir objetivos. Los peces poseen tres «variables de estado mentales», denominadas «hambre», «libido» y «miedo», que se combinan para generar «intenciones». Entre dichas intenciones se encuentran «comer», «aparearse», «vagar», «irse» y «evitar colisión». El pez tiene dos órganos de los sentidos, uno que mide la «temperatura» del agua y otro que funciona como un «ojo» que detecta la posición, el color y el tamaño de los objetos de su mundo exterior. Con fines estéticos, el esqueleto de nodos y muelles se recubre con un envoltorio de aspecto sólido y coloreado como el de un pez. Distintos tipos de peces, por ejemplo depredadores y presas, se distinguen no sólo por sus libreas externas, sino también por diferencias de comportamiento (figura 2.15). Los depredadores difieren de las presas no sólo por el tamaño, sino por sus predisposiciones conductuales, el peso que se da a las tres variables de estado mentales y a las diversas «intenciones». Hay que decir que, incluso con los ordenadores rápidos actuales, las simulaciones de este tipo son tan costosas en tiempo de proceso que un mundo artificial con muchos peces en interacción no puede ofrecer una

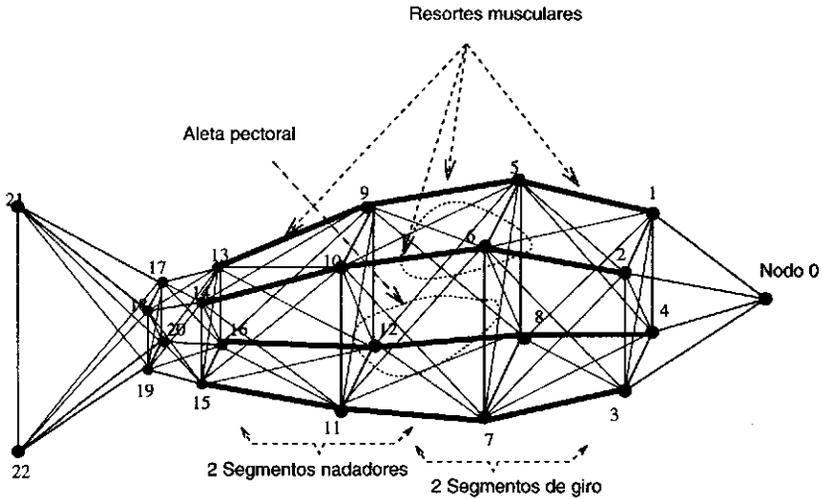


Figura 2.14. Pez artificial. El esqueleto de resortes.

ilusión plausible en tiempo real. Los peces nadan y se persiguen, huyen unos de otros y se cortejan entre sí a una escala temporal más lenta que en el mundo real, lo que nos obliga a recurrir al equivalente de la fotografía acelerada si queremos contemplar el espectáculo a la velocidad de la vida. Sin embargo, este es un detalle de escasa importancia teórica, un problema que desaparecerá con las generaciones futuras de ordenadores.

El mundo artificial de peces en agua informática de Terzopoulos, Tu y Grzeszczuk es lo suficientemente rico para ser un buen candidato a la simulación evolutiva. En la actualidad, el comportamiento de «apareamiento» de sus peces se limita al cortejo: no se reproducen realmente. Un paso siguiente obvio, del que los autores son plenamente conscientes, es introducir «genes» para los pesos cuantitativos de las diversas variables comportamentales que rigen los muelles musculares y, a un nivel superior, las variables de estado mentales y las intenciones. Los machos y hembras que se apareen podrán recombinar sus genes, con mutaciones ocasionales, para producir nuevas generaciones de constitución genética distinta. Al final acabaremos obteniendo evolución por selección natural, aunque sea en el medio ambiente sumamente artificial del ordenador. No habrá necesidad de definir dos tipos

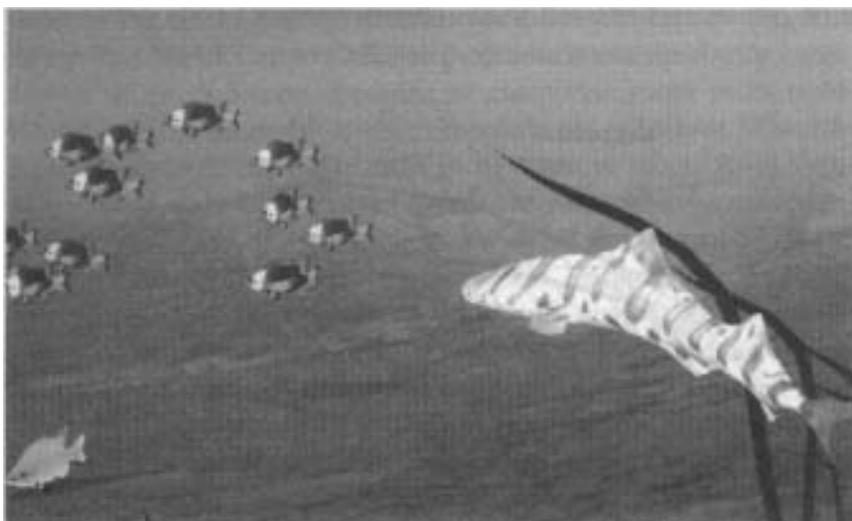


Figura 2.15. Tiburón artificial acechando un banco de peces presa.

de peces con las etiquetas de depredador y presa. Se podrá empezar con dos especies que difieran sólo en cuanto a tamaño y compatibilidad reproductora, pero no en cuanto a hábitos, y la selección natural podrá llevar a la especie mayor a desarrollar, pasadas muchas generaciones y de forma natural, el hábito de depredar la más pequeña. ¿Quién sabe qué intrigantes peculiaridades de la historia natural artificial pueden surgir ante nuestros ojos?

Auguro, y espero con interés, un campo floreciente de investigación al que podría dársele la denominación oximorónica de «selección natural artificial». No obstante, en cierto sentido la «simulación» más fácil de la selección natural en el mundo real es el propio mundo real. Los huesos varían realmente en cuanto a tensión de rotura, elasticidad de compresión, dureza, líneas de fuerza y consumo de calcio. Se pueden calcular los detalles si se quiere, pero, se haga o no, el hecho es que hay huesos que se rompen y hay huesos que no; hay huesos que consumen grandes cantidades de valioso calcio y hay huesos que dejan calcio adicional para incorporar a la leche. La vida real es rigurosamente sencilla en este sentido. Algunos animales tienen una probabilidad mayor de morir que otros. El ordenador más rápido de los Estados Unidos podría pasarse un año calculando el coste y los detalles, pero

en la naturaleza, el hecho brutal es que algunos mueren *realmente* y otros no. Eso es todo.

Uno puede, si lo desea, pensar que los genes de todas las poblaciones del mundo constituyen un ordenador gigantesco que calcula costes, beneficios y conversiones monetarias, con las pautas cambiantes de las frecuencias génicas en el lugar de los unos y ceros de un procesador de datos electrónico. Es una idea ciertamente esclarecedora a la que volveremos en las páginas finales de este libro. Pero ahora ha llegado el momento de aclarar el título. ¿Qué es el monte Improbable y qué podemos aprender de él?

El mensaje de la montaña



El monte Improbable se alza desde la llanura, elevando vertiginosamente sus picos hasta el cielo enrarecido. Sus farallones altísimos y verticales son, o así parece, imposibles de escalar. Empequeñecidos como insectos, alpinistas frustrados reptan a sus pies, al tiempo que miran sin esperanza las alturas, escarpadas e inalcanzables. Sacudiendo sus diminutas y desconcertadas cabezas, convienen en que la cima que se cierne sobre ellos será para siempre inescalable.

Nuestros alpinistas son demasiado ambiciosos. Están tan atentos al drama perpendicular de los acantilados que no se les ocurre mirar al otro lado de la montaña. Allí encontrarían, no farallones verticales ni cañones reverberantes, sino prados herbáceos de pendiente suave, que ascienden gradualmente, de manera uniforme y benévola, hacia las distantes tierras altas. Ocasionalmente el ascenso gradual se ve interrumpido por algún pequeño despeñadero rocoso, pero por lo general se puede encontrar un rodeo no demasiado empinado para un montañero en forma que disponga de calzado fuerte y tiempo de sobra. La enorme altura del pico no importa mientras uno no intente escalarlo de una sola cordada. Hay que localizar el sendero que ascienda suavemente y, si no hay límite de tiempo, el ascenso es sólo tan formidable como el siguiente paso. La historia del monte Improbable es, desde luego, una parábola. Exploraremos su significado en este capítulo y los siguientes.

Lo que sigue se ha extraído de una carta publicada por el periódico londinense *The Times* hace pocos años. El autor, cuyo nombre no facilito para ahorrarle una situación embarazosa, es un físico, lo bastante estimado por sus colegas como para haber sido elegido miembro de la Royal Society, la institución científica de más prestigio en Gran Bretaña.

«Soy un científico del campo de la física... que duda de la teoría de la evolución de Darwin. Mis dudas no surgen de ninguna motivación religiosa ni de ningún deseo de añadir leña al fuego de ninguno de los bandos de ninguna controversia; simplemente pienso que el darwinismo es indefendible desde el punto de vista científico.

»... No nos queda otra opción que aceptar la evolución: toda la evidencia del registro fósil así lo indica. La disconformidad tiene que ver únicamente con la causa. Darwin sostiene que la causa fue la casualidad: a medida que una generación sucedía a otra habría habido variaciones menores al azar; las que hubiesen conferido alguna ventaja habrían persistido y las que no habrían desaparecido. Así, los seres vivos habrían ido mejorando gradualmente, con capacidades cada vez mejores para, por ejemplo, obtener alimento o destruir a sus enemigos. A este proceso Darwin lo llamó selección natural.

»Como físico, no puedo aceptarlo. Me parece imposible que la variación al azar pueda haber producido la máquina notable que es el cuerpo humano. Tómese sólo un ejemplo: el ojo. Darwin admitía que esto le frustraba; no podía imaginar de qué modo el ojo podía haber evolucionado a partir de un órgano simple sensible a la luz... Yo mismo no puedo ver alternativa alguna a la hipótesis de que la materia viva ha sido diseñada. El origen de la vida no es explicable en términos de la ciencia oficial, ni lo es la maravillosa sucesión de organismos vivos formados a través de los miles de millones de años de existencia de este planeta.

»Pero, ¿quién fue el Diseñador?

»Sinceramente suyo...».

El autor se afana en hacernos saber, por dos veces, que es un físico, lo que da un peso especial a sus opiniones. Otro científico, un profesor de química en la Universidad Estatal de San José en California, ha irrumpido en la biología con una publicación titulada «La higuera de Esmirna requiere de Dios para su producción», en la que describe la notable complejidad de la relación entre los higos y sus avispas polinizadoras (véase el capítulo 10), y llega a la siguiente conclusión: «Una joven avispa permanece latente en un cabrahigo durante todo el invierno, pero hace eclosión en el momento exacto para poner sus huevos en la cosecha estival de cabrahigos, lo cual es necesario para la polinización del fruto. Todo esto requiere una sincronización exacta, ¡lo que significa que Dios ejerce el control! [La exclamación es mía.] Pensar que toda esta pauta exacta es resultado de la casualidad evolutiva es ridículo. Sin

Dios, nada parecido a la higuera de Esmirna podría existir... Los evolucionistas pretenden que las cosas ocurren por azar sin un objetivo definido o un plan completa y cuidadosamente pensado.»

Uno de los físicos más famosos del Reino Unido, Sir Fred Hoyle (quien, dicho sea de paso, es autor de *La nube negra*, que debe figurar entre las mejores novelas de ciencia ficción jamás escritas), expresa frecuentemente una opinión similar con respecto a moléculas como los enzimas, cuya «improbabilidad» inherente (es decir, la probabilidad de que aparecieran espontáneamente por azar) es más fácil de calcular que la de los ojos o las higueras. Los enzimas celulares funcionan como máquinas extraordinariamente numerosas para la producción molecular en masa. Su eficacia depende de su forma tridimensional, ésta depende de su arrollamiento, y su arrollamiento depende de la secuencia de aminoácidos que se engarzan en una cadena para construirlos. Esta secuencia exacta está directamente controlada por los genes y es realmente importante. ¿Podría haberse producido por azar?

Hoyle dice que no, y tiene razón. Existe un número fijo de aminoácidos disponibles, veinte. Un enzima típico es una cadena de varios cientos de eslabones tomados de estos veinte. Un cálculo elemental demuestra que la probabilidad de que cualquier secuencia concreta de, por ejemplo, 100 aminoácidos se forme de manera espontánea es de una sobre $20 \times 20 \times 20 \dots 100$ veces, es decir, de 1 sobre 20^{100} . Éste es un número inconcebiblemente grande, mucho mayor que el número de partículas fundamentales en todo el universo. Sir Fred, esforzándose mucho por ser justo con los que considera sus rivales darwinistas (innecesariamente, como veremos), reduce generosamente las probabilidades a 1 sobre 10^{20} . Un número más modesto, ciertamente, pero sigue siendo una probabilidad terriblemente baja. Su colega astrofísico y coautor de muchas de sus publicaciones, el profesor Chandra Wickramasinghe, le atribuye la afirmación de que la formación espontánea «por azar» de un enzima funcional es como un huracán que atravesara un depósito de chatarra y tuviera la suerte de armar de forma espontánea un Boeing 747. Lo que Hoyle y Wickramasinghe no entienden es que el darwinismo *no* es una teoría de posibilidades aleatorias. Se trata de una teoría de mutación aleatoria más selección natural acumulativa *no aleatoria*. ¿Por qué razón, me pregunto, es tan difícil, incluso para científicos refinados, comprender algo tan sencillo?

El mismo Darwin tuvo que vérselas con una generación anterior de físicos que clamaban «azar» como el supuesto fallo fatal de su teoría. William Thomson, Lord Kelvin, fue quizás el más grande físico de su tiempo y el más distinguido de los oponentes científicos de Darwin. Entre sus muchos logros, calculó la edad de la Tierra basándose en tasas de enfriamiento y suponiendo que en un tiempo había formado parte de los «fuegos» del Sol. Llegó a la conclusión de que la Tierra tenía algunas decenas de millones de años de antigüedad. Las estimaciones modernas sitúan dicha edad en los miles de millones de años. No es un descrédito para Lord Kelvin que su estima fuera la centésima parte de la respuesta correcta. En su época no se disponía de los métodos de datación radiactiva actuales, y se desconocía la fusión nuclear, el verdadero «fuego» del Sol, de modo que su cálculo del enfriamiento estaba condenado al fracaso desde el principio. Menos perdonable es el que desechara, «en tanto que físico», la evidencia biológica de Darwin: la Tierra no era lo suficientemente vieja; no había habido tiempo suficiente para que el proceso de la evolución darwiniana hubiera conseguido los resultados que vemos a nuestro alrededor. La evidencia de la biología debía ser simplemente errónea, aplastada por la evidencia superior de la física. Darwin podría muy bien haber replicado (no lo hizo) que la evidencia biológica indica claramente que existe evolución, que en consecuencia tuvo que haber existido el tiempo para que la evolución tuviera lugar, y que por lo tanto la evidencia de la física debía ser errónea.

Volviendo al tema del «azar», Lord Kelvin utilizó la prestigiosa plataforma de su discurso presidencial para la British Association for the Advancement of Science para citar con aprobación las palabras de otro distinguido físico, Sir John Herschel, quien, dicho sea de paso, se refería al darwinismo como «la ley del sin orden ni concierto»:

«No podemos seguir aceptando el principio de la variación arbitraria y casual y de la selección natural como una explicación suficiente, *per se*, del mundo orgánico pasado y presente, del mismo modo que no podemos admitir el método laputiense de componer libros (llevado a *l'outrance*) como un método suficiente para Shakespeare y los *Principia*».

Herschel aludía a *Los viajes de Gulliver*, en los que Swift se había mofado del método laputiense de escribir libros mediante la combina-

ción aleatoria de palabras. Herschel y Kelvin, Hoyle y Wickramasinghe, el físico que he citado anónimamente y cualquier tracto de los que entonan los Testigos de Jehová antes del evangelio, todos cometen el error de tratar la selección natural de Darwin como si fuera un equivalente de la autoría laputiense. Aún hoy, incluso en ámbitos donde debería ser mejor comprendido, el darwinismo se considera sobre todo una teoría «azarosa».

Es estruendosa y demoleidamente obvio que si el darwinismo fuera realmente una teoría azarosa no podría funcionar. No es necesario ser un matemático o un físico para calcular que un ojo o una molécula de hemoglobina tardaría de aquí a la eternidad para autoensamblarse a base únicamente de suerte, sin orden ni concierto. Lejos de ser una dificultad inherente al darwinismo, la astronómica improbabilidad de ojos y rodillas, enzimas y articulaciones del codo, y todas las demás maravillas vivientes, es precisamente el problema que *cualquier* teoría de la vida debe resolver, y que *sólo* el darwinismo resuelve. Y lo hace fragmentando la improbabilidad en trozos pequeños y manejables, desmenuzando la necesaria suerte, rodeando el monte Improbable y trepando por las suaves pendientes, a razón de un milímetro por cada millón de años. Sólo Dios intentaría la loca empresa de saltar el precipicio de un solo brinco; y si postulamos que El es nuestro diseñador cósmico, nos quedamos exactamente en el punto de partida. Cualquier Diseñador capaz de construir la deslumbrante gama de seres vivos tendría que ser inimaginablemente inteligente y complicado, y complicado es otra manera de decir improbable (y por lo tanto sigue requiriendo una explicación). Un teólogo que replica que su dios es simple hasta lo sublime no hace más que eludir (no mucho) la cuestión, pues un dios lo bastante simple, fueran cuales fueran las demás virtudes que pudiera tener, sería demasiado simple para diseñar un universo (por no decir nada de perdonar los pecados, responder a las oraciones, bendecir uniones, transustanciar el vino y los otros muchos y diversos logros que se esperan de él). No se puede repicar y andar en la procesión. O bien nuestro dios es capaz de diseñar mundos y hacer todas las demás cosas divinas, en cuyo caso *necesita* una explicación por derecho propio, o no lo es, en cuyo caso no puede *proporcionar* una explicación. Fred Hoyle debería ver a Dios como el Boeing 747 por excelencia.

La altura del monte Improbable simboliza la combinación de perfección e improbabilidad cuyo epítome son los ojos y las moléculas enzimáticas (y los dioses capaces de diseñarlas). Decir que un objeto tal como un ojo o una molécula de proteína es improbable tiene un significado bastante preciso. El objeto está constituido por un gran número de partes dispuestas de una manera muy especial. El número de disposiciones posibles es enormemente grande. En el caso de una molécula de proteína podemos calcular efectivamente este enorme número. Isaac Asimov lo hizo para una proteína concreta, la hemoglobina, y llamó al resultado «número de la hemoglobina». Tiene 190 ceros. Éste es el número de maneras de permutar las unidades de la hemoglobina de manera que el resultado no sea hemoglobina. En el caso del ojo no podemos realizar un cálculo equivalente sin hacer montones de supuestos, pero sí podemos apreciar de forma intuitiva que debe ser otro número asombrosamente grande. La disposición real, observada, de las partes es improbable en el sentido de que es sólo una entre trillones de disposiciones posibles.

Ahora bien, retrospectivamente, y en un sentido nada interesante, cualquier disposición de las partes es tan improbable como cualquier otra. Incluso un depósito de chatarra es tan improbable, retrospectivamente, como un 747, pues sus partes podrían haber sido dispuestas de multitud de maneras distintas. El problema es que la mayoría de estas disposiciones serían también almacenes de chatarra. Aquí es donde entra en escena la idea de calidad. La mayoría de disposiciones de las partes de un depósito de chatarra de un Boeing no volarían. Una pequeña minoría, sí. De todos los trillones de disposiciones posibles de las partes de un ojo, sólo una ínfima minoría vería. El ojo humano forma una imagen nítida sobre una retina, corregida para la aberración esférica y la aberración cromática; abre o cierra automáticamente un diafragma de iris para mantener la intensidad de la luz interna relativamente constante frente a grandes fluctuaciones de la intensidad de luz externa; regula automáticamente la distancia focal de la lente (el cristalino) en función de la cercanía o lejanía del objeto observado; discrimina colores mediante la comparación de las tasas de disparo de tres tipos distintos de células fotosensibles. Prácticamente ninguno de los revoltijos aleatorios de las partes de un ojo conseguiría ejecutar una sola de estas tareas tan delicadas y difíciles. Hay algo muy especial en

la disposición particular existente. Toda disposición concreta es tan improbable como cualquier otra, pero, de todas las disposiciones concretas, las inútiles superan con mucho a las útiles. Los dispositivos útiles, además de improbables, requieren una explicación especial.

R.A. Fisher, el gran genético y matemático, fundador de la estadística como ciencia moderna, planteó el asunto en 1930, con su habitual estilo meticuloso (nunca lo conocí, pero casi se puede oír su dictado fastidiosamente correcto a su sufrida esposa):

«Se considera que un organismo está adaptado a una situación concreta, o a la totalidad de las situaciones que constituyen su ambiente, sólo en la medida en que podemos imaginar un conjunto de, situaciones, o ambientes, ligeramente distintos, a los que el animal, en Su conjunto, se hallaría no tan bien adaptado; e igualmente sólo en la medida en que podemos imaginar un conjunto de formas orgánicas ligeramente diferentes, que estarían no tan bien adaptadas a dicho ambiente».

Ojos, oídos y corazones, el ala de un buitre, la tela de una araña, todos ellos nos impresionan por la evidente perfección de su ingeniería, con independencia de dónde los veamos: no necesitamos que se nos muestren en su entorno natural para ver que son aptos para algún fin y que, si sus partes se reorganizaran o se alteraran en casi cualquier forma posible, serían peores. Llevan escrita por todas partes la «perfección improbable». Un ingeniero las reconocerá como el tipo de cosas que él diseñaría si se le pidiera que resolviese un problema determinado.

Ésta es otra manera de decir que los objetos de esta clase no pueden explicarse como producto de la casualidad. Como hemos visto, invocar la casualidad por sí sola como explicación es equivalente a saltar con pértiga, de un solo brinco, desde la base hasta la cumbre del farallón más empinado del monte Improbable. ¿Cuál sería entonces el equivalente al lento avance por las laderas suaves y herbosas del otro lado de la montaña? La respuesta es la supervivencia no aleatoria, lenta, acumulativa, paso a paso, de variantes aleatorias, lo que Darwin denominó selección natural. La metáfora del monte Improbable escenifica el error de los escépticos citado al principio de este capítulo. Se equivocaban al mantener los ojos fijos en el precipicio vertical y su im-

ponente altura. Suponían que el magnífico farallón era el único camino hacia la cumbre en la que se encuentran encaramados ojos, moléculas de proteína y otras disposiciones de partes sumamente improbables. El gran logro de Darwin fue descubrir los suaves gradientes que serpientean por el otro lado de la montaña.

Ahora bien, ¿será éste uno de esos raros casos en los que se cumple aquello de que no hay humo sin fuego? El darwinismo ha sido generalmente malinterpretado como una teoría de puro azar. ¿No habrá hecho algo para provocar esa patraña? Pues sí, existe una débil base para esta interpretación distorsionada. Un estadio del proceso darwiniano es en efecto aleatorio: la mutación. La mutación es el proceso a través del cual se ofrece variación genética fresca para su selección, y por lo general es descrita como aleatoria. Pero los darwinistas hacen ostentación de la «aleatoriedad» de la mutación únicamente para *contrastarla* con la no aleatoriedad de la selección, la otra cara del proceso. No es *necesario* que la mutación sea aleatoria para que la selección natural opere. La selección puede hacer su trabajo sea o no dirigida la mutación. Resaltar que la mutación *puede* ser aleatoria es nuestra manera de llamar la atención sobre el hecho crucial de que, en cambio, la selección es *no* aleatoria, de una forma sublime y quintaesencial. Resulta irónico que este énfasis sobre el contraste entre la mutación al azar y la no aleatoriedad de la selección haya llevado a mucha gente a pensar que toda la teoría es de carácter aleatorio.

Incluso las mutaciones son, de hecho, no aleatorias en diversos sentidos, aunque esto es irrelevante para nuestra argumentación porque no contribuye de manera constructiva a la improbable perfección de los organismos. Por ejemplo, las mutaciones tienen causas físicas bien conocidas, y en este sentido no son aleatorias. La razón por la que los operadores de aparatos de rayos X dan un paso atrás antes de apretar el interruptor, o llevan delantales de plomo, es que los rayos X producen mutaciones. Además, algunos genes son más propensos a mutar que otros. En los cromosomas existen «puntos calientes» en los que las tasas de mutación son claramente superiores a la media. Éste es otro tipo de no aleatoriedad. Las mutaciones pueden invertirse («mutaciones inversas»). Para la mayoría de genes, las mutaciones en una u otra dirección son equiprobables. Para algunos, sin embargo, la mutación en una dirección es más frecuente que la mutación inversa. Ello da origen a la

llamada «presión de mutación», una tendencia a evolucionar en una dirección concreta, con independencia de la selección. He aquí otro sentido en el que se puede calificar la mutación de no aleatoria. Adviértase que la presión de mutación no conduce sistemáticamente a una mejora. Tampoco lo hacen los rayos X. Más bien todo lo contrario: la gran mayoría de mutaciones, sea cual sea su causa, son aleatorias en cuanto a la calidad, y esto significa que suelen ser malas, porque existen muchas más maneras de empeorar que de mejorar.

Se puede imaginar un mundo teórico en el que las mutaciones estuvieran sesgadas hacia la mejora. En este mundo hipotético las mutaciones serían no aleatorias no ya en el sentido en que lo son las inducidas por los rayos X: estas mutaciones hipotéticas estarían sistemáticamente sesgadas para mantenerse un salto por delante de la evolución y anticiparse a las necesidades del organismo. Pero este tipo de no aleatoriedad, en contra de numerosos anhelos teóricos, casi con toda seguridad no tiene base real: no es probable que las mutaciones anticipen de manera sistemática las necesidades del organismo, ni está claro de qué manera podría operar tal anticipación. ¿Qué puede significar «anticipación»? Supóngase que una terrible glaciación se abate sobre una región anteriormente templada y que los ciervos locales están muriéndose dentro de sus pieles delgadas. La mayoría de individuos morirá de todos modos, pero la especie sólo se salvará si la evolución le permite desarrollar a tiempo una piel gruesa como la de un buey almizclero. En principio, se puede imaginar un mecanismo ajustado para poner en juego mutaciones deseables de acuerdo con las necesidades. Sabemos que los rayos X aumentan la tasa general de mutación, produciendo indiscriminadamente pelajes más delgados o más gruesos. ¿Qué pasaría si el frío intenso pudiera aumentar de algún modo la tasa de mutación únicamente en una dirección: hacia los pelajes más densos? Simétricamente, ¿qué ocurriría si el calor intenso pudiera inducir mutaciones en la otra dirección, hacia pelajes más ligeros?

A los darwinistas no les *importaría* que se produjeran tales mutaciones providenciales. Esto no socavaría el darwinismo, aunque daría al traste con sus afirmaciones de exclusividad. Un viento de cola en un vuelo transatlántico puede acelerar agradablemente nuestra llegada, y ello no tiene por qué socavar nuestra creencia en que la fuerza básica que nos ha llevado a casa es el motor del avión. Pero los darwinistas se

mostrarían realmente muy sorprendidos (y a la vez intrigados), si se descubriera cualquier mecanismo mutacional beneficioso de este tipo, por tres razones.

En primer lugar, a pesar de haberlo buscado afanosamente, no se ha descubierto todavía (al menos en animales y plantas; se ha sugerido un caso muy especial y no generalizable en bacterias, que todavía suscita controversia). En segundo lugar, no existe ninguna teoría que pueda explicar cómo podría «saber» el cuerpo qué tipo de mutaciones tiene que inducir. Supongo que se podría imaginar que, si han existido decenas de glaciaciones cíclicas a lo largo de millones de años que constituyen una forma de «experiencia racial», se podría haber establecido algún tipo aún no descubierto de selección natural de orden superior sobre la base de mutar en la dirección correcta ante los primeros atisbos de la siguiente glaciación. Pero repito que no existe evidencia alguna de este fenómeno y, por otra parte, no se ha establecido hasta el presente ninguna teoría que pueda tratarlo. En tercer lugar (y esto me devuelve a mi primer punto), algunos darwinistas, entre los que me incluyo, encuentran que el mecanismo propuesto de la mutación dirigida es toscamente superfluo. Es ésta una objeción en gran parte estética, y por lo tanto no debiera considerarse aplastante. Pero si reaccionamos con hostilidad hacia las sugerencias de mutación directa es porque tales sugerencias suelen proceder de personas que piensan, equivocadamente, que una teoría de ese estilo es *necesaria*. No comprenden que la selección, por sí sola, es lo suficientemente potente para realizar la tarea, aunque la mutación sea aleatoria. Una manera de resaltar la suficiencia de la selección no aleatoria es subrayar que la teoría *permite* que la mutación sea al azar. Pero, como dije antes, no es imprescindible para la teoría que la mutación *tenga* que ser aleatoria, y desde luego esto no es excusa para embrear toda la teoría con la brocha de la aleatoriedad. La mutación puede ser aleatoria, pero está claro que la selección no lo es.

Antes de dejar a nuestros ciervos a la intemperie en el frío creciente, existe una variante de la teoría de la mutación providencial que quizá se le haya ocurrido al lector mientras leía los tres últimos párrafos. Ciertamente, es difícil imaginar de qué manera el cuerpo podría «saber» que el tiempo frío requiere la mutación hacia un pelaje más grueso, mientras que el tiempo cálido requiere una mutación en sen-

tido contrario, pero no lo es tanto imaginar que las tasas de mutación podrían estar preprogramadas para aumentar de manera indiscriminada, en todas direcciones, cuando las cosas se ponen difíciles. La argumentación intuitiva sería más o menos como sigue. Una nueva crisis, tal como una glaciación o una época de calor intenso, es experimentada por el cuerpo como estrés. Un fuerte estrés sobre mi persona, sea por el frío, el calor, la sequía o cualquier causa no especificada, indica que *algo* va mal con mi equipamiento corporal para las condiciones actuales. Puede que sea demasiado tarde para mí, pero quizá la vida pueda ser mejor para alguno de mis hijos si los genes contenidos en mis órganos sexuales mutan frenéticamente de forma aleatoria en todas direcciones. Sea cual sea la naturaleza de la crisis medioambiental (frío, calor, sequía, inundación), aquellos de mis descendientes mutantes que contengan mutaciones que vayan en la dirección equivocada (probablemente la mayoría) morirán. Pero si la crisis es lo bastante grave habrían muerto de todos modos. Es posible que mediante la generación de una carnada de monstruos mutantes un animal aumente sus posibilidades de producir un descendiente más eficiente que él a la hora de habérselas con la nueva crisis.

Existen, en efecto, genes cuyo efecto es controlar la tasa de mutación de otros genes. En teoría se podría argüir que estos «genes mutadores» podrían ser disparados por el estrés, y una tendencia tal podría verse favorecida por algún tipo de selección natural de nivel superior. Pero, ¡ay!, esta teoría no tiene más fundamento que nuestra teoría de la mutación dirigida. En primer lugar, no existen pruebas que la apoyen. Más serias son las profundas dificultades teóricas que plantea cualquier hipótesis de tasas de mutación incrementadas favorecidas positivamente por la selección natural. El argumento es de tipo general y lleva a la conclusión de que los genes mutadores siempre tenderán a desaparecer de la población, lo cual se aplica también a nuestros hipotéticos animales estresados.

En forma resumida, el argumento es el siguiente. Cualquier animal que haya conseguido llegar a una edad que le permita tener hijos ya debe ser bastante bueno. Si se parte de algo que ya es bueno y se lo cambia al azar, lo más seguro es que sea para peor. De hecho, la gran mayoría de mutaciones empeora efectivamente las cosas. Es verdad que una pequeña minoría de mutaciones puede representar una mejora

(es eso mismo lo que hace posible la evolución por selección natural). También es cierto que un gen mutador, al incrementar la tasa total de mutación, puede ayudar a su poseedor a encontrar aquella rareza preciosa, una mutación que represente una mejora. Cuando esto ocurra, el gen mutador de turno florecerá asimismo temporalmente, porque se perpetuará junto con la mutación mejorada que ha contribuido a crear. Uno podría pensar que esto constituye una selección natural positiva en favor del gen mutador y que, por lo tanto, las tasas de mutación podrían aumentar en virtud de este mecanismo. La pena es que esto tendría una importante secuela.

En las generaciones futuras, la reproducción sexual se encargará de redistribuir y recombinar los genes que comparten un mismo cuerpo individual. Nada impide que, con el paso de las generaciones, el gen mutador se separe del gen mejor que contribuyó a crear: algunos individuos nacerán sólo con el gen mejor, otros sólo con el mutador. El gen mejor seguirá siendo premiado por la selección natural e irá ganando prevalencia en las poblaciones sucesivas. Pero el desgraciado gen mutador que lo hizo posible ha sido separado de él por la redistribución sexual. Como cualquier otro gen, su destino a largo plazo depende de sus efectos *promedio* sobre la totalidad de cuerpos que lo albergan. Los efectos promedio del gen ventajoso asociado al gen mutador son ventajosos, y por lo tanto se perpetuará en un número cada vez mayor de cuerpos. Pero los efectos promedio del propio mutador son malos y, a pesar de sus destellos ocasionales de beneficio, por término medio el mutador está destinado a ser penalizado por la selección natural. La mayor parte de los cuerpos que lo alberguen serán monstruosos o morirán antes que los demás.

Este argumento contra la posibilidad de que los genes mutadores sean seleccionados positivamente reposa en el supuesto de que la reproducción es sexual. Si la reproducción es asexual, el «entremezclado» de genes aducido no existe. En ese caso los genes mutadores pueden verse favorecidos por la selección natural durante largos periodos porque, al no haber sexo, no se separan de los genes mejorados que ocasionalmente crean, y pueden «viajar en autoestop» a lo largo de las generaciones. Cuando la reproducción es asexual, una mutación nueva a mejor iniciará un nuevo clon de individuos prósperos. Una mutación nueva a peor desaparecerá rápidamente, arrastrando con ella

su subclon de monstruos. Si una mutación a mejor es lo bastante buena, el clon continuará prosperando, de lo cual se aprovecharán todos los genes del mismo, incluso los malos. Los genes malos prosperarán porque, a pesar de sus efectos perniciosos, la calidad media de los genes en el clon es positiva; y entre estos genes que se aprovechan del éxito de los demás estará el gen mutador responsable de la mutación a mejor inicial. En lo que respecta al gen ventajoso, éste podría «desear» quitarse de encima el peso muerto de los genes malos, y esto incluye al mutador que lo hizo posible. Si pudiera pensar, el gen ventajoso anhelaría una reproducción sexual purificadora. Si mis cuerpos se dedicaran a practicar algo de sexo —diría— podría desprenderme de este montón de autoestopistas repulsivos. Se me podría valorar sólo por mis virtudes. Algunos de los cuerpos en los que me encontraría serían malos, otros buenos, pero *en promedio* sería libre para sacar todo el partido de mis efectos buenos. Los genes malos, por otra parte, no tienen «deseo» alguno de sexo. Si tuvieran que viajar por su cuenta en el «gratis para todos» genético que es el sexo, pronto fracasarían.

Este razonamiento, por sí solo, no explica por qué existe la reproducción sexual en primera instancia, aunque podría servir de base para una explicación de la misma. Decir, como he hecho yo, que los genes ventajosos pueden beneficiarse de la existencia del sexo mientras que los genes malos pueden beneficiarse de su ausencia no equivale a explicar por qué existe el sexo. Hay muchas teorías sobre la razón de ser del sexo, pero ninguna de ellas es absolutamente convincente. Una de las primeras que se propuso, el «trinquete de Muller»,* es una versión más formal de la teoría que he descrito informalmente al hablar de los «deseos» de los genes ventajosos y desventajosos. Mi argumentación de los genes mutadores puede contemplarse como un espaldarazo adicional a la teoría del trinquete de Muller. La reproducción asexual no sólo permite que los genes malos se acumulen en la población, sino que constituye un incentivo para los genes mutadores. Ello probablemente acelerará la extinción de los clones asexuales o, en otras palabras, hará que el trinquete de Muller opere más deprisa. Pero todo este

* Según la formulación de H. J. Muller: «Una población sexual incorpora una especie de mecanismo de trinquete, de tal modo que nunca puede llegar a contener, en ninguna de sus estirpes, una carga de mutaciones inferior a la que ya existe en las estirpes actuales menos cargadas.» (*N. del T.*)

asunto de la existencia del sexo, del trinquete de Muller y demás es otra historia, difícil de contar además. Puede que algún día me arme de valor para tratar el tema y escriba todo un libro sobre la evolución del sexo.

Terminemos esta digresión. El resultado es que, allí donde hay reproducción sexual, el fenómeno de la mutación es penalizado por la selección natural, aunque ocasionalmente las mutaciones individuales (una minoría de ellas) puedan verse favorecidas por la selección natural. Esto es cierto incluso en una situación de estrés, en la que un incremento de la tasa de mutación podría parecer superficialmente ventajoso. La inclinación a mutar es siempre mala, aunque alguna que otra mutación pueda resultar ventajosa de vez en cuando. Es mejor, aunque parezca paradójico, pensar que la selección natural favorece una tasa de mutación nula. Afortunadamente para nosotros, y para la continuidad de la evolución, este nirvana genético no se acaba de alcanzar nunca. La selección natural, el segundo paso del proceso darwiniano, es una fuerza no aleatoria, que empuja hacia la mejora. La mutación, que es el primer paso, es aleatoria en el sentido de que no empuja hacia la mejora. Así pues, toda mejora es, antes que nada, afortunada, y esa es la razón por la que tanta gente piensa erróneamente que el darwinismo es una teoría azarosa. Pero quien piense así se equivoca.

La convicción de que la selección natural favorece una tasa de mutación nula y de que la mutación no es dirigida no excluye una posibilidad intrigante, que he denominado «la evolución de la evolucionabilidad», y que he defendido en un ensayo así titulado. Explicaré una nueva versión de la idea (embriología caleidoscópica) en el capítulo 7. Entretanto, volvamos a la selección natural propiamente dicha, la otra mitad de la asociación darwiniana. Aunque se permite que la mutación sea aleatoria, y en un sentido importante casi con toda seguridad lo es, la esencia de la selección natural es que *no* es aleatoria. De todos los lobos susceptibles de sobrevivir, una muestra no aleatoria de ellos (los de patas más veloces, inteligencia más sagaz, sentidos y dientes más agudos) sobrevive de facto y transmite sus genes a la siguiente generación. En consecuencia, los genes que vemos hoy son copias de una muestra no aleatoria de los genes que han existido en el pasado. Cada generación es un tamiz de genes. Los genes que siguen existiendo después de un millón de generaciones de tamizado tienen aquello que

hace falta para atravesar tamices. Han participado en la construcción embrionaria de un millón de cuerpos sin un solo fracaso. Cada uno de este millón de cuerpos ha sobrevivido hasta la edad adulta. Ninguno de ellos era tan poco atractivo como para no encontrar pareja (poco atractivo, se entiende, frente a las parejas sexuales potenciales de la especie de turno). Todos y cada uno de ellos fueron capaces de engendrar al menos un hijo. El tamiz es exigente. Los genes que penetran en el futuro no son una muestra aleatoria, sino una élite. Han sobrevivido a glaciaciones y sequías, a pestes y depredadores, a explosiones y menguas demográficas. Han sobrevivido a climas cambiantes no sólo en el sentido meteorológico convencional, sino en el sentido genético, porque el sino de un gen, cuando existe reproducción sexual, es cambiar de compañeros (de microclima genético) en cada generación; los genes que sobreviven son los que prosperan cuando se codean con muestras sucesivas de genes de la especie entera, y esto implica ser bueno a la hora de cooperar con los demás genes de la especie. La fracción dominante del clima en el que un gen tiene que sobrevivir la constituyen los demás genes de la especie, sus compañeros en el «río que sale del Edén»* fluyendo a través de cuerpos sucesivos a lo largo de las generaciones. Podemos pensar en las diferentes especies, a medida que se separan en las bifurcaciones del río, como microclimas distintos en los que diferentes conjuntos de genes deben sobrevivir.

Por simplicidad hablamos de la mutación como la primera fase del proceso darwiniano y de la selección natural como la segunda. Pero esto puede inducir a equívoco si se interpreta que la selección natural ronda a la espera de una mutación que luego es rechazada o recogida, después de lo cual la espera continúa. Las cosas podrían haber sido así; una selección de este tipo seguramente funcionaría, y quizá lo haga en algún lugar del universo. Pero, en realidad, en este planeta las cosas funcionan generalmente de otra manera. Existe en efecto un gran fondo de variación alimentado en origen por un goteo de mutaciones, pero esta variación es incrementada por la agitación que produce la reproducción sexual. La variación tiene su origen en las mutaciones, pero éstas pueden ser muy viejas para cuando la selección natural actúa finalmente sobre ellas.

* Título de un libro anterior del propio Dawkins; véase la Bibliografía. (TV. *del T.*)

Por ejemplo, mi colega de Oxford, Bernard Kettlewell, ya fallecido, realizó estudios que se hicieron famosos sobre la evolución de polillas oscuras, casi negras, en especies anteriormente claras. En *Biston betularia*, la especie que estudió con más detenimiento, los individuos oscuros tienden a ser algo más resistentes que los claros, pero en las comarcas rurales sin contaminación son raros porque resultan más conspicuos y las aves pronto los devoran. En áreas industriales en las que los troncos de los árboles se han ennegrecido debido a la contaminación, los individuos oscuros son menos visibles que los claros y, en consecuencia, tienen más posibilidades de librarse de ser comidos. Ello les permite además gozar de la ventaja adicional de su resistencia natural. El consiguiente aumento del número de individuos oscuros desde mediados del siglo pasado, hasta una dominancia abrumadora en las áreas industriales, ha sido espectacular y es uno de los ejemplos mejor documentados de la selección natural en acción. Y ahora viene la razón para presentar aquí este caso. Con frecuencia se piensa (erróneamente) que tras la revolución industrial la selección natural operó sobre una única mutación completamente nueva. Por el contrario, podemos estar seguros de que siempre ha habido individuos negros. Lo que ocurre es que nunca duraron demasiado. Como la mayoría de mutaciones, ésta habría sido recurrente, pero las polillas oscuras siempre eran rápidamente capturadas por las aves. Cuando las condiciones cambiaron después de la revolución industrial, la selección natural encontró en el acervo génico una minoría de genes oscuros ya presentes sobre los que operar.

Hemos identificado los ingredientes que deben estar presentes para que pueda tener lugar la evolución: la mutación y la selección natural. Ambos se concretarán inmediatamente en cualquier planeta siempre y cuando se dé un ingrediente más fundamental, un ingrediente difícil de obtener, pero evidentemente no imposible. Este ingrediente básico es la herencia. Para que la selección natural tenga lugar, en cualquier lugar del universo, tienen que existir estirpes de cosas que se parezcan más a sus antecesores inmediatos que a los miembros de la población en general. Herencia no es lo mismo que reproducción. Se puede tener reproducción sin herencia. Los incendios forestales se reproducen, pero sin herencia.

Imáginese el lector una pradera seca y agostada, que se extiende

kilómetros y kilómetros en todas direcciones. Ahora bien, en un lugar determinado, un fumador imprudente deja caer una cerilla encendida y en un abrir y cerrar de ojos toda la hierba se ha inflamado en un fuego que avanza rápidamente. Nuestro fumador se aleja corriendo del fuego tan deprisa como se lo permite la tos de sus pulmones, pero ahora nos interesa más la manera en que el fuego se propaga. No sólo crece uniformemente a partir del punto inicial original, sino que emite chispas que se elevan en el aire. Estas chispas, o briznas de hierba seca ardiendo, son arrastradas por el viento lejos del fuego original. Cuando una chispa acaba cayendo, inicia un nuevo fuego en algún otro lugar de la pradera seca como yesca. Después el nuevo fuego emite chispas que encienden aún más fuegos en algún otro lugar. Podríamos decir que los fuegos se entregan a una forma de reproducción. Cada nuevo fuego tiene un fuego progenitor: el fuego que encendió la chispa que lo inició. Y tiene un fuego abuelo, un fuego bisabuelo, y así sucesivamente hasta el fuego ancestral encendido por la malhadada cerilla. Un fuego sólo puede tener un progenitor, pero puede tener más de un hijo, porque puede enviar más de una chispa en direcciones distintas. Si alguien hubiera observado todo el proceso desde arriba y fuera capaz de registrar la historia de cada llamarada, podría trazar un árbol genealógico completo de los fuegos de la pradera.

Ahora bien, el meollo del relato es que, aunque los fuegos se reproducen, no hay una verdadera *herencia*. Para que existiera, cada fuego tendría que parecerse a su progenitor más que a los fuegos en general. No hay nada absurdo en la *idea* de un fuego que se parezca a su progenitor. Podría ocurrir. Los fuegos varían, tienen cualidades individuales, lo mismo que las personas. Un fuego puede tener su propio color de llama, su propio color de humo, su propio tamaño de llama, su propio nivel de ruido, etc. Podría parecerse al fuego progenitor en cualquiera de estos rasgos. Si, en general, los fuegos se *parecieran* a sus progenitores en alguna de estas cosas, podríamos hablar de herencia verdadera. Pero los fuegos individuales no se parecen a sus progenitores más de lo que se parecen a la generalidad de fuegos que tachonan la pradera. Una llamarada concreta obtiene sus cualidades características (tamaño de la llama, color del humo, volumen de crepitación, etc.) de su entorno, del tipo de hierba que crezca allí donde aterrice la chispa, de la velocidad y dirección del viento. Todas ellas son cualidades del área

local en la que prende la chispa. No son cualidades del fuego progenitor del que procedía la chispa.

Para que existiera una herencia verdadera, cada chispa tendría que llevar con ella alguna cualidad, alguna esencia característica, de su fuego progenitor. Por ejemplo, supóngase que algunos fuegos tienen llamas amarillas, otros rojas y otros azules. Si los fuegos de llamas amarillas produjeran chispas que iniciaran fuegos de llamas amarillas, los fuegos de llamas rojas produjeran chispas que diesen lugar a fuegos rojos, y así sucesivamente, entonces tendríamos una herencia verdadera. Pero no es esto lo que ocurre. Si vemos una llama azul pensaremos que debe haber sales de cobre en esa zona, y no que el fuego debió iniciarse a partir de una chispa producida por algún otro fuego de llamas azules en algún otro lugar.

La diferencia entre los fuegos y los conejos, los seres humanos o los dientes de león reside en esto. Incidentalmente, no hay que dejarse confundir por el hecho de que los conejos tienen dos padres y cuatro abuelos mientras que los fuegos tienen sólo un padre y un abuelo. Se trata de una diferencia importante, pero no es ésta la que ahora nos ocupa. Si sirve de ayuda, uno puede pensar no en conejos, sino en insectos palo o áfidos, en los que las hembras pueden tener hijas, nietas y bisnietas sin que intervengan nunca los machos. La forma, color, tamaño y temperamento de un insecto palo están influidos, sin duda, por el lugar y el clima de su desarrollo, pero también lo están por la chispa que vuela exclusivamente de madre a hija.

¿Qué es, pues, esta misteriosa chispa que vuela de padres a hijos pero no de un fuego a otro? En este planeta es el DNA, la molécula más asombrosa del mundo. Es fácil pensar en el DNA como la información a partir de la cual un cuerpo fabrica otro cuerpo igual a sí mismo. Sería más correcto, sin embargo, considerar al cuerpo como el vehículo utilizado por el DNA para producir más DNA igual a sí mismo. Todo el DNA que existe en el mundo en cierto momento, como puede ser ahora mismo, procede de una cadena ininterrumpida de antepasados exitosos. No hay dos individuos (excepto los gemelos idénticos) que posean exactamente el mismo DNA. Las diferencias entre el DNA de los individuos contribuyen realmente a su supervivencia y a las posibilidades de que ese mismo DNA se reproduzca. Repitémoslo, porque es importante: el DNA que ha llegado hasta nosotros es DNA que,

durante cientos de millones de años, ha habitado en el cuerpo de antepasados exitosos. Montones de antepasados potenciales han muerto jóvenes, o no han conseguido encontrar una pareja. Ninguno de ellos nos ha dejado su DNA.

Llegados a este punto, sería fácil cometer el error de pensar que algo, algún elixir del éxito, algún olor de santidad procedente de los cuerpos ancestrales aptos y exitosos, «se pega» al DNA cuando éste pasa a su través. No ocurre nada de eso. El río de DNA que fluye a través de nosotros y hacia el futuro es un río puro que (mutaciones aparte) nos deja tal como nos encontró. Para ser exactos, se mezcla continuamente en la recombinación sexual. La mitad del DNA de nuestro cuerpo procede de nuestro padre y la otra mitad de nuestra madre. Cada uno de nuestros espermatozoides u óvulos contendrá una mezcla distinta obtenida a partir del afluente genético procedente de nuestro padre y del afluente genético procedente de nuestra madre. Pero la afirmación anterior sigue siendo cierta. No hay nada procedente de los antepasados exitosos que «se pegue» a los genes a medida que éstos pasan en su camino hacia el distante futuro.

La explicación darwiniana de por qué los seres vivos hacen tan bien lo que hacen es muy simple. Su aptitud es fruto de la sabiduría acumulada de sus antepasados. Pero no es una sabiduría que hayan aprendido o adquirido. Es una sabiduría que les vino dada a través de mutaciones aleatorias exitosas, sabiduría que después se registró de manera selectiva, no aleatoria, en la base de datos genética de la especie. La cantidad de suerte en cada generación no es muy grande; de hecho es lo bastante pequeña para resultar creíble incluso a los físicos escépticos citados al principio. Pero, dado que la suerte se ha estado acumulando a lo largo de tantas generaciones, al final nos sentimos profundamente impresionados por la aparente improbabilidad del producto final. Todo el circo darwiniano depende de (se sigue de) la existencia de la herencia. Cuando escribí que la herencia era el ingrediente básico quise decir que el darwinismo, y por lo tanto la vida, se concretará, de manera más o menos inevitable, en cualquier planeta del universo en el que surja algo equivalente a la herencia.

Hemos llegado de nuevo al monte Improbable, de nuevo a «desmenuzar» la suerte: tomar lo que parece una suerte inmensa (la que se necesita para fabricar un ojo allí donde antes no había ojo alguno, por

ejemplo) y explicarla dividiéndola en gran cantidad de pequeños fragmentos de suerte, cada uno de los cuales se ha ido sumando de forma acumulativa a lo ya obtenido. Ahora vemos cómo funciona esto en realidad, mediante la acumulación de grandes cantidades de pequeños fragmentos de suerte ancestral en el DNA superviviente. Junto a una minoría de individuos supervivientes, bien dotados genéticamente, ha habido un gran número de individuos menos favorecidos que pereció. Cada generación tiene sus fracasos darwinianos, pero cada individuo desciende sólo de las minorías exitosas de las generaciones previas.

El mensaje de la montaña es triple. En primer lugar está el mensaje que ya hemos presentado: no puede haber saltos súbitos hacia arriba, ni incrementos repentinos de complejidad ordenada. En segundo lugar, no se puede ir cuesta abajo; las especies no pueden empeorar como preludio de una mejora. En tercer lugar, puede haber más de un pico, más de un modo de resolver el mismo problema, todos presentes en el mundo.

Tómese cualquier parte de cualquier animal o planta, y será inteligente preguntarse de qué modo se ha formado dicha parte mediante la transformación gradual de alguna otra parte de un antepasado más antiguo. En ocasiones podemos seguir el proceso a través de fósiles cada vez más jóvenes. Un famoso ejemplo es la derivación gradual de nuestros huesos auditivos mamíferianos (los tres huesos que transmiten el sonido, con una magnífica igualación de impedancia, por si acaso el lector conoce la jerga técnica, del tímpano al oído interno). La evidencia fósil demuestra claramente que estos tres huesos, el martillo, el yunque y el estribo, descienden linealmente de tres huesos correspondientes que, en nuestros antepasados reptilianos, formaban la articulación de la mandíbula.

Con frecuencia el registro fósil no se muestra tan obsequioso. Tenemos que conjeturar posibles etapas intermedias, a veces con una pizca de inspiración procedente de otros animales modernos que pueden estar emparentados o no con el que es objeto de estudio. La trompa del elefante no contiene huesos y no se fosiliza, pero no nos hacen falta fósiles para convencernos de que la trompa del elefante comenzó siendo una simple nariz. Ahora es..., bien, permítaseme citar unos párrafos de un libro que, siempre que lo leo, me emociona hasta las lágrimas: *Battle for the Elephants*, de una pareja de héroes, Iain y

Oria Douglas-Hamilton. Estos autores escribieron capítulos alternos, y he aquí la horrorizada descripción que hace Oria, en la página 220, de una «entresaca»* de elefantes que presencié en Zimbabwe:

«Miré una de las trompas desechadas y pensé en cuántos millones de años debieron ser necesarios para crear un milagro tal de la evolución. Equipada con cincuenta mil músculos y controlada por un cerebro de complejidad pareja, puede retorcer y empujar con una fuerza de varias toneladas. Pero, al mismo tiempo, es capaz de realizar las operaciones más delicadas, como arrancar una pequeña vaina con semillas y abrirla en la boca. Este órgano versátil es un sifón capaz de contener cuatro litros de agua para beberla luego o rociarla sobre el cuerpo, de actuar como un dedo extendido y como una trompeta o un altavoz.

»La trompa tiene, asimismo, funciones sociales: caricias, insinuaciones sexuales, transmisión de seguridad, salutación y abrazos mutuamente entrelazados; y en los machos puede convertirse en un arma para golpear y agarrarse como luchadores cuando los colmillos entrechocan y cada macho busca dominar, jugando o de veras. Y allí yacía, amputada como tantas trompas de elefante que he visto por toda África».

El párrafo ha tenido en mí el efecto usual...

Aquí, el mensaje de la montaña es que los antepasados de los elefantes tuvieron que haber incluido una serie continua de formas intermedias con narices más o menos alargadas, como los tapires, las ratas de trompa, los náxicos o los elefantes marinos. Ninguno de estos animales está estrechamente emparentado con los elefantes (y tampoco lo están entre sí). Todos ellos han desarrollado evolutivamente su larga nariz de forma mutuamente independiente y probablemente por razones distintas (figura 3.1).

En la evolución del elefante a partir de sus antepasados de nariz corta tuvo que haber existido una sucesión suave y gradual de narices cada vez más largas, un gradiente de músculos que se engrosaban y de nervios dispuestos de manera cada vez más intrincada. Debió de darse

* Eliminación de un número determinado de animales de la población para evitar que ésta aumente hasta niveles incompatibles con la capacidad de carga del medio. Es éste un triste contrasentido de la protección: algunas especies (como el elefante africano) medran más allá de la capacidad del hábitat para sustentarlas, y la gestión de las áreas protegidas exige reducir periódicamente su número. (*N. del T.*)

el caso de que, a medida que se añadía un centímetro adicional a la longitud de la trompa promedio, ésta hacía cada vez mejor su trabajo. Nunca será posible decir algo parecido a: «Esta trompa de tamaño medio no es buena porque no es ni una cosa ni otra, queda entre dos niveles; pero no importa, démosle unos cuantos millones de años más y será perfecta». Ningún animal se ganó la vida meramente por hallarse en la senda evolutiva hacia algo mejor. Los animales se ganan la vida comiendo, evitando ser comidos y reproduciéndose. Si una trompa de tamaño medio hubiera sido siempre menos eficiente para estos fines que una nariz pequeña o una trompa grande, la trompa grande no hubiera evolucionado nunca.

Pero el que la trompa tuviera que ser útil en todos sus estadios intermedios no significa que tuviera que ser útil para el mismo objetivo a través de todos los estadios intermedios. La elongación inicial pudo haber proporcionado una ventaja que no tuviera nada que ver con recoger objetos. Quizás en sus primeras fases la nariz se hizo más larga para aumentar el sentido del olfato, como en las ratas de trompa; o quizá servía como resonador para las llamadas, como en los elefantes marinos; o quizás era un adorno para atraer a la pareja, como (por contrario que pueda parecer a nuestro sentido de la estética) en los náscicos. Por otra parte, también es posible que la utilidad de la trompa como «mano» se hiciese patente muy pronto en su evolución, cuando todavía era muy corta. Esta suposición resulta plausible si nos fijamos en los tapires, que utilizan su nariz prensil para coger hojas y llevárselas a la boca. Evoluciones distintas de dispositivos similares en animales diferentes pueden esclarecer nuestra comprensión de los mismos.

En el caso específico de la trompa del elefante, las partes duras del cráneo que sí se fosilizan ofrecen evidencias sugerentes, especialmente los colmillos y huesos asociados. En la actualidad sólo hay dos especies de elefantes, únicos supervivientes de una radiación en otro tiempo muy rica de animales con colmillos que prosperaban en todos los continentes. Los colmillos de los elefantes modernos son en realidad los incisivos superiores, que están enormemente alargados. Pero muchas formas fósiles, como algunos mastodontes, poseían incisivos inferiores más prominentes y dirigidos también hacia delante. A veces eran grandes y aguzados como los colmillos que hoy vemos sólo en la mandíbula superior. En otras especies eran planos, de manera que am-

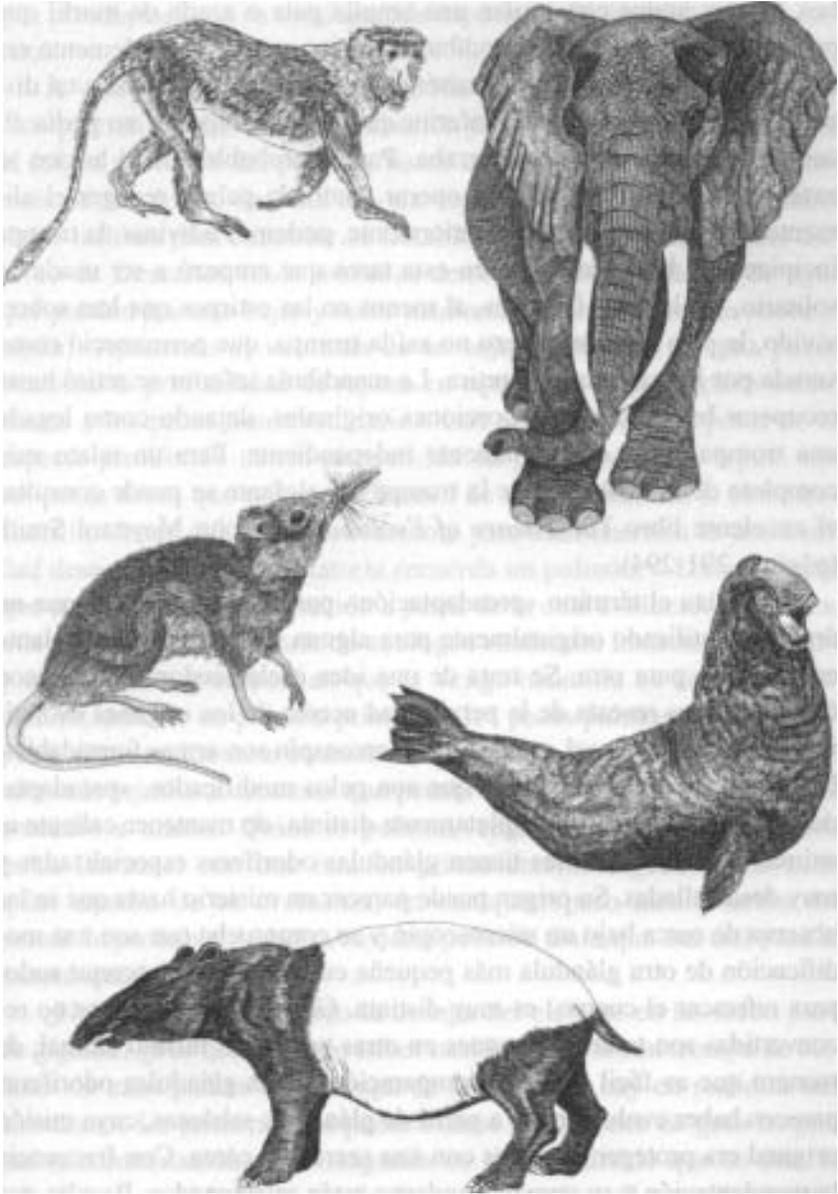


Figura 3.1. Elefante africano, *Loxodonta africana*, y mamíferos de hocico largo no emparentados con el elefante y que seguramente desarrollaron su larga nariz por razones independientes: (en sentido contrario a las agujas del reloj, desde la parte superior izquierda) el náscico o nasio, *Nasalis larvatus*, rata de trompa, *Rhynchocyon petersi* (una musaraña); el tapir malayo, *Tapirus indicus*, y el elefante marino del sur, *Mirounga leonina*.

Los dientes juntos constituían una amplia pala o azada de marfil que prolongaba la línea de la mandíbula inferior, y que probablemente era utilizada para extraer raíces y tubérculos. La pala se extendía a tal distancia frente a la mandíbula inferior que el labio superior no podía alcanzar la comida que desenterraba. Parece probable que el hocico se extendiese originalmente para operar contra la pala y recoger el alimento que ésta excavaba. Posteriormente, podemos adivinar, la trompa incipiente se hizo tan buena en esta tarea que empezó a ser usada en solitario, sin la pala. Después, al menos en las estirpes que han sobrevivido, la pala se redujo, pero no así la trompa, que permaneció como varada por la marea que se retira. La mandíbula inferior se retiró hasta recuperar bastante sus proporciones originales, dejando como legado una trompa ahora completamente independiente. Para un relato más completo de la evolución de la trompa del elefante se puede consultar el excelente libro *The Theory of Evolution*, de John Maynard Smith (páginas 291-294).

Se utiliza el término «preadaptación» para los casos en los que un órgano es utilizado originalmente para alguna finalidad y más adelante es adoptado para otra. Se trata de una idea esclarecedora, porque con frecuencia nos rescata de la perplejidad acerca de los orígenes evolutivos de una estructura. Las púas del puercoespín son armas formidables. No surgieron de la nada, sino que son pelos modificados, «preadaptados» para la finalidad, completamente distinta, de mantener caliente al animal. Muchos animales tienen glándulas odoríferas especializadas y muy desarrolladas. Su origen puede parecer un misterio hasta que se las observa de cerca bajo un microscopio y se comprueba que son una modificación de otra glándula más pequeña cuya finalidad (secretar sudor para refrescar el cuerpo) es muy distinta. Glándulas sudoríparas no reconvertidas son todavía comunes en otras partes del mismo animal, de manera que es fácil hacer la comparación. Otras glándulas odoríferas parecen haber evolucionado a partir de glándulas sebáceas, cuya misión original era proteger los pelos con una secreción cérea. Con frecuencia la preadaptación y su sucesor moderno están relacionados. Resulta que el sudor huele, y resulta que es secretado cuando el animal se halla emocionalmente excitado (existe la creencia popular de que el miedo hace sudar a las personas, y sé que a mí me ocurre cuando una conferencia importante no me sale conforme a lo previsto). El paso de la anti-

gua preadaptación a su contrapartida especializada fue, por lo tanto, natural.

A veces no es tan evidente qué fue primero, cuál es la preadaptación primaria y cuál la especialización posterior. Darwin, pensando en el origen evolutivo del pulmón, buscó una respuesta en la vejiga natatoria de los peces. Se trata de una vejiga llená de gas que los peces óseos utilizan para controlar su flotabilidad según el principio del diablillo de Descartes (esos muñecos dentro de botellas llenas de agua que pueden hacerse bajar y subir mediante una suave presión sobre el tapón). Ajustando el volumen de su vejiga natatoria, un pez puede controlar la profundidad de reposo en equilibrio. Esto se aplica únicamente a los peces óseos ordinarios. Los tiburones (que a pesar de su aspecto pisciforme tienen en realidad un parentesco más lejano con los peces óseos que nosotros) carecen de vejiga natatoria y, en consecuencia, tienen que nadar activamente para mantenerse a la profundidad deseada. La vejiga natatoria recuerda un pulmón, y Darwin pensó que podría ser la preadaptación a partir de la cual evolucionaron nuestros pulmones. La mayoría de zoólogos modernos invierten este carro y este caballo, y sospechan que la vejiga natatoria es una modificación reciente de un pulmón primitivo (los peces pulmonados, que respiran aire, son bastante comunes todavía hoy). Sea cual sea la estructura más primitiva, tenemos que pensar qué fue lo que, incluso antes, precedió a ambas. Quizá el pulmón/vejiga natatoria surgió de una bolsa intestinal con una función primariamente digestiva. En cualquier estadio de su evolución, en cualquier paso ladera arriba del monte Improbable, la bolsa/cavidad/pulmón tenía que ser útil para el animal que la portaba.

¿No podría haber surgido la trompa del elefante en un único paso de gigante? ¿Por qué no pudo haber nacido una cría con trompa de elefante de unos padres con trompa de tapir? Aquí hay en realidad tres cuestiones. La primera es si pueden darse mutaciones de gran magnitud (macromutaciones). La segunda es si, suponiendo que se den, la selección natural las favorecería. La tercera, más sutil, es qué entendemos por «grande» cuando hablamos de cambio mutacional grande. Volveré a hacer aquí la distinción que ya hice en un libro anterior entre «macromutaciones tipo Boeing 747» y «macromutaciones tipo DC8 alargados».

La respuesta a la primera de las tres cuestiones es sí. Efectivamente, las macromutaciones suceden. A veces nacen hijos radical y monstruosamente distintos de uno y otro progenitor, y del resto de miembros de la especie. El sapo de la figura 3.2 fue encontrado por dos niñas en el jardín del fotógrafo Scott Gardner, del *Hamilton Spectator*, en Hamilton, Ontario. Las niñas lo pusieron sobre la mesa de la cocina para que Gardner lo fotografiara. No tenía ojos en la parte externa de la cabeza, pero cuando abría la boca —relata el señor Gardner— parecía ser más consciente de su entorno. Según parece el animal fue llevado para su examen al departamento de veterinaria de la Universidad de Guelph, pero hasta ahora no he encontrado ningún informe completo sobre él. Estos infortunados monstruos son interesantes porque nos suelen ofrecer indicios de la forma en que tiene lugar el desarrollo embrionario normal. No todos los defectos de nacimiento humanos son genéticos (están, por ejemplo, los causados por la talidomida) pero muchos sí lo son. Un único gen dominante produce la acondroplasia, una reducción importante de los huesos de los miembros que se traduce en una baja estatura y proporciones inusuales. Las mutaciones de gran alcance como ésta («macromutaciones») se denominan a veces saltaciones. El gen de la acondroplasia se suele heredar de un progenitor, pero muy raras veces aparece de forma espontánea por mutación, y así es como debió surgir en un principio. Una mutación espectacular de esta clase pudo (en teoría, aunque dudo mucho que lo hiciera en la práctica) haber dado origen a una extensión abrupta y súbita de la nariz, de la longitud del tapir a la del elefante, en una sola generación.

En cuanto a la segunda cuestión (si, una vez surgida una macromutación «monstruosa», la selección natural podría llegar a favorecerla), uno puede pensar que no es éste el tipo de pregunta que tiene una respuesta general. Parece obvio que la respuesta varía según el caso considerado (por ejemplo, sí para la acondroplasia, no para los terneros de dos cabezas). En realidad, el equivalente del gen para la acondroplasia en el perro ha sido favorecido positivamente por la selección artificial que hacen los criadores humanos, y no únicamente para atender caprichos ociosos, sino para producir perros útiles. Los tejoneras (más conocidos como perros salchicha) fueron criados para que pudieran introducirse en las galerías de los tejones, y una parte significativa del



Figura 3.2. Las macromutaciones también ocurren. Este sapo monstruoso con los ojos en el techo de la boca parece haber sido encontrado vivo en un jardín canadiense. La fotografía se publicó originalmente en un periódico local, el *Hamilton Spectator*.

modelado genético que condujo a esta raza fue la incorporación del gen de la acondroplasia. Es posible que en la naturaleza una gran mutación, como la acondroplasia, pueda abrir de pronto una vía hacia un nuevo tipo de vida o una nueva dieta: un animal enano, aunque muy penalizado cuando se trata de perseguir a las presas en campo abierto, descubre de pronto que, a diferencia de la mayoría de sus colegas, puede perseguir a su presa en el interior de su guarida.

Los teóricos de la evolución han sugerido a veces que en la naturaleza las grandes saltaciones se incorporan al cambio evolutivo. El famoso genético germanoamericano Richard Goldschmidt defendió esta teoría bajo el lema memorable de «teoría del monstruo prometedor». Mencionaré un posible ejemplo en el capítulo 7. Pero la teoría de Goldschmidt nunca ha sido ampliamente aceptada, y existen razones generales para dudar que las macromutaciones o los monstruos sean importantes para la evolución. Los organismos son máquinas extremadamente complicadas y finamente ajustadas. Si se toma una máquina

complicada, incluso una que no funcione de manera óptima, y se produce una gran alteración al azar en sus entrañas, la probabilidad de que mejore es ciertamente muy baja. Pero si la alteración aleatoria es muy pequeña sí se la puede mejorar. Si la antena de nuestro televisor no está convenientemente alineada, un pequeño giro al azar de la misma tiene aproximadamente una probabilidad de 50-50 de mejorar las cosas. Esto es así porque, fuera cual fuera la dirección en la que debiera estar orientada la antena, hay un 50 por ciento de probabilidades de que nuestro pequeño giro aleatorio sea en aquella dirección. Pero si torcemos la antena violentamente con un ángulo de giro muy grande, lo más probable es que las cosas empeoren. Esto se debe en parte a que, aunque el giro se haga en el sentido adecuado, seguramente excederá el ángulo correcto. Con más generalidad, esto es así porque hay muchas más maneras de ajustar mal la antena que de ajustaría bien. Un mecanismo complicado que después de todo funciona no puede estar lejos del ajuste correcto. Un pequeño cambio aleatorio puede mejorarlo y, aunque empeore las cosas, tampoco lo alejará mucho de la disposición correcta. Pero un cambio aleatorio muy grande equivale a muestrear el enorme conjunto de todas las disposiciones posibles, y la inmensa mayoría de ellas es inoperante.

Incluso la experiencia común de que un televisor que funciona mal puede con frecuencia arreglarse dándole un buen golpe no contradice mi razonamiento. El televisor es una máquina robusta y, por violento que sea este golpe, no tendrá necesariamente un gran efecto sobre la disposición de las partes. Lo que sí puede hacer es cambiar ligeramente la posición de cualquier parte que se haya aflojado, y es muy probable que sea esta parte la que esté provocando el comportamiento defectuoso.*

Volviendo a los seres vivos, escribí en *El relojero ciego* que «aunque puede haber muchas maneras de estar vivo, lo cierto es que hay

* Judith Flanders me ha llamado la atención sobre el siguiente relato, relevante y divertido, del libro de Robert X. Cringley *Accidental Empires* (Imperios accidentales). Se refiere al Apple III, un ordenador personal de la generación intermedia entre el famoso Apple II y el aún más famoso Macintosh, que salió al mercado en 1980: «... la maquinaria automática que insertaba docenas de *chips* en la placa de circuitos principal no los apretaba con la presión suficiente en sus encajes. La respuesta de Apple fue informar a 90.000 clientes que cogieran cuidadosamente su Apple III, lo mantuvieran a una altura de 30 a 45 centímetros sobre una superficie plana y después lo dejaran caer, con la esperanza de que el golpe resultante afianzara todos los *chips*.» (N. del A.)

muchísimas más maneras de estar muerto». (Sería inhumano si no confesara mi deleite por el hecho de que esta afirmación se haya abierto camino hasta el diccionario de citas de Oxford.) Si uno piensa en todas las formas posibles de ordenar las partes de un animal, casi todas ellas corresponderían a un animal muerto; más exactamente, la mayor parte de tales animales no llegaría a nacer. Cada especie de animal y de planta es una isla de viabilidad situada en un vasto mar de ordenaciones concebibles de las que la gran mayoría, si es que alguna vez llegara a existir, moriría. El océano de todos los animales posibles incluye animales con los ojos en la planta de los pies, animales con cristalinos en los oídos en lugar de en los ojos, animales con un ala izquierda y una aleta derecha; animales con cráneos alrededor del estómago y nada alrededor de su cerebro. No tiene objeto seguir inventando. He dicho lo suficiente para demostrar que las islas de supervivencia, por extensas y numerosas que puedan ser, son minúsculas en tamaño e infinetismales en número cuando se comparan con el océano de inviabilidad muerta.

El progenitor de un hijo mutante, dado que está vivo, tiene que estar instalado cómodamente en una de las islas. Una pequeña mutación (un alargamiento fraccional de un hueso de la pierna aquí, un delicado ajuste en un ángulo de la mandíbula allí) simplemente desplaza al hijo a un sector distinto de la misma isla, o bien puede reclamar un pequeño banco de arena mar adentro y unirlo a la tierra firme. Pero una mutación grande, un cambio drástico, monstruoso, revolucionario, es equivalente a un salto alocado hacia no se sabe dónde. El macromutante es catapultado en una dirección aleatoria, a muchas leguas de su hogar insular. Es *posible* que casualmente aterrice en otra isla. Pero, al ser el océano tan grande y las islas tan pocas y pequeñas, las posibilidades son ínfimas. Puede ocurrir de forma muy ocasional una vez cada varios millones de años, y cuando ocurre puede tener un impacto espectacular en el curso de la evolución.

No debemos llevar demasiado lejos la metáfora de las islas. Hay mucho de equívoco en ella. Todas las especies están relacionadas entre sí, lo que significa que tiene que haber maneras de viajar, a través del océano de posibilidades, desde cualquier forma de estar vivo a cualquier otra. La metáfora de las islas no nos sirve de ayuda aquí. La del monte Improbable es mejor. Las islas sirven para el fin concreto de es-

cenificar la idea de que cuanto más drástica y monstruosa es una mutación, menos probable es que se vea favorecida.

También es necesario distinguir entre distintos tipos de macromutación. Al invocar animales imaginarios con ojos en la planta de los pies y cristalinos en los oídos me concentré en los cambios en la disposición de las partes. Ciertamente, es muy poco probable que los cambios drásticos de esta clase tengan suerte y sobrevivan. Pero también pueden darse cambios importantes en la magnitud de una parte, sin que ello suponga una redistribución del resto. Un ejemplo sería la proyección súbita de una nariz como la del tapir a una trompa como la del elefante, suponiendo que el alargamiento fuera el único cambio. Es menos evidente que un cambio drástico de este tipo constituya necesariamente un salto en el océano de lo inoperante o lo muerto.

He prometido que volvería a las macromutaciones «tipo Boeing 747» y «tipo DC8 alargados». Recordemos el razonamiento de Sir Fred Hoyle sobre los depósitos de chatarra y los 747 y su afirmación de que la evolución por selección natural de una estructura complicada tal como una molécula de proteína (o, implícitamente, de un ojo o un corazón) es tan probable como que un huracán tuviera la suerte de montar un Boeing 747 al remolinear a través de un depósito de chatarra. Si hubiera dicho «casualidad» en lugar de «selección natural», hubiera estado en lo cierto. En realidad, lamento tener que citar su persona como exponente del profundo malentendido de que la selección natural *es* casualidad. Cualquier teoría que espere que la evolución ensamble una máquina nueva y compleja como un ojo o una molécula de hemoglobina en un único paso y partiendo de cero está exigiendo demasiado de la casualidad. En esta teoría, la selección natural apenas tiene nada que hacer. Todo el trabajo de «diseño» corre a cargo de la mutación, una única mutación de gran magnitud. Es este tipo de macromutación la que merece la metáfora del 747 y el depósito de chatarra, y por eso la llamo macromutación tipo Boeing 747. Las mutaciones tipo Boeing 747 no existen y no tienen ninguna conexión con el darwinismo.

Volviendo a mi otra analogía con aviones de pasajeros, el DC8 alargado es como un DC8 ordinario, solo que bastante más largo. El diseño fundamental es el mismo, pero la parte media del fuselaje ha sido prolongada. Hay también más asientos, más gavetas para equipaje

y más de todos los elementos que se repiten a lo largo de la longitud de un avión. Es igualmente obvio el alargamiento de los cables, tubos y alfombras que discurren a lo largo del fuselaje de cualquier avión de pasajeros. Aunque no es tan evidente, es seguro que debe haber numerosas modificaciones consecuentes en otras partes del avión, necesarias para la nueva misión de elevar del suelo una mayor longitud de fuselaje. Pero la diferencia entre el DC8 y el DC8 alargado se reduce fundamentalmente a una única macromutación: de repente, el fuselaje se ha hecho mucho más largo que el de su predecesor. No ha habido una serie gradual de formas intermedias.

Las jirafas han evolucionado a partir de un antepasado bastante parecido al moderno okapi (figura 3.3). El cambio más conspicuo es la elongación del cuello. ¿Podría haber sido producto de una mutación drástica, única? Me apresuro a decir que estoy seguro de que no fue así. Pero con esto no quiero decir que no pudo ser así. Una mutación tipo Boeing 747 que dé lugar a un ojo enteramente nuevo (completo, con un iris y un cristalino enfocable, surgido de la nada, como Palas Atenea de la ceja de Zeus) no puede suceder *nunca*, ni en un billón de billones de años. Pero, al igual que el alargamiento del DC8, el cuello de la jirafa pudo haber surgido en un único paso mutacional (aunque yo apuesto a que no). ¿Cuál es la diferencia? No es que el cuello sea mucho menos complicado que el ojo. Por lo que yo sé, puede ser incluso más complejo. No, lo importante aquí es la *diferencia* de complejidad entre el cuello original y el derivado. Esta diferencia es ligera, al menos si se compara con la diferencia entre la ausencia de ojo y un ojo moderno. La disposición de las partes del cuello de la jirafa es igual de compleja que la del cuello del okapi (y, presumiblemente, el antepasado de cuello corto de la jirafa). Hay la misma secuencia de siete vértebras, cada una con sus vasos sanguíneos, nervios, ligamentos y paquetes musculares asociados. La diferencia es que cada vértebra es mucho más larga, y todas sus partes asociadas están estiradas o espaciadas en proporción.

El punto importante es que para cuadruplicar la longitud del cuello es posible que baste con cambiar una cosa en el embrión en desarrollo. Pongamos que sólo cambie la tasa de crecimiento de los primordios vertebrales, y de ahí se sigue todo lo demás. Pero para conseguir que se forme un ojo a partir de la piel desnuda hay que cambiar no una

tasa, sino cientos (véase el capítulo 5). Si un okapi mutara para adquirir un cuello de jirafa, estaríamos ante una macromutación tipo DC8 alargado, no una macromutación tipo Boeing 747. Es una posibilidad que no debe descartarse por completo. No se añade nada nuevo, en el sentido de complicación. El fuselaje se alarga, con todo lo que eso implica, pero es un alargamiento de la complejidad ya existente, no una introducción de nueva complejidad. Lo mismo valdría si la jirafa tuviera más de siete segmentos cervicales. El número de vértebras en las distintas especies de serpientes varía entre 200 y 350. Dado que todas las serpientes son primas, y dado que las vértebras no pueden presentarse en mitades o cuartos, esto sólo puede significar que, de vez en cuando, nace una serpiente con una vértebra de más, o de menos. Estas mutaciones merecen la denominación de macromutaciones, y es evidente que la evolución las ha incorporado porque todas esas serpientes existen. Son mutaciones DC8, porque implican la duplicación de una complejidad existente, no la invención 747 de nueva complejidad.

Hay algo que podría venir en ayuda evolutiva del monstruoso macromutante, y es el hecho de que el efecto de un gen determinado depende de los otros genes presentes en el mismo cuerpo. El efecto de un gen sobre un cuerpo (lo que se conoce como efecto fenotípico) no está escrito encima suyo. No hay nada en el código de DNA del gen de la acondroplasia que un biólogo molecular pueda descodificar como «corto» o «enano». Este gen sólo ejerce su efecto de acortar las extremidades cuando está rodeado de otros muchos genes, por no decir nada de los factores ambientales. El significado de un gen depende del contexto. El embrión se desarrolla en un clima producido por todos los genes. El efecto que tiene un gen determinado sobre el embrión depende del clima en que está inmerso. R.A. Fisher, al que ya he citado, expresó esto mismo hace mucho tiempo al decir que algunos genes actúan como «modificadores» de los efectos de otros. Adviértase que esto no significa que esos genes modifican el código de DNA de otros. Es evidente que no. Los modificadores simplemente cambian el clima, de tal manera que modifican los efectos de otros genes sobre el cuerpo, no su secuencia de DNA.

Como hemos visto, no es del todo inconcebible que un progenitor con una probóscide de 15 centímetros, tipo tapir, pudiera haber producido un hijo mutante con una trompa de metro y medio, tipo elefante,

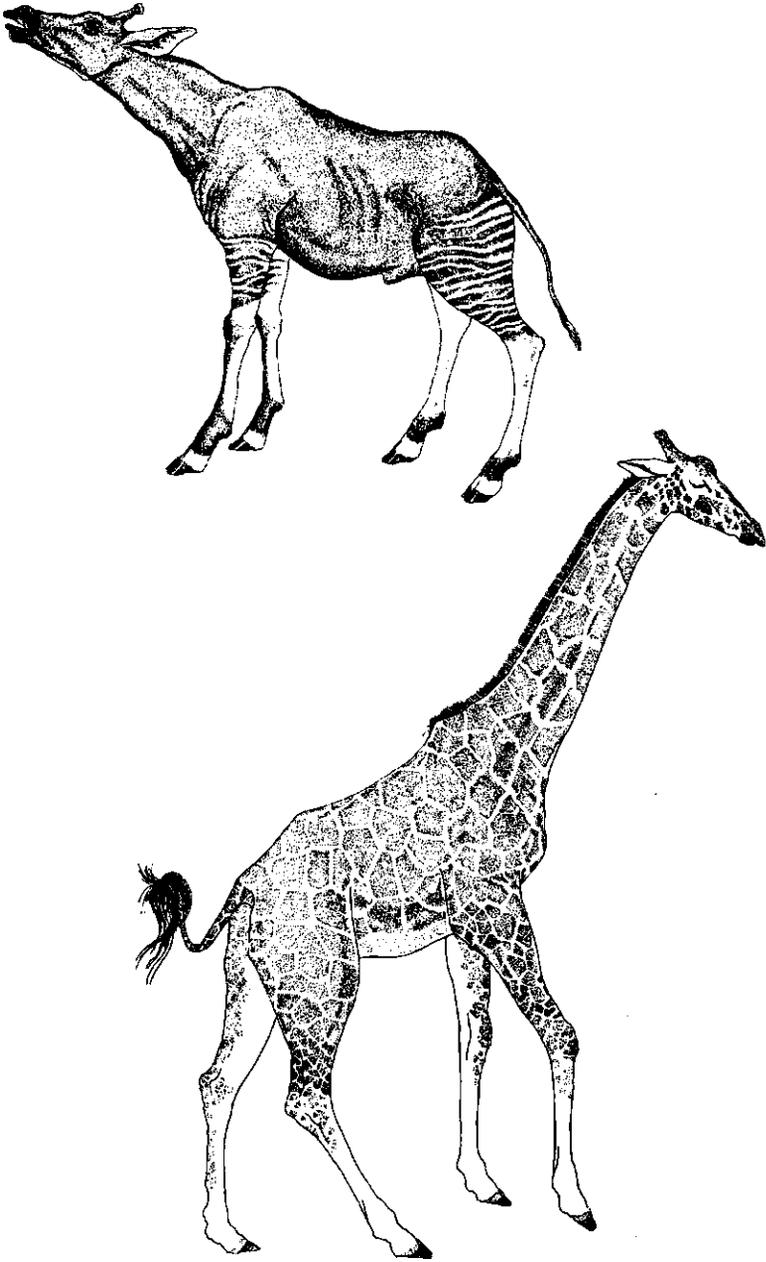


Figura 3.3. Etapas para obtener un cuello largo. El okapi, *Okapia johnstoni*, que podría parecerse a un antepasado de las jirafas modernas, y la jirafa, *Giraffa camelopardalis reticulata*.

en una sola generación mediante un cambio en un gen, una macromutación. Es muy improbable que la nueva nariz hubiera funcionado de inmediato como una trompa funcional y apta. Aquí es donde podrían venir teóricamente al rescate los genes «modificadores» y la noción de «clima» genético. Mientras la macromutación tenga alguna utilidad, aunque sólo se insinúe, de manera que los individuos que la posean no se extingan, la subsiguiente selección de genes modificadores puede refinar los detalles y pulir las aristas. Piénsese en la irrupción de la mutación principal dentro de la población como algo equivalente a un reto cataclísmico (como una glaciación, por ejemplo). Del mismo modo que una glaciación hace que se seleccione toda una serie de genes, un cambio mutacional drástico, tal como un repentino alargamiento de la nariz, afecta al cuerpo promedio.

Los genes que se encargan de «pulir» una mutación importante nueva no trabajan sólo sobre los efectos más evidentes del gen principal. Pueden actuar sobre alguna parte del cuerpo inesperada y distante para compensar, mitigar los efectos negativos o aumentar los posibles beneficios de la mutación. Como secuela de una nariz muy alargada, y puesto que la trompa aumenta el peso de la cabeza, será necesario reforzar los huesos del cuello. Puede cambiar el equilibrio del cuerpo entero, con efectos encadenados posteriores, quizá sobre la columna vertebral y la pelvis. Toda esta selección consiguiente opera sobre decenas de genes que afectan a muchas partes distintas del cuerpo.

Aunque he introducido la idea de «pulido ulterior» en el contexto de las macromutaciones, este tipo de selección es ciertamente importante en la evolución en general. Incluso las micromutaciones tienen consecuencias tales que un «pulido ulterior» resulta muy deseable. Cualquier gen puede actuar como modificador de los efectos de cualquier otro. Muchos genes modifican los efectos de todos los demás. Algunas autoridades en la materia se atreverían incluso a afirmar que, de los genes que tienen algún efecto (muchos no tienen ninguno), la mayoría modifica la mayor parte de los efectos del resto. Este es otro aspecto de lo que quise decir cuando afirmé que el «clima» en el que tiene que sobrevivir un gen está constituido en gran parte por el resto de genes de la especie.

Aun a riesgo de dedicar a las macromutaciones más tiempo del que merecen, queda una posible fuente de confusión que debo anticipar.

Hay una teoría que ha sido objeto de una hábil campaña publicitaria, y que no deja de tener su interés, conocida como la teoría del «equilibrio interrumpido» (o puntuado). Explicarla en detalle sobrepasaría el alcance de este libro, pero, puesto que ha sido tan promocionada como mal comprendida, tengo que destacar que esta teoría no tiene ninguna conexión legítima con la macromutación (o no debería presentarse como si la tuviera). La teoría del equilibrio interrumpido propone que las estirpes pasan periodos prolongados de estasis, sin cambios evolutivos, interrumpidos por explosiones ocasionales y rápidas de cambio evolutivo que coinciden con el nacimiento de una nueva especie. Pero, por muy rápidas que puedan parecer estas explosiones a escala geológica, siguen abarcando gran número de generaciones, y siguen siendo *graduales*. Es sólo que las formas intermedias suelen sucederse demasiado rápidamente para quedar registradas como fósiles. Esta «interrupción entendida como gradualismo rápido» es muy distinta de la macromutación, que es un cambio instantáneo en una sola generación. La confusión surge en parte porque uno de los dos promotores de la teoría, Stephen Jay Gould (el otro es Niles Eldredge), tiene una debilidad personal por ciertas macromutaciones, y en ocasiones no acaba de subrayar la distinción entre gradualismo rápido y macromutación propiamente dicha (me apresuro a añadir que no me refiero a macromutación milagrosa tipo Boeing 747). Eldredge y Gould hacen bien en preocuparse por el mal uso que de sus ideas hacen los creacionistas que, en mi terminología, vienen a decir que el equilibrio interrumpido trata de macromutaciones tipo 747 (mutaciones que requerirían milagros, y en eso los creacionistas sí están en lo cierto). Gould afirma:

«Dado que propusimos el equilibrio puntuado para explicar las tendencias, resulta enfurecedor ser citado una y otra vez por los creacionistas (no sabría si intencionadamente o por estupidez) como si admitiéramos que el registro fósil no incluye formas de transición. Las formas de transición no existen normalmente al nivel de las especies, pero son abundantes entre los grupos mayores».

El doctor Gould reduciría el riesgo de tal malinterpretación si subrayara con más claridad la distinción radical entre gradualismo rápido y saltación (es decir, macromutación). En función de la definición que

uno adopte, la teoría del equilibrio interrumpido es modesta y posiblemente cierta o bien es revolucionaria y probablemente falsa. Si se difumina la distinción entre gradualismo rápido y saltación se puede hacer que la teoría de la puntuación parezca más radical, pero al mismo tiempo se ofrece una invitación abierta a la malinterpretación, una invitación que los creacionistas aceptarán sin pensárselo dos veces.

Hay una razón absolutamente trivial que explica por qué las formas de transición suelen faltar al nivel de especie. Puedo explicarlo mejor con una analogía. Los niños se transforman de forma gradual y continua en adultos, pero, a efectos legales, se identifica la mayoría de edad con un aniversario concreto, habitualmente los dieciocho años. Por lo tanto, se podría decir: «Hay 55 millones de personas en el Reino Unido, pero ni una sola de ellas es intermedia entre no votante y votante». Así como, por razones legales, un individuo juvenil se torna votante al llegar la medianoche de su decimoctavo aniversario, los zoólogos insisten siempre en clasificar un determinado espécimen en una especie o en otra. Si un espécimen representa una forma intermedia (como pasa con muchos), las convenciones legales de los zoólogos les fuerzan a saltar a uno u otro lado a la hora de ponerle nombre. Por lo tanto, la afirmación de los creacionistas de que no existen formas intermedias tiene que ser cierta *por definición* al nivel de la especie, pero esto no tiene ninguna implicación sobre el mundo real (excepción hecha de las convenciones de nomenclatura zoológica).

Para no buscar más allá de nuestra propia ascendencia, la transición de *Australopithecus* a *Homo habilis*, de éste a *Homo erectus*, y de éste al *Homo sapiens* «arcaico» y al *Homo sapiens* «moderno» es tan gradual que los antropólogos están siempre enzarzados en trifulcas sobre la clasificación de determinados fósiles. Veamos ahora lo que dice un libro de propaganda antievolucionista: «Los hallazgos han sido clasificados como *Australopithecus*, y por lo tanto son simios, o como *Homo*, y por lo tanto son humanos. A pesar de más de un siglo de enérgicas excavaciones y de intenso debate, la caja de cristal reservada para el hipotético antepasado de la humanidad permanece vacía. El eslabón perdido sigue perdido». Uno se queda pensando qué es lo que tiene que hacer un fósil para que se le conceda el certificado de forma intermedia. En realidad, la afirmación citada no dice absolutamente nada sobre el mundo real. Está diciendo algo (bastante insulso) sobre

las convenciones de la nomenclatura biológica. No hay «eslabón perdido», *no importa* cuán intermedio fuera, que pueda escapar de la *force majeure* terminológica que lo enviaría a uno u otro lado de la divisoria. La manera apropiada de buscar formas intermedias consiste en olvidar el nombre de los fósiles y buscar, en cambio, su forma y tamaño reales. Cuando se hace esto, uno encuentra que el registro fósil abunda en transiciones maravillosamente graduales, aunque también existen algunas lagunas (algunas muy grandes, y que se asume corresponden a formas que, simplemente, no se fosilizaron). En cierto modo, nuestros procedimientos de nomenclatura científica están concebidos para una época preevolucionista, cuando las divisorias lo eran todo y no se esperaba encontrar formas intermedias.

Hemos echado un vistazo preliminar al monte Improbable y hemos visto la diferencia entre los ominosos precipicios de un lado y las elementos laderas del otro. Los dos capítulos siguientes examinarán con detalle dos de los picos caros a los creacionistas, porque sus acantilados parecen particularmente empinados: en primer lugar las alas («¿de qué sirve media ala?») y después los ojos («el ojo no funcionará en absoluto a menos que todas sus partes estén en su lugar, por lo tanto no puede haber evolucionado gradualmente»).

Emprendiendo el vuelo



Volar ha sido durante largo tiempo un sueño imposible de la humanidad y, aunque al final lo hemos conseguido, lo hacemos con tal dificultad que es fácil exagerar cuán arduo es: Volar es la segunda naturaleza de la mayoría de especies animales. Modificando un aforismo de mi colega Robert May, en una primera aproximación todas las especies animales vuelan. Esto es así porque, como dijo May en realidad, en una primera aproximación todas las especies animales son insectos. Aun considerando sólo los vertebrados de sangre caliente, sin embargo, sigue siendo correcto decir que más de la mitad de las especies vuela: hay el doble de especies de aves que de mamíferos, y una cuarta parte de las especies mamíferas son murciélagos. Volar nos parece una empresa formidable, más que nada porque somos animales grandes. Es natural que nos llamen más la atención aquellos animales que, como los elefantes o los rinocerontes, nos superan en tamaño, pero, en una primera aproximación, todos los animales son más pequeños que nosotros (figura 4.1).

Si uno es un animal muy pequeño, la conquista del aire no representa ningún problema. Cuando se es muy pequeño, el mayor desafío puede ser permanecer en el suelo. Esta diferencia entre animales grandes y pequeños se deriva de algunos principios ineludibles de la física.

Para objetos de una forma fijada, el peso aumenta desproporcionadamente con la longitud (más concretamente, aumenta en razón directa al cubo de la longitud). Un huevo de avestruz que sea tres veces más largo que un huevo de gallina con la misma forma no pesará tres veces más que este último, sino $3 \times 3 \times 3$, es decir, veintisiete veces más. Hasta que uno se acostumbra a ello, este hecho puede resultar bastante chocante. Si un huevo de gallina constituye el desayuno de una persona, con un huevo de avestruz puede desayunar un pelotón de veinti-

siete personas. El volumen, y con él el peso, aumenta con la tercera potencia (el cubo) de la dimensión lineal. La superficie, en cambio, aumenta con la segunda potencia (el cuadrado) de la dimensión lineal. Esto es más fácil de demostrar con cajas cúbicas, pero la regla es aplicable a todas las formas.

Imaginemos una gran caja cúbica. ¿Cuántas cajas cuyo lado sea exactamente la mitad podrían caber en ella? Puede verse enseguida, si se dibujan las cajas, que la respuesta es ocho. En la caja grande no cabe el doble de manzanas que en una de las cajas pequeñas, sino ocho veces más; no cabe el doble de botes de pintura, sino ocho veces más. Ahora bien, si queremos pintar la superficie de la caja grande, ¿cuántas veces más pintura necesitaremos que para pintar la superficie de una caja pequeña? De nuevo, puede verificarse rápidamente con un dibujo que la respuesta no es ni dos ni ocho, sino cuatro veces más.

La diferencia entre superficie y volumen se hace más contundente cuando se observan objetos de tamaño muy distinto. Supongamos que un fabricante de cerillas construye, con fines publicitarios, una caja de cerillas de dos metros de altura cuando se la pone plana sobre el suelo. Una caja de cerillas típica tiene dos centímetros de altura, de modo que una columna de 100 cajas de cerillas apiladas tendría exactamente la altura de la caja grande, una hilera de 100 cajas de cerillas ocuparía su longitud y una banda de 100 cajas de cerillas abarcaría exactamente su anchura. Así pues, ¿cuántas cajas de cerillas cabrían en la caja grande? La respuesta es $100 \times 100 \times 100$, es decir, un millón. En un sentido la caja grande es sólo 100 veces más grande que una caja de cerillas ordinaria, de manera que un ojo humano ingenuo podría estimar que es unas 100 veces mayor. Pero en otro sentido es un millón de veces mayor, y podrá contener al menos un millón de cajas de cerillas ordinarias (en realidad más, porque el cartón ocupa menos espacio en proporción).

Si suponemos que la caja de cerillas gigante está hecha del mismo tipo de cartón que una caja de cerillas ordinaria, ¿cuál sería el coste relativo del cartón? Esto no depende ni del volumen ni de las dimensiones lineales, sino de la superficie. La caja gigante no necesitaría un millón de veces más cartón, sino sólo 10.000 veces más. La superficie de la caja de cerillas típica es enormemente mayor, *en relación a su peso*, que la superficie de la caja gigante. Si se corta en pedazos una caja de

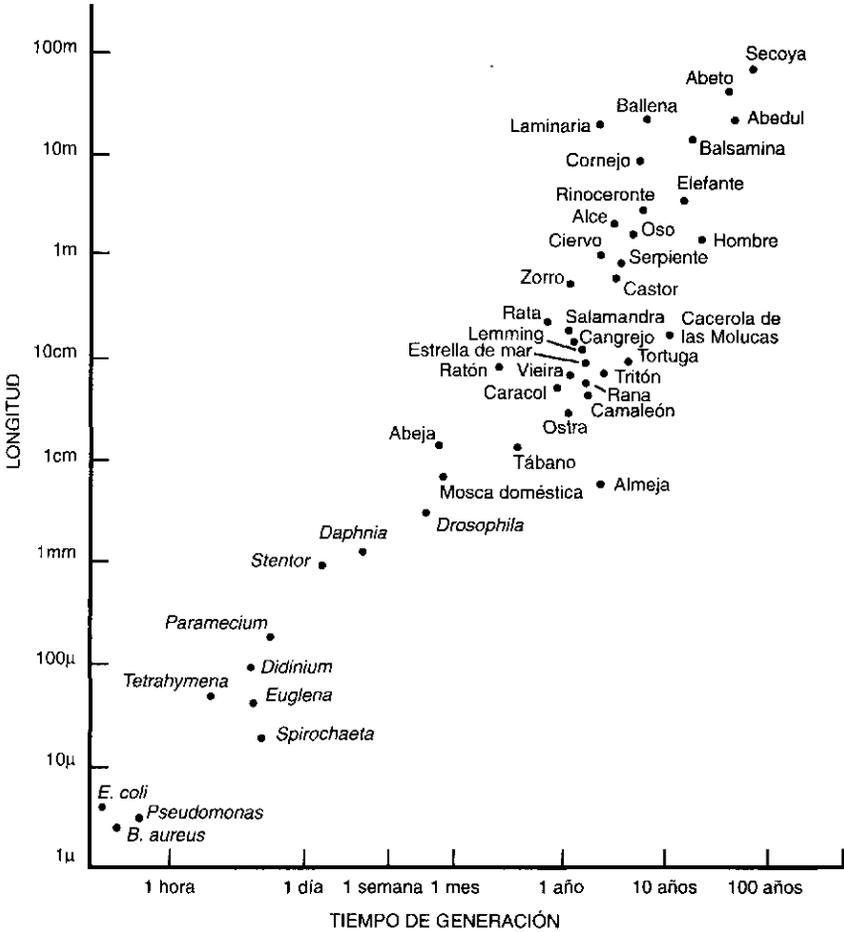


Figura 4.1. Los seres vivos varían en tamaño en aproximadamente ocho órdenes de magnitud. Para ordenar la variación, se ilustra aquí el tiempo de generación en relación al tamaño (ambos parámetros están fuertemente relacionados, por razones que no se comentan aquí). Ambos ejes están dibujados a escala logarítmica, pues de otro modo haría falta un papel de 1.500 kilómetros de longitud para acomodar una secoya en la misma escala que una bacteria.

cerillas, los trozos de cartón resultantes apenas caben en el interior de otra caja de cerillas. Pero si cortamos en pedazos nuestra caja de cerillas gigante, los trozos de cartón apenas ocuparían espacio dentro de otra caja gigante. La relación entre superficie y volumen es una magnitud muy importante. El volumen aumenta en proporción al cubo de la

longitud, mientras que la superficie aumenta en proporción al cuadrado. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera: si la forma se agranda proporcionalmente de manera uniforme, la relación superficie/volumen aumenta en proporción a los dos tercios de la longitud. La relación superficie/volumen es mayor para los objetos pequeños que para los grandes. Los objetos pequeños son más «superficiales» (tienen más superficie relativa) que los objetos grandes de la misma forma.

Ahora bien, en la vida hay cosas importantes que dependen de la superficie, otras del volumen, otras de la dimensión lineal, y aun otras que dependen de combinaciones de los tres. Imagínese un hipopótamo reducido al tamaño de una pulga. La altura (o la longitud, o la anchura) de un hipopótamo típico será entonces unas mil veces la del hipo-pulga. El peso del hipopótamo será mil millones de veces el del hipo-pulga. La superficie del hipopótamo será sólo un millón de veces la del hipo-pulga. Así pues, el hipo-pulga tendrá una superficie 1000 veces mayor *en relación a su peso* que el hipopótamo grande. Parece de sentido común afirmar que a un hipopótamo en miniatura le sería más fácil flotar en la brisa que a un hipopótamo de tamaño normal, pero a veces es importante ver qué hay detrás del sentido común.

Resulta obvio que los animales grandes nunca son meras versiones agrandadas de animales pequeños, y ahora podemos ver por qué. La selección natural no permite el simple agrandamiento, porque es necesario compensar cosas tales como el cambio en la relación superficie/volumen. El hipopótamo tiene alrededor de mil millones de veces más células de las que tendría el hipo-pulga, pero sólo un millón de veces más células dérmicas superficiales. Cada célula requiere oxígeno y alimento y tiene que deshacerse de productos de desecho, de manera que el cuerpo del hipopótamo ingresa y expulsa alrededor de mil millones de veces más materiales que su versión reducida. La piel del hipo-pulga podría representar una fracción significativa de la superficie de intercambio de oxígeno y productos de desecho. Pero la piel del hipopótamo de tamaño real tiene, en proporción, una superficie tan pequeña que hace falta aumentarla sustancialmente para acomodarla a su población celular, mil millones de veces mayor. Esto se consigue con un tubo digestivo largo y replegado, con unos pulmones esponjosos y con unos riñones microtubulares, irrigado todo ello por una red de va-

sos sanguíneos profusamente ramificada. El resultado es que el área interna de un animal grande es mucho mayor que el área superficial. Cuanto más pequeño es un animal, menos necesidad tiene de pulmones, branquias o vasos sanguíneos: la superficie externa del cuerpo es lo bastante amplia para hacerse cargo, sin problemas, del tráfico de entradas y salidas de sus células internas, poco numerosas en proporción al tamaño. Una manera menos precisa de expresar esto es decir que un animal pequeño tiene una proporción mayor de sus células en contacto con el mundo exterior. En un animal grande como el hipopótamo la proporción de células en contacto directo con el exterior es tan pequeña que se hace necesario aumentarla internamente con dispositivos de gran superficie, como pulmones, riñones y capilares sanguíneos.

La tasa de entrada y salida de sustancias no es la única cosa que depende de la superficie corporal. También lo es la tendencia a flotar en el aire. El hipo-pulga sería levantado del suelo por el más ligero soplo de viento. Una corriente térmica podría hacerlo ascender para después volver a posarse blandamente y sin ningún daño en el suelo. En cambio, un hipopótamo de tamaño real caería a plomo hacia un aterrizaje catastrófico y, si se le dejara caer desde una altura proporcional, cavaría su propia tumba. Para el hipopótamo real, volar es un sueño imposible. El hipo-pulga apenas necesitaría ayudarse para hacerlo. En cambio, para que un hipopótamo real pudiese volar habría que acoplarle un par de alas tan grandes que..., bien, el proyecto está condenado al fracaso desde el principio, porque la masa muscular necesaria para accionar estas alas gigantescas sería demasiado pesada para que las propias alas pudiesen levantarla. Si uno deseara construir un animal volador, no debería partir de un hipopótamo.

La cuestión es que para que un animal grande pueda levantarse del suelo tiene que desarrollar una alas mayúsculas, por la misma razón que necesita riñones y pulmones de gran superficie. Un animal pequeño, en cambio, apenas necesita cambio alguno para levantarse del suelo. Su propio cuerpo ya tiene una gran superficie. El llamado «plancton aéreo» está constituido por millones de insectos y otros animales diminutos que flotan a gran altura en el aire y se dispersan por todo el mundo. Es cierto que muchos son alados, pero el plancton aéreo contiene también gran número de animales ápteros que flotan a pesar de no poseer superficies especializadas o planos sustentadores. Flo-

tan simplemente porque son pequeños, y para un animal muy pequeño flotar en el aire es casi tan fácil como para nosotros flotar en el agua. De hecho, la comparación va más allá, porque cuando un insecto minúsculo flotante posee alas las bate no tanto para mantenerse en el aire como para «nadar» a través de él. El término «nadar» es apropiado porque cuando se es muy pequeño ocurren cosas que a nosotros se nos antojarían extrañas. A esa escala la tensión superficial es una fuerza muy importante, de manera que para un insecto minúsculo el aire resulta tan viscoso que batir las alas representa para él algo así como para nosotros nadar en melaza.

Uno puede preguntarse qué utilidad puede tener flotar sin ningún control sobre la altura o el rumbo de vuelo. No entraré en detalles, pero la dispersión *per se* puede constituir una virtud a ojos de los genes, especialmente para un organismo que sea básicamente sedentario. Esto se aplica *a fortiori* a las plantas: cualquier retazo de terreno se hace inhabitable de vez en cuando, por ejemplo en caso de incendio forestal o inundación. Para una planta que necesite gran cantidad de luz, todo el suelo del bosque es inhabitable, excepto cuando la caída de un árbol rompe la penumbra. Cualquier animal o planta elegido al azar descenderá en general de antepasados que vivieron en algún otro sitio, y es probable que contenga genes que le permitan dispersarse hacia algún otro lugar, el que sea. Ésta es la razón por la que las semillas de diente de león poseen borlas algodonosas. Esta es la razón por la que las cardas poseen ganchos para pegarse al pelaje de los animales. Ésta es la razón por la que muchos insectos son arrastrados muy lejos formando parte del plancton aéreo para aterrizar luego en regiones extrañas.

La facilidad de los animales diminutos para flotar en el aire sugiere que basta con suponer que el vuelo evolucionó originalmente en animales pequeños para que la cumbre que representa el vuelo en el monte Improbable ya no parezca tan formidable. Los insectos muy pequeños flotan aun sin poseer alas. Los insectos algo mayores se ven favorecidos por minúsculos apéndices alares que captan la brisa, lo que nos coloca en una rampa suave y neta que sube por el monte Improbable hacia las alas propiamente dichas. En realidad, puede que la cosa no haya sido tan simple, tal como sugieren las ingeniosas investigaciones de Joel Kingsolver y Mimi Koehl, de la Universidad de California en Berkeley. Kingsolver y Koehl han desarrollado la teoría de que las

primeras alas de insecto estaban preadaptadas para un fin completamente distinto: habrían actuado como paneles solares para caldear el cuerpo. Aquellas primeras alas no habrían pasado de ser pequeñas protuberancias torácicas fijas, sin capacidad de movimiento.

La técnica de investigación de Kingsolver y Koehl fue muy ingeniosa. Construyeron modelos de madera sencillos basados en los insectos fósiles más antiguos conocidos. Algunos de los modelos carecían de alas; otros poseían esbozos alares de longitudes diversas, en muchos casos demasiado cortos para ser reconocibles como alas funcionales. Los propios modelos eran de tamaño diverso, y fueron probados en un túnel de viento para comprobar su eficiencia aerodinámica. Los modelos llevaban incorporados minúsculos termómetros para ver lo eficientes que eran a la hora de captar la luz solar artificial procedente de un potente foco.

De acuerdo con lo ya expuesto, Kingsolver y Koehl encontraron que los insectos realmente pequeños flotan perfectamente sin alas de ninguna clase. Pero otro resultado, un tanto desconcertante desde la perspectiva de mi sencilla rampa hacia la cima del monte Improbable, fue que, a esta escala tan pequeña, los esbozos alares no parecían contribuir a la eficiencia aerodinámica. Las alas no proporcionaban una fuerza ascensional útil a menos que tuviesen ya un tamaño sustancial. Para modelos de insectos de dos centímetros de largo, unas alas de la misma longitud producían una fuerza ascensional suficiente, pero unas alas que representaran sólo el veinte por ciento de la longitud corporal no parecían aportar absolutamente nada. En vista de esto, parece existir aquí un precipicio en el monte Improbable, porque un incremento sustancial de la longitud de las alas exigiría una única mutación repentina. Sin embargo, hay un par de hechos adicionales que hacen que este precipicio no sea tan imponente.

En primer lugar, sólo los insectos muy pequeños requieren esbozos alares relativamente grandes para obtener algún beneficio aerodinámico. Cuando el insecto es bastante más grande, incluso unos esbozos alares pequeños generan una fuerza ascensional significativa. A la escala de los diez centímetros, se observa un inmediato beneficio aerodinámico a medida que se incrementa gradualmente la longitud de los esbozos alares desde cero.

Para explicar el segundo hecho adicional hay que volver a la escala de lo muy pequeño. Aquí los esbozos alares minúsculos resultaron te-

ner un beneficio *térmico* inmediato. Cuando las alas mínimas se tornan algo menos mínimas, no proporcionan una fuerza ascensional extra, pero sí se convierten en paneles solares más eficientes. Cuando el cuerpo del insecto es muy pequeño, parece existir un gradiente suave de mejora en la eficiencia de los esbozos alares como panel solar. Esbozos alares de un milímetro son mejores que nada, esbozos de dos milímetros son mejores que de uno, y así sucesivamente. Pero este «y así sucesivamente» no continúa de forma indefinida. Por encima de cierta longitud, el mejoramiento de la eficiencia de los paneles solares se va desvaneciendo. Podría argumentarse, por lo tanto, que el gradiente de mejora de los paneles solares no podría, por sí mismo, haber hecho aumentar el tamaño de los esbozos alares hasta longitudes en las que la función aerodinámica tomara el relevo. Pero Kingsolver y Koehl tienen una buena solución para esto. Los esbozos alares habrían evolucionado en insectos muy pequeños e inicialmente habrían tenido una función térmica, pero después algunos de esos insectos habrían aumentado de tamaño por alguna razón evolutiva. De hecho, este aumento de tamaño evolutivo es muy corriente. Quizá los insectos grandes tienen ventaja porque es menos probable que sean devorados. Fuera cual fuera la causa del crecimiento de los insectos, puede presumirse que sus paneles solares crecieron con ellos. Ahora bien, una consecuencia de este incremento general del tamaño corporal es que se habría alcanzado automáticamente la escala de tamaños en la que los beneficios aerodinámicos podían tomar el relevo y continuar la ascensión paulatina del monte Improbable, aunque por una pendiente distinta, conducente a una cumbre diferente.

Es difícil estar seguro de que unas maquetas dentro de un túnel de viento representen realmente lo que pasaba en el Devónico, hace 400 millones de años. Podría ser que las alas de los insectos empezaran siendo paneles solares que no sirvieron en absoluto para volar hasta que todo el cuerpo se hizo más grande por alguna otra razón, pero podría ser que no. Quizá la física real sea distinta de la de los modelos y los esbozos alares de tamaño creciente fueran cada vez más aptos para volar desde el principio. Pero la investigación de Kingsolver y Koehl nos permite aprender una lección muy interesante. Nos enseña una vía nueva y sutil, una especie de desvío lateral, por la que pueden abrirse senderos de ascenso al monte Improbable.

J.H. Marden y M.G. Kramer acaban de publicar un estudio fascinante sobre los plec6pteros, que sugiere un posible camino alternativo de ascenso hacia la cumbre del vuelo aut6ntico en los insectos. Los plec6pteros son insectos voladores bastante primitivos, y aqu4 primitivo significa que, aunque se trata de insectos actuales, se cree que est6n m6s cerca de los antepasados de los insectos que ning6n otro grupo de insectos modernos. La especie concreta que estudiaron Marden y Kramer, *Allocapnia viv4para*, se desliza sobre la superficie del agua levantando sus alas y utiliz6ndolas como velas para captar el viento. La velocidad de navegaci6n a vela es aproximadamente proporcional a la longitud del ala. Los individuos con las alas levantadas se deslizan m6s r6pidamente que los que no alzan las alas en absoluto. Estas alas son aproximadamente del mismo tama1o que las placas branquiales m6viles de los insectos primitivos f6siles. Quiz6 los antepasados sin alas viv4an sobre la superficie del agua y levantaban sus placas branquiales para utilizarlas como velas. As4, habr4a existido una suave rampa de ascenso al monte Improbable a medida que las placas branquiales crec4an para convertirse progresivamente en velas m6s efectivas. En cuanto al siguiente paso hacia el vuelo batido, Marden y Kramer han hecho otra observaci6n importante. Otra especie de plec6ptero, *Taeniopteryx burksi*, se desliza asimismo sobre la superficie del agua, pero para hacerlo bate sus alas. Quiz6 los insectos, en su ascenso hasta la cumbre voladora del monte Improbable, pasaron a trav6s de una fase de navegaci6n a vela como la de *Allocapnia* y despu6s por una fase de aleteo en superficie como la de *Taeniopteryx*. Es f6cil imaginar que insectos ligeros que aleteaban y avanzaban zumbando sobre la superficie del agua pudieran haber sido levantados ocasionalmente por rachas de viento. Entonces habr4a existido otra rampa monta1a arriba cuando sus alas batientes los hubieran mantenido en el aire durante periodos cada vez m6s prolongados.

Para los vertebrados la evoluci6n del vuelo fue probablemente un asunto distinto, porque en su mayor4a ya son relativamente grandes de entrada. El vuelo activo propiamente dicho ha evolucionado de forma independiente en las aves, los murci6lagos (probablemente de forma separada en al menos dos grupos distintos de estos animales) y los pterosaurios. Una posibilidad es que el vuelo verdadero apareciera como una derivaci6n del planeo entre 6rboles que practican numerosas espe-

cies animales, aunque no acaben de volar. En la bóveda arbórea existe todo un mundo de vida. Pensamos en la selva como algo que se eleva desde el suelo. La vemos desde el punto de vista de unos animales grandes, pesados y que viven en el suelo, mientras nos abrimos paso entre los troncos. Para nosotros, el bosque espeso es una catedral oscura y cavernosa con arcos y bóvedas que se extienden desde el suelo hasta un techo verde y remoto. Pero la mayor parte de los habitantes de la selva viven en el dosel arbóreo y ven el bosque desde la perspectiva opuesta. Su bosque es un prado verde iluminado por el sol, vastísimo y suavemente ondulado que, aunque apenas reparen en ello, se eleva sobre unos zancos. Innumerables especies animales pasan toda su vida en este prado encumbrado. El prado es el lugar donde están las hojas, y las hojas están ahí porque ahí es donde llega la luz del Sol, y ésta es la fuente energética última de toda forma de vida.

El paisaje no es absolutamente continuo. El prado aéreo está tachonado de agujeros por los que es posible caer al suelo; son huecos que hay que superar. Muchas especies animales están bien dotadas para saltar grandes distancias. La diferencia entre un salto exitoso y otro fallido podría ser cuestión de vida o muerte. Cualquier cambio en la forma del cuerpo que tenga como efecto alargar un poco más el alcance del salto, por mínimo que sea, bien pudiera ser una ventaja. La diferencia entre una ardilla y una rata reside principalmente en la cola. La cola no es un ala; no se puede volar con ella. Pero es liviana, con pelos que le confieren una gran superficie captadora de aire. Una rata con cola de ardilla sería sin duda capaz de saltar una brecha más grande que una rata con cola de rata; y si los antepasados de las ardillas tuvieron cola de rata, habría una rampa continua de mejora, con colas cada vez más plumosas, hasta llegar a la cola de la ardilla moderna.

He descrito como plumosa la cola de la ardilla, pero este calificativo es incluso más apropiado para la de un pequeño mamífero en absoluto emparentado con la ardilla: el falangero planeador pigmeo (figura 4.2). Se trata de un marsupial, más cercano a zarigüeyas y canguros que a ratas y ardillas. Vive en la alta bóveda de los bosques de eucalipto australianos. La cola no es, naturalmente, una pluma verdadera, que con su complejo sistema de minúsculos ganchos y barbas es un invento privativo de las aves. Pero la cola del falangero planeador pigmeo se parece a una pluma y desempeña una función similar.

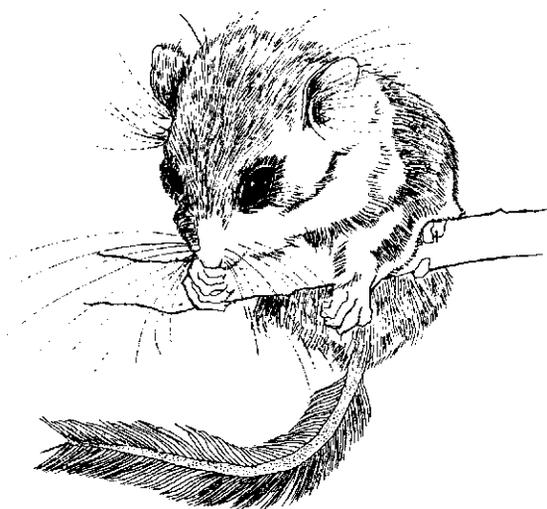


Figura 4.2. Acróbata o falangero planeador pigmeo, *Acrobates pygmaeus*, un marsupial australiano.

El falangero planeador pigmeo posee asimismo una halda de piel que se extiende del codo a la rodilla y que es capaz de alargar su salto en una veintena de metros de planeo descendente. Otra familia de possums o falangeros australianos, los falangeros voladores, ha desarrollado más aún el halda de piel. En el falangero planeador grande [*Schoinobates volans*], la membrana todavía llega sólo al codo, pero el animal puede planear hasta 100 metros y cambiar de dirección en un ángulo de hasta 90°. El falangero de vientre amarillo [*Petaurus australis*] es un planeador aún más consumado. Su membrana planeadora se extiende de las muñecas a los tobillos, al igual que ocurre con el falangero planeador del azúcar [*Petaurus breviceps*] y el petauro ardilla [*P. notfolcensis*], de mayor tamaño.

Casi idénticas a primera vista, aunque sin ningún parentesco cercano, son las ardillas voladoras gigantes [cinco especies del género *Petaurista*] de las selvas del Lejano Oriente y la ardilla voladora septentrional de Norteamérica [*Glaucomys sabrinus*]. Se trata de verdaderas ardillas (roedores), pero, al igual que los planeadores marsupiales más extremos, poseen haldas de piel que se extienden de las muñecas a los tobillos. Planean de manera casi tan elegante como sus equivalentes

tes marsupiales. En África hay otros roedores que han desarrollado la misma capacidad de planeo. Aunque reciben los nombres de ardilla voladora de Beecroft [*Anomalurops beecrofti*] y ardilla voladora de Zenker [*Diurus zenkeri*], no son verdaderas ardillas, y es seguro que han «inventado» el planeo de manera independiente de las ardillas voladoras americanas. Una membrana aún más completa que bordea el cuello y la cola, así como los dedos de manos y pies, es la que posee el misterioso colugo o caguán de los bosques de Filipinas (figura 4.3). Nadie sabe a ciencia cierta qué es este animal, también llamado lémur volador (aunque no es un lémur, porque los verdaderos lémures están confinados en Madagascar, y ninguno de ellos vuela o planea, aunque algunos dan saltos impresionantes). Sea lo que sea, es seguro que el colugo no es ni un roedor ni un marsupial. De nuevo se ha «inventado» la membrana planeadora y el hábito asociado de planear de forma por completo independiente.

El colugo, las diferentes ardillas voladoras y los planeadores marsupiales planean con una eficiencia comparable. Pero, puesto que la membrana de vuelo del colugo se extiende también entre los dedos, mientras que en los demás llega como máximo a las muñecas, una evolución ulterior de estas especies podría dar origen a distintos tipos de alas. Resulta aún más evidente que puede decirse lo mismo de la especie que recibe el hermoso nombre de *Draco volans*, el lagarto volador o «dragón volador». Se trata de un lagarto arborícola, habitante también de las selvas de Filipinas e Indonesia. A diferencia de los mamíferos planeadores, su halda aérea no implica las extremidades, sino que se extiende entre unas costillas elongadas que el animal puede desplegar a voluntad. Mi favorito entre todos estos animales planeadores es la rana voladora de Wallace, una rana arborícola de las pluviselvas del Sudeste asiático. La superficie sustentadora se extiende en este caso entre los dedos alargados de manos y pies y, al igual que los otros planeadores citados, la utiliza para planear de un árbol a otro.

En ninguno de estos casos existe dificultad alguna para encontrar un sendero suave que suba por el monte Improbable. En realidad, el hecho de que el hábito de planear haya evolucionado tantas veces atestigüa la facilidad con que pueden encontrarse tales senderos. Un testimonio quizá aún más expresivo lo ofrece la serpiente arborícola del paraíso o «serpiente voladora», también de las selvas del Sudeste asiá-

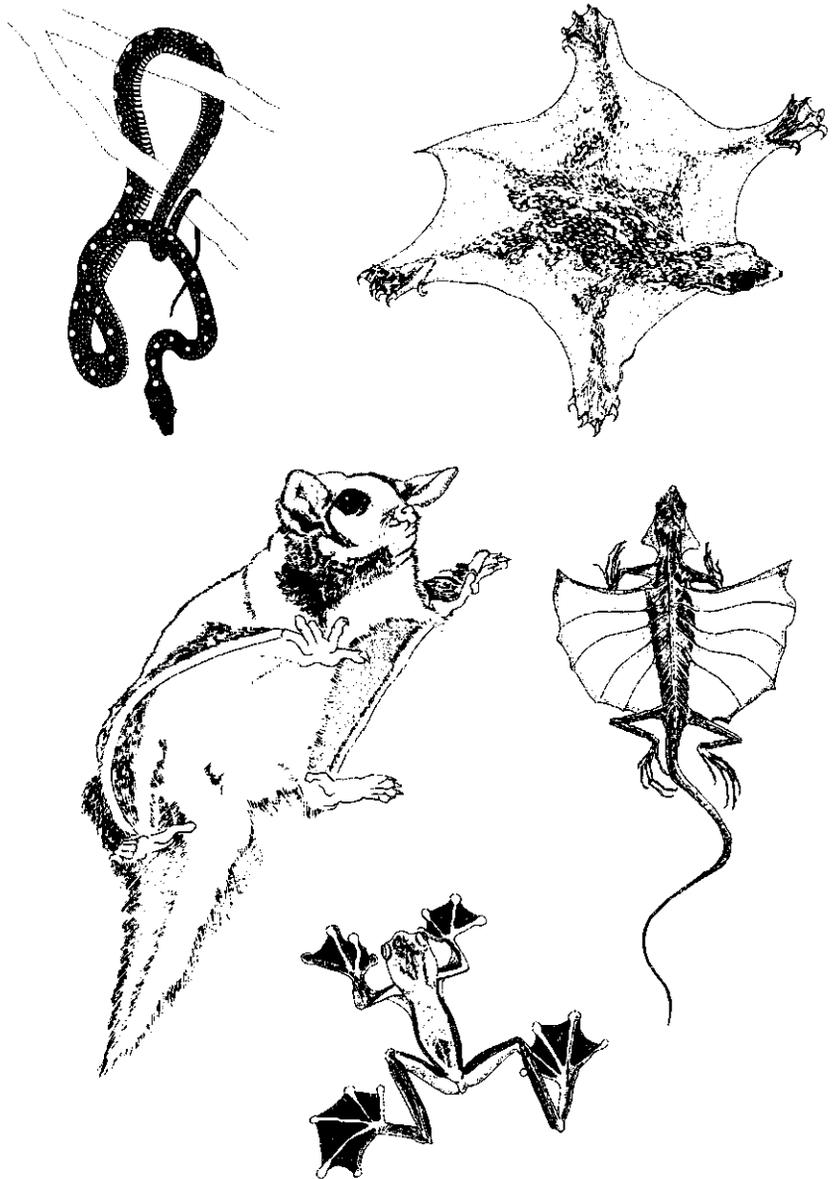


Figura 4.3. Vertebrados que planean entre árboles pero que no vuelan realmente: (en el sentido de las agujas del reloj desde la parte superior derecha) caguán o colugo, *Cynocephalus volans*; lagarto volador, *Draco volans*; rana voladora de Wallace, *Rhacophorus nigropalmatus*; falangero planeador del azúcar, *Petaurus breviceps*; y serpiente voladora, *Chrysopelea paradisi*.

tico. Esta serpiente planea efectivamente de uno a otro árbol después de dejarse caer desde una distancia de una veintena de metros, aunque no posee ninguna vela, halda o superficie de vuelo. La forma aplastada de la serpiente ya le confiere una superficie relativamente grande en relación a su peso, y el animal aumenta este efecto metiendo el vientre para producir una superficie inferior cóncava. Esta serpiente podría ser un primer paso perfecto de una evolución subsiguiente hacia algo parecido a *Draco volans*, con una membrana planeadora verdadera. La serpiente nunca dio este segunda paso, quizá porque unas costillas elongadas hubieran supuesto un impedimento en otras facetas de su vida.

La manera de pensar acerca de la evolución gradual de algo semejante a una ardilla voladora es ésta. Para empezar, un antepasado que vive en lo alto de los árboles como una ardilla ordinaria, sin ninguna membrana planeadora especial, salta pequeñas distancias. Por lejos que pueda llegar sin la ayuda de haldas de piel especiales, podría saltar unos cuantos centímetros más (y con ello salvar su vida en caso de tener que superar una distancia crítica) si dispusiera de una halda de piel incipiente o una cola ligeramente más peluda. De este modo la selección natural favorece los individuos con una piel ligeramente abolsada alrededor de las articulaciones del brazo o la pierna, y esto se convierte en la norma. La distancia de salto de un individuo promedio de la población se incrementa así en unos cuantos centímetros. Ahora bien, cualquier individuo con una membrana dérmica aún más grande puede saltar todavía unos centímetros más lejos, de modo que en las generaciones posteriores esta extensión de la piel se convierte en la norma, y así sucesivamente. Para cualquier tamaño dado de la membrana, existe una distancia crítica tal que un incremento marginal de este tamaño marca la diferencia entre la vida y la muerte. La extensión de la membrana del individuo promedio de la población va incrementándose paulatinamente a medida que aumenta la distancia máxima que puede saltar. Al cabo de muchas generaciones habrán evolucionado especies tales como los planeadores marsupiales y las ardillas voladoras, capaces de planear decenas de metros y de gobernar su curso en un aterrizaje controlado.

Pero el planeo todavía no es auténtico vuelo. Ninguno de estos animales planeadores bate sus alas, y ninguno de ellos puede permanecer indefinidamente en el aire. Todos descienden, aunque justo antes de

aterrizar sobre un tronco de árbol situado más abajo pueden efectuar una corta elevación por el simple procedimiento de modificar su forma. Es posible que el vuelo verdadero, como el que se observa en los murciélagos, las aves y, se supone, los pterosaurios, evolucionara a partir de antepasados planeadores como los que hemos visto. La mayoría de estos animales puede controlar la dirección y la velocidad de su planeo para aterrizar en un punto determinado. Es fácil imaginar que el vuelo batido auténtico evolucionó a partir de la repetición de los movimientos musculares utilizados para controlar la dirección del planeo, de modo que el tiempo promedio de vuelo se fue posponiendo gradualmente a lo largo del tiempo evolutivo.

Sin embargo, algunos biólogos prefieren contemplar el planeo descendente sobre largas distancias como un callejón sin salida de la línea evolutiva del salto entre árboles. El vuelo verdadero, piensan, empezó sobre el suelo y no en lo alto de los árboles. Los planeadores humanos pueden despegar de dos maneras: lanzándose desde acantilados o siendo remolcados a una velocidad suficiente sobre el suelo. Los peces voladores (figura 4.4) despegan de esta segunda manera, aunque desde el mar y no desde tierra, y son capaces de cubrir planeando las mismas distancias que el mejor de los planeadores marsupiales que se lanzan desde los árboles. Los peces voladores nadan a gran velocidad en el agua y después salen disparados fuera de ella, presumiblemente para consternación de los depredadores subacuáticos que los persiguen. No se sumergen de nuevo hasta haber recorrido una distancia de hasta 100 metros. A veces, cuando descienden, dan unos cuantos coletazos al tomar contacto con la superficie del agua para retomar velocidad y continuar el vuelo. Sus «alas» son las aletas pectorales, muy agrandadas, y en el caso del pez volador atlántico también las aletas pélvicas ampliadas.

No deben confundirse estos peces voladores verdaderos (exocétidos) con los denominados chicharros voladores (dactiloptéridos), sin parentesco alguno con los primeros (aunque se encuentran separados por sólo dos libros en mi mesita de café). Lejos de volar, estos peces se desplazan pausadamente por el fondo. Se ha dicho que usan sus «alas» como estabilizadores, para asustar a los depredadores desplegándolas rápidamente, y para remover la arena con el fin de desenterrar presas. Cuando se les importuna se elevan unos pocos metros en la colu

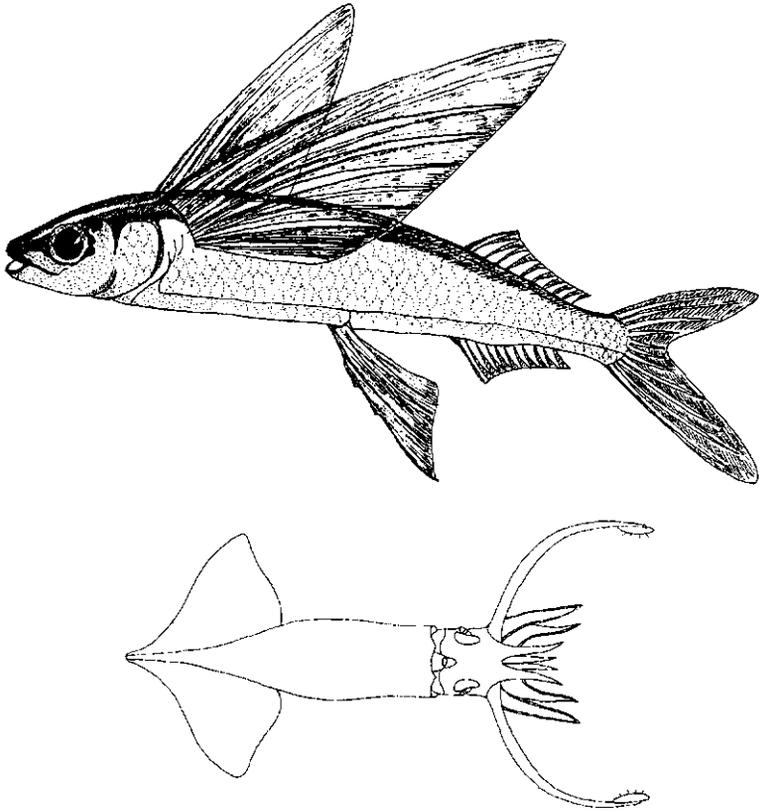


Figura 4.4. Animales que planean después de salir disparados de la superficie del agua. Pez volador del Atlántico, *Cypselurus heterurus*, la juriola (arriba), y calamar volador, *Onychoteuthis*.

de agua, despliegan sus «alas» y descienden planeando sobre el fondo. La única cosa para la que no utilizan las alas es para volar en el aire. No está claro el origen de la leyenda que les atribuye la capacidad de volar: posiblemente se deba únicamente al gran tamaño de sus aletas pectorales, que superficialmente se parecen a las de los peces voladores verdaderos. Volviendo a éstos, seguramente evolucionaron no a partir de antepasados bentónicos, que viven en el fondo del mar, sino de peces superficiales que nadaban a gran velocidad. Muchos peces saltan fuera del agua sin la ayuda de aletas ampliadas. A buen seguro sería fácil para estos saltadores rápidos sacar algún partido de un alar-

gamiento de sus aletas, y en generaciones posteriores aumentar la superficie de las aletas hasta que éstas se convirtieran en «alas». Es un poco triste que los delfines, con sus saltos espectaculares, no hayan progresado nunca hasta el estadio de los peces voladores. Quizá ello se deba a que para volar de manera efectiva tendrían que ser más pequeños que los delfines actuales, y hay razones, relacionadas con el aislamiento térmico y las propiedades de la grasa, que hacen difícil que los delfines, animales de sangre caliente, disminuyan de tamaño. Están también los llamados calamares voladores, que vuelan igual que los peces voladores para escapar de enemigos como los atunes. Los calamares del género *Onychoteuthis* aceleran dentro del agua hasta velocidades de hasta 70 kilómetros por hora, salen disparados y planean a lo largo de más de 45 metros, alcanzando alturas de dos metros o más sobre el agua. Consiguen su sorprendente velocidad mediante propulsión a chorro, como todos los calamares. Una vez han agotado el agua del chorro, se quedan sin fuerza propulsora hasta que vuelven a sumergirse. Los peces voladores tienen ventaja en este sentido, en razón de su hábito ya mencionado de acelerar mediante coletazos cuando todavía se hallan en gran parte fuera del agua.

Existe un fascinante grupo de peces, los peces hacha [del género *Carnegiella*] de los ríos sudamericanos, de los que se ha informado que consiguen un verdadero vuelo activo por el aire haciendo vibrar ruidosamente sus aletas pectorales, aunque sólo durante distancias cortas. Estos peces no están directamente emparentados con los peces voladores verdaderos (ni con los chicharros «voladores»). Debo decir que me gustaría ver un pez hacha volador pasar zumbando ante mis ojos. No estoy diciendo que no me crea que vuelen; todos los libros lo dicen. Pero, como bien saben los pescadores de caña, y como nos ha enseñado la historia de los chicharros «voladores», a veces no es mala idea comprobar personalmente los relatos sobre peces.

En cualquier caso, he presentado los peces voladores (planeadores) como preludeo de la teoría de que el vuelo verdadero, batido, no evolucionó a partir de planeadores arborícolas, sino de animales que vivían en el suelo y corrían rápidamente, cuyos brazos se liberaron de su papel normal en la carrera. Los peces y calamares voladores, aunque viven en el agua, ilustran el principio de que si un animal planeador puede adquirir suficiente velocidad en superficie, puede despegar sin ayuda de un

árbol o un despenadero. Este principio podría ser válido para las aves, porque evolucionaron a partir de dinosaurios bípedos (en realidad, podría decirse que, técnicamente, las aves *son* dinosaurios), algunos de los cuales seguramente corrían muy deprisa sobre el suelo, como en la actualidad hacen los avestruces. Para seguir por un momento con la analogía de los peces voladores, las dos piernas desempeñarían el papel de la cola del pez, propulsando al animal hacia delante y muy deprisa, mientras que los brazos desempeñarían el papel de las aletas, quizá utilizados en un principio como estabilizadores o timones y posteriormente transformados en superficies sustentadoras. Hay algunos mamíferos, como los canguros, que se impulsan muy deprisa sobre dos patas, lo que ha dejado sus brazos libres para evolucionar en otras direcciones. Nuestra especie parece ser el único mamífero que utiliza las dos piernas para la marcha alterna propia de las aves, pero no somos muy rápidos, y utilizamos nuestros brazos no para volar, sino para transportar y construir cosas. Todos los mamíferos bípedos y veloces utilizan la marcha del canguro, en la que las dos patas impulsan a la vez y no de manera alterna. Esta marcha se deriva de forma natural de la flexión horizontal del espinazo de un cuadrúpedo corredor típico, como puede ser un perro. (Por analogía, ballenas y delfines nadan doblando el espinazo hacia arriba y hacia abajo, al estilo de los mamíferos, mientras que peces y cocodrilos nadan doblándolo a derecha e izquierda, siguiendo el antiguo hábito de los peces. Un inciso: quizá deberíamos pensar un poco más en los héroes olvidados entre aquellos reptiles mamiferianos que fueron pioneros en la adopción de la marcha arriba y abajo que ahora admiramos en los guepardos y los galgos a la carrera; los vestigios del antiguo serpenteo de los peces quizá se dejen ver aún en los perros que menean la cola, en especial cuando el movimiento se hace extensivo a todo el cuerpo, como en las contorsiones de un perro sumiso.)

Los canguros y sus parientes marsupiales no tienen el monopolio de la «marcha de canguro». En una de las lecciones de zoología que mi colega Stephen Cobb estuvo impartiendo a estudiantes de la Universidad de Nairobi, les explicó que los ualabíes (marsupiales terrestres o arborícolas, de menor tamaño que los canguros) están confinados a Australia y Nueva Guinea. «No, señor», protestó un estudiante. «He visto uno en Kenya.» Lo que el estudiante había visto era sin duda el animal de la figura 4.5.



Figura 4.5. Liebre saltadora, *Pedetes capensis*.

Este animal, la llamada liebre saltadora, no es ni una liebre ni un canguro, sino un roedor. Como los canguros, salta para incrementar su velocidad cuando huye de los depredadores. Otros roedores, como los jerbos, hacen lo mismo. Pero los mamíferos bípedos no parecen haber dado el paso siguiente ni adquirido por evolución la capacidad de emprender el vuelo. Los únicos mamíferos verdaderamente voladores son los murciélagos, y su membrana alar abarca las patas posteriores además de los brazos. Es difícil ver de qué manera esta ala que restringe el movimiento de las extremidades podría haber evolucionado por la ruta de la carrera rápida. Lo mismo cabe decir de los pterosaurios. Barrunto que tanto los murciélagos como los pterosaurios desarrollaron evolutivamente el vuelo a partir de planeos descendentes desde árboles o acantilados. En algún estadio, sus antepasados podrían haber sido parecidos a los colugos.

Las aves quizá sean otra historia. En cualquier caso su evolución, al girar sobre ese dispositivo maravilloso que es la pluma, es distinta.

Las plumas son escamas reptilianas modificadas. Es posible que evolucionaran para una finalidad distinta del vuelo y que todavía cumplen: el aislamiento térmico. Sea como sea, están constituidas por un material córneo capaz de formar superficies ligeras, planas y flexibles, pero rígidas. Las alas de las aves son muy distintas de las haldas de piel colgante de murciélagos y pterosaurios. Así pues, los antepasados de las aves eran capaces de formar un ala funcional que no era necesario mantener tirante entre huesos. Bastaba con poseer un brazo óseo en la parte anterior; la rigidez de las propias plumas se ocupaba del resto. Las patas posteriores quedaban libres para correr. Lejos de ser torpes y desmañadas en el suelo como los murciélagos y, presumiblemente, los pterosaurios, las aves pueden utilizar sus patas para correr, nadar, saltar, posarse, trepar, capturar presas y luchar. Los loros utilizan incluso sus garras como manos humanas. Mientras tanto, las extremidades anteriores se ocupan de la tarea de volar.

He aquí una hipótesis acerca de los orígenes del vuelo en las aves. El antepasado hipotético, que podemos imaginar como un dinosaurio pequeño y ágil, corre rápidamente tras los insectos, saltando en el aire con sus potentes patas traseras y mordisqueando las presas. Los insectos habían desarrollado la capacidad de volar mucho antes. Un insecto volador es perfectamente capaz de emprender una acción evasiva, y el depredador saltarín podría sacar partido de la capacidad de corregir su trayectoria en pleno salto. Los gatos pueden hacer esto hasta cierto punto. Parece difícil porque, al estar en el aire, no hay nada sólido contra lo que empujar. El truco consiste en modificar el centro de gravedad, y esto puede hacerse desplazando partes de uno mismo en relación a otras partes. Se puede mover la cabeza o la cola, pero las partes desplazables más obvias son los brazos. Ahora bien, una vez los brazos se desplazan con este fin, se harán más efectivos si desarrollan superficies para captar el aire. También se ha sugerido que las plumas alargadas de los brazos se desarrollaron inicialmente como una especie de red para capturar insectos. Esto no es tan forzado como parece, pues algunos murciélagos utilizan sus alas de esa manera. Pero, de acuerdo con dicha teoría, los brazos se usaban principalmente para controlar la dirección y el equilibrio. Algunos cálculos sugieren que los movimientos más apropiados del brazo para controlar el cabeceo y el giro en un salto serían de hecho parecidos a un rudimentario batir de alas.

Si se la compara con la teoría del planeo de árbol en árbol, la teoría de la carrera, el salto y la corrección de la trayectoria en el aire invierte el orden de las cosas. En la teoría del planeo la función original de las protoalas era proporcionar fuerza ascensional. Sólo posteriormente se utilizaron para el control y, por último, para el aleteo. En la teoría del salto para capturar insectos, el control vino primero y sólo posteriormente las amplias superficies de los brazos se reclutaron para proporcionar fuerza ascensional. La belleza de esta teoría reside en el hecho de que los mismos circuitos nerviosos que habrían servido para controlar el centro de gravedad en el antepasado saltador habrían servido también, sin apenas cambios, para controlar las superficies de vuelo en una etapa evolutiva posterior. Quizá las aves empezaron a volar a partir de saltos desde el suelo, a diferencia de los murciélagos, que habrían comenzado planeando de árbol en árbol. Pero tampoco puede descartarse que las aves empezaran también planeando de árbol en árbol. El debate sigue.

En cualquier caso, las aves modernas han recorrido un largo camino desde aquellos tiempos primitivos. Multitud de largos caminos, debiera decir, porque las cumbres del monte Improbable conquistadas por ellas son numerosas y espléndidas. Un halcón peregrino puede lanzarse en picado desde lo alto a más de 150 kilómetros por hora cuando se abate sobre una presa. Los cernícalos y los colibríes se sostienen con precisión milimétrica en un punto concreto, como en el sueño más fantástico de un helicóptero. Los charranes árticos [*Sterna paradisea*] invierten más de la mitad del año en su migración anual desde del Ártico al Antártico y viceversa, una distancia de 20.000 kilómetros. El albatros errante o viajero [*Diomedea exulans*], colgado de su envergadura alar de tres metros, vuela en círculo alrededor del polo siempre en el sentido de las agujas del reloj y sin necesidad de batir las alas, aprovechando el motor natural de la velocidad cambiante del viento allí donde los frentes fríos cortan los vientos llamados «rugientes cuarenta». Algunas aves, como los faisanes y los pavos reales, utilizan el vuelo sólo en algún arranque explosivo ocasional, cuando se asustan ante un peligro posible. Otras, como los avestruces, los ñandúes y las lamentablemente extinguidas moas gigantes [*Dinornis*] de Nueva Zelanda, se han hecho demasiado grandes para volar y sus alas han degenerado en comparación con sus enormes patas. En el otro

extremo, las patas de los vencejos son débiles y torpes, pero sus alas, dirigidas hacia atrás, son de lo más avanzado. Estas aves casi nunca abandonan el aire, incluso se aparean y duermen en vuelo. Sólo dejan de volar para anidar, y cuando se posan deben hacerlo en un lugar elevado, pues desde el suelo les resulta imposible emprender el vuelo. Construyen sus nidos con materiales que encuentran flotando en el aire o que arrancan de los árboles al pasar gritando junto a ellos. Para un vencejo, posarse en el suelo debe de ser una situación antinatural, difícil, comparable, por decir algo, a lo que para nosotros representa lanzarse en caída libre o nadar bajo el agua. Para nosotros, el mundo es un telón de fondo uniforme e inmóvil para nuestras preocupaciones; a través de los negros ojos de un vencejo, el estado fundamental del mundo es un horizonte que gira de manera incesante y vertiginosa. Para un vencejo, una enervante montaña rusa de Disneylandia sería algo así como nuestra *terra firma*.

No todas las aves vuelan activamente, pero las que planean proceden seguramente de ancestros que sí lo hacían. El vuelo batido es complicado, y aún no se comprende en todos sus detalles. Es tentador pensar que los golpes de ala potentes y hacia abajo proporcionan fuerza ascensional sin más. Puede que haya algo de cierto en esto, en especial durante el despegue, pero la mayor parte de la fuerza ascensional la proporciona la propia forma de las alas (si la velocidad es suficiente), como en un avión. Un ala especialmente curvada o inclinada puede proporcionar fuerza ascensional si el viento sopla sobre ella o si (lo que es lo mismo) toda el ave avanza en relación al aire, por la razón que sea. El batir de alas sirve principalmente para proporcionar el necesario impulso hacia delante. Este papel impulsor de las alas se basa en el hecho de que no sólo se mueven de arriba abajo. El ave imparte un diestro giro desde el hombro, junto con sutiles reajustes de todas las articulaciones. Como resultado de tales giros y reajustes, además de otros efectos aerodinámicos derivados del combamiento de las plumas, los aletazos se traducen en un impulso hacia adelante (algo parecido al impulso que obtiene una ballena moviendo la cola de arriba abajo). Supuesto un movimiento hacia delante a través del aire, las alas de un ave proporcionan fuerza ascensional más o menos de la misma manera en que lo hacen las de un avión, aunque estas últimas son más simples porque no tienen que moverse. Cuanto mayor es la velocidad mayor es

la fuerza ascensional, y es por esto por lo que un Boeing 747 se sustenta en el aire a pesar de su enorme peso.

Las leyes de la física se confabulan para hacer que el aleteo se haga cada vez más difícil conforme aumenta el tamaño del ave. Si pensamos en aves de la misma forma pero de tamaño creciente, el peso aumenta en proporción al cubo de la longitud, mientras que la superficie del ala aumenta sólo en proporción al cuadrado. Para poder permanecer en el aire, las aves mayores tendrían que desarrollar alas desproporcionadamente grandes y/o volar de una manera desproporcionadamente veloz. A medida que imaginamos aves cada vez mayores, llega un momento en el que, al carecer de motores de émbolo o de reacción, la potencia muscular de un ave grande ya no es suficiente para mantenerla en vuelo. Este tamaño crítico es algo inferior al de los mayores buitres y albatros. Algunas aves grandes, como hemos visto, no tuvieron otra opción que rendirse y quedarse en tierra para siempre, aunque, como en el caso de los avestruces o los emús, no les fue nada mal, pues se hicieron incluso más grandes. Pero los buitres, cóndores, águilas y albatros no están confinados al suelo. ¿Cuál es su secreto?

El truco de estas aves consiste en explotar fuentes de energía externa. Si no fuera por el calor del Sol y la gravedad cambiante de la Luna, aire y mares, permanecerían inmóviles. La energía externa recarga las corrientes oceánicas, bombea los vientos, agita los remolinos de polvo, sacude la atmósfera con potentes fuerzas capaces de arrasar una casa o impulsar una ruta comercial. También genera corrientes térmicas ascendentes que, juiciosamente utilizadas, pueden hacerle a uno ascender hasta las nubes. Los buitres, águilas y albatros las utilizan a la perfección. Puede que sean los únicos animales que rivalicen con nosotros a la hora de extraer energía de las condiciones atmosféricas. Mi principal fuente de información sobre el vuelo de remonte son los escritos del doctor Colin Pennycuick, de la Universidad de Bristol, quien utilizó su experiencia como piloto de planeador tanto para comprender cómo se las arreglan las aves como para volar entre ellas con objeto de obtener información de primera mano sobre sus técnicas de vuelo.

Igual que hacen los pilotos de planeadores, los buitres y las águilas utilizan las térmicas. Una térmica es una columna de aire caliente ascendente, quizá porque una parcela de suelo en su base absorbe más radiación solar de la que le corresponde. Los pilotos de planeadores

dependen en gran medida de las térmicas, y la experiencia los hace expertos en avistarlas desde cierta distancia. Las sutiles señales que delatan la presencia de una térmica incluyen nubes de forma característica (cúmulos) que las coronan, así como la conformación del terreno. La técnica más socorrida para el planeo en campo abierto consiste en ascender en círculos a caballo de una térmica hasta, por ejemplo, un kilómetro y medio de altura y después lanzarse en un planeo descendente recto hacia donde uno quiera dirigirse. La pendiente de descenso es suave: un buitre acostumbra a perder un metro de altura por cada diez metros de avance. Esto le permite cubrir una distancia de cerca de quince kilómetros antes de necesitar otra térmica para remontar de nuevo el vuelo.

Con frecuencia las térmicas se disponen en «calles», que un piloto de planeador puede divisar leyendo las nubes. También los buitres, como los pilotos humanos, acostumbran a seguir estas calles. A veces, cuando un buitre encuentra una buena calle alineada en la dirección en la que quiere ir, planea a lo largo de ella ganando fuerza ascensional en cada térmica sin preocuparse por volar en círculo. De este modo puede cubrir grandes distancias sin detenerse a realizar los ascensos en círculo de rigor. Por lo general, esto lo hacen sólo cuando se trasladan de las áreas de búsqueda de alimento a las de nidificación. Los buitres no dedican la mayor parte del tiempo a cubrir grandes distancias en línea recta, sino a deambular en busca de carroña. Mientras lo hacen no pierden de vista a los otros buitres. Si alguno de ellos encuentra un cadáver y desciende, los demás se dan cuenta y rápidamente se unen a él. De esta manera, una oleada de atención se extiende por todo el cielo, como la oleada de fuegos que se encendieron en las cumbres de las colinas que se extendían a todo lo largo y ancho de Inglaterra para advertir de la llegada de la Armada Invencible.

Un hábito similar de observar a sus congéneres, aunque con una finalidad distinta, es el de las cigüeñas comunes en su larga migración anual del norte de Europa al sur de África. Las cigüeñas viajan en bandadas que pueden sumar varios cientos de individuos. Como los buitres, vuelan en círculo al tiempo que ascienden por las térmicas, y después planean en línea recta hasta que encuentran otra corriente de aire ascendente. Pero, aunque cuando vuelan en círculo lo hacen agrupa-

das, cuando abandonan una térmica se despliegan para volar una al lado de otra. Con un frente de avance tan amplio, sólo con volar en línea recta es altamente probable que algunas de ellas encuentren otra térmica. Cuando esto ocurre, sus vecinas las ven elevarse y se les acercan para unirse a ellas. De esta manera, todos los miembros del grupo desplegado se benefician de las térmicas que puede encontrar cualquiera de sus integrantes.

Sea cual sea nuestra teoría preferida sobre el origen del vuelo en las aves (la del planeo de árbol en árbol o la de la carrera y el salto), tanto buitres y águilas como cigüeñas y albatros son casi con toda seguridad planeadores secundarios. Su técnica de planeo evolucionó a partir de antepasados que batían las alas y eran más pequeños. Para la escuela de pensamiento que considera que el vuelo de las aves se originó a partir del planeo de árbol en árbol, los buitres modernos (aunque cabalguen sobre térmicas en lugar de trepar a árboles para conseguir altura) representarían un *retorno* al planeo a través de un estadio intermedio de vuelo activo. Durante dicho estadio intermedio de aleteo activo su sistema nervioso habría adquirido (siempre según esta teoría) una nueva circuitería y nuevas capacidades de control y maniobra. Estas nuevas aptitudes los habrían dejado con una eficiencia mejorada al volver al vuelo pasivo. Es relativamente común que los animales vuelvan a un sistema de vida mucho más antiguo después de haber realizado un aprendizaje evolutivo en otro, y puede ser plausible razonar que retornan mejor equipados que antes para el sistema de vida original. Las aves planeadoras quizá no sean un buen ejemplo, porque no se sabe con seguridad cómo se originó el vuelo de las aves. Un ejemplo más manifiesto de animales que retornan a un modo de vida anterior es el que proporcionan los que han vuelto al agua después de haber pasado millones de años en tierra. A éstos me referiré ahora, como coda a este capítulo (figura 4.6).

Hace cincuenta millones de años, los antepasados de los cetáceos (ballenas y delfines) y de los sirenios o vacas marinas (dugones y manatíes) eran mamíferos terrestres, probablemente carnívoros en el caso de los cetáceos y herbívoros en el de los sirenios. Los antepasados de estos y otros mamíferos terrestres habían sido, en un pasado mucho más remoto, peces marinos. El retorno al agua de las ballenas y las vacas marinas fue un regreso al hogar. Como siempre, podemos estar se-

guros de que este regreso fue gradual. Primero se echaron al mar, quizá para buscar alimento, como las nutrias modernas. Progresivamente debieron pasar cada vez menos tiempo en tierra, atravesando quizá una fase en la que se parecían a las focas modernas. En la actualidad nunca abandonan el agua y se encuentran completamente desamparadas si varan en la costa. No obstante, conservan numerosos recordatorios de su ascendencia terrestre, así como, al igual que el resto de mamíferos, reliquias mucho más antiguas de su encarnación previa en el agua. Las ballenas respiran aire, pues sus antepasados, marineros de agua dulce, perdieron las branquias. Pero todos los embriones de mamífero, incluidos los de cetáceos y sirenios, poseen trazas de branquias, vestigios inequívocos de un remoto pasado acuático. También los caracoles de agua dulce han retornado al agua desde la tierra, y también respiran aire. Sus primitivos antepasados vivían en el mar, como la mayoría de caracoles actuales. Los caracoles parecen haber pasado del mar a las aguas dulces a través de un «puente» de tierra. Quizás haya algo en la vida terrestre que facilita la transición. Otros animales terrestres que han vuelto al agua son las tortugas, los escarabajos acuáticos, las arañas buceadoras [*Argyroneta aquatica*] y los extinguidos ictiosaurios y plesiosaurios. Las tortugas consiguen extraer algo de oxígeno del agua, pero no mediante branquias, sino a través de la mucosa bucal y, en algunos casos, rectal, y en las tortugas de concha blanda a través de la piel que recubre el caparazón. Las arañas y los escarabajos acuáticos se llevan consigo una burbuja de aire cuando se sumergen. Todos estos animales han retornado al ambiente acuático de sus antepasados más remotos, pero una vez allí, y tras la experiencia de su recorrido intermedio, hacen las cosas de otra manera.

Cuando los animales terrestres retornan al agua, ¿por qué no recuperan todo el aparato para la respiración acuática? ¿Por qué razón cetáceos y sirenios no redescubrieron las branquias y perdieron sus pulmones? Ésta es otra importante lección que el monte Improbable nos enseña. En evolución, los resultados ideales no son lo único que cuenta. El punto de partida también marca la diferencia (como en la anécdota del hombre que, cuando le preguntaron cómo se iba hacia Dublín, respondió: «Bueno, yo no partiría de aquí»). El monte Improbable tiene muchas cimas. Hay muchas maneras de vivir en el agua. Se pueden utilizar branquias para obtener oxígeno del agua, o se puede subir a la

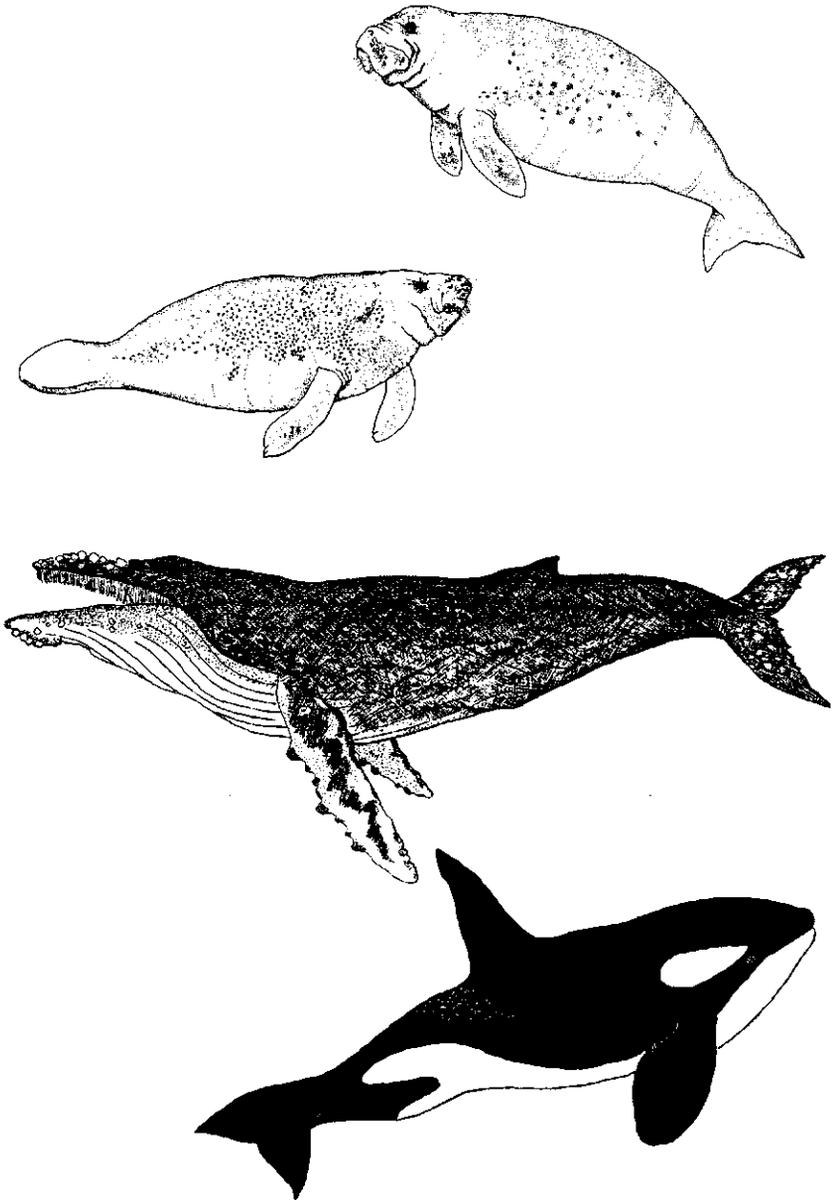


Figura 4.6. Cetáceos y sirenios. Animales que han retornado al mar después de cientos de millones de años de vida en tierra firme: (desde arriba) dugón, *Dugong dugon*; manatí, *Trichechus senegalensis*; ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae*; oreo o espolarte, *Orcinus oreo*.

superficie y respirar aire. Subir continuamente a la superficie parece un hábito singularmente inconveniente. Quizá lo sea, pero debe recordarse que los antepasados de cetáceos y sirenios partieron de las cercanías de una cumbre del monte en la que se respiraba aire. Todos sus detalles internos se ajustaban a la premisa de respirar aire. Tal vez habrían podido desempolvar los vestigios embrionarios de sus antiguas branquias para ponerse en línea con los peces, pero ello hubiera supuesto una reorganización masiva de su infraestructura corporal. Esto habría sido como descender a un profundo valle con la intención de ascender luego a una cumbre más elevada que la de partida. No me cansaré de repetir que la teoría darwiniana no permite empeorar temporalmente en la búsqueda de un objetivo a largo plazo.

Aun en el caso de que hubiesen descendido hasta el valle inferior para ascender después, no es necesariamente obvio que la cumbre de las branquias, una vez conquistada, resultara ser más alta que la de los pulmones. Las branquias no son necesariamente mejores que los pulmones para los animales que viven en el agua. No hay duda de que es mejor poder respirar de forma ininterrumpida, esté uno donde esté, en lugar de tener que dejar lo que se está haciendo para subir a la superficie. Pero nuestro juicio está influido por el hecho de que estamos acostumbrados a inhalar aire cada pocos segundos y nos invade el pánico ante la más breve interrupción de nuestro suministro de aire. Después de millones de generaciones de vida marina sometidos a una intensa selección natural, los cachalotes pueden sumergirse durante cincuenta minutos antes de tener que volver a respirar. Para un cetáceo, subir a la superficie a respirar debe ser algo parecido a lo que para nosotros supone salir un momento a orinar. O a comer. Si uno se esfuerza en pensar en las bocanadas de aire como pausas para comer, y no como una necesidad vital continua, ya no resulta tan evidente que todos los animales acuáticos estén idealmente en mejores condiciones con branquias. Hay animales, como los colibríes, que se alimentan de manera más o menos continua. Para un colibrí, que en estado de vigilia necesita succionar néctar cada pocos segundos, visitar flores debe ser algo así como respirar. Las ascidias, invertebrados marinos sacciformes remotamente emparentados con los vertebrados, bombean sin cesar a través de su cuerpo una corriente de agua de la cual filtran minúsculas partículas de alimento. Un animal filtrador como éste no se entrega a

nada comparable a una comida. Una ascidia podría ser presa del pánico si pensara en que tiene que buscarse la próxima comida. Las ascidias bien pudieran preguntarse por qué tantos animales se dedican al hábito, absurdamente ineficaz y peligroso, de buscarse su pitanza en lugar de sentarse y aspirar alimento todo el tiempo.

Sea como sea, no hay duda de que cetáceos y sirenios llegaron al mar con toda una historia de vida terrestre tras ellos. Si hubieran sido deliberadamente creados para la vida marina es seguro que habrían sido muy diferentes de lo que son, y mucho más semejantes a peces. Los animales que llevan su historia escrita en ellos figuran entre las evidencias más gráficas que tenemos de que los seres vivos no fueron creados para sus modos de vida actuales, sino que evolucionaron a partir de antepasados muy distintos.

Los lenguados, rodaballos y platijas llevan asimismo su historia completamente escrita en ellos, hasta el punto de lo grotesco. Ningún creador en su sano juicio que partiera de cero para diseñar un pez plano habría concebido en su mesa de dibujo la absurda distorsión de la cabeza que se requiere para desplazar los dos ojos al mismo lado. A buen seguro, y de entrada, se habría decantado por el diseño de la raya o la noriega, peces que descansan sobre el vientre y cuyos dos ojos se encuentran situados simétricamente en el dorso (figura 4.7). Platijas y lenguados están completamente retorcidos en razón de su historia, porque sus antepasados se tendían sobre un lado. Las rayas y pastinacas tienen una hermosa simetría porque su historia ha sido, simplemente, distinta: cuando sus antepasados adoptaron la vida bentónica se tendieron sobre el vientre y no sobre un costado. Cuando digo «simplemente» no quiero decir que no hubiera una buena razón para la diferencia. Rayas y pastinacas descienden de los tiburones, ya algo aplanados ventralmente en comparación con los peces óseos, cuyo cuerpo está típicamente comprimido lateralmente. Un pez en forma de hoja plana no puede yacer sobre el vientre, debe dejarse caer sobre un lado. Cuando se instalaron en el fondo, los antecesores de la platija se subieron rápidamente al pico más próximo del monte Improbable, con independencia del hecho de que podían haber accedido a una cumbre quizá más alta (la cumbre simétrica de la raya/pastinaca) sólo con que se hubieran abierto camino a través de un pequeño valle. Repito una vez más que la selección natural no permite bajar por las laderas del

monte Improbable, y estos peces no tenían otra elección que restaurar su visión de manera provisional, haciendo que un ojo migrara al otro lado del cuerpo. Los antepasados de las rayas se apresuraron asimismo a subir la cumbre de pez plano más cercana, que en su caso los condujo a su simétrica elegancia. Obviamente, cuando hablo de «no tener otra elección» y de «apresurarse» a subir cumbres montañosas, se entiende que no me estoy refiriendo a los peces individuales, sino a las estirpes evolutivas, y el término «elección» se refiere a las rutas alternativas de cambio evolutivo.

He subrayado que no está permitido ir cuesta abajo, pero ¿no permitido por quién? ¿Y por qué no puede ocurrir *nunca*? La respuesta a ambas preguntas se puede ilustrar con el caso de un río al que no se le «permitiera» discurrir por otro camino que no fuera el cauce establecido. Nadie ordena al agua que permanezca entre los márgenes de un río, pero, por razones bien conocidas, así se comporta normalmente. Ocasionalmente, sin embargo, desborda las riberas, y hasta las destruye, con el resultado de que el río puede ver alterado su curso permanente.

¿Qué podría permitir que una estirpe en plena evolución diera marcha atrás por un momento para tener así la oportunidad de escalar una cumbre antes inaccesible del monte Improbable? Éste es el tipo de pregunta por el que se interesó el gran genético Sewall Wright, quien, dicho sea de paso, fue el primero en utilizar una metáfora paisajística para la evolución, progenitora de mi monte Improbable. Wright era el integrante norteamericano de un triunvirato mal avenido que, en los años veinte y treinta, fundó lo que ahora denominamos neodarwinismo. (Los otros dos eran ingleses, esos dos prodigios tan incomparables como belicosos que fueron R.A. Fisher y J.B.S. Haldane, y es de justicia añadir que las desavenencias parecen haberse originado exclusivamente en ellos, no en Wright.) Wright advirtió que, paradójicamente, la selección natural puede ser una fuerza *contra* la perfección extrema. Ello se debe precisamente al motivo que hemos estado tratando. Bajar a los valles está prohibido por la selección natural. Una especie que haya quedado atrapada en una pequeña estribación de la montaña no podrá escapar hacia cumbres más altas mientras la selección natural la mantenga confinada en lo alto de esa estribación. Sólo con que la selección natural relajara su presión por un momento, la es-

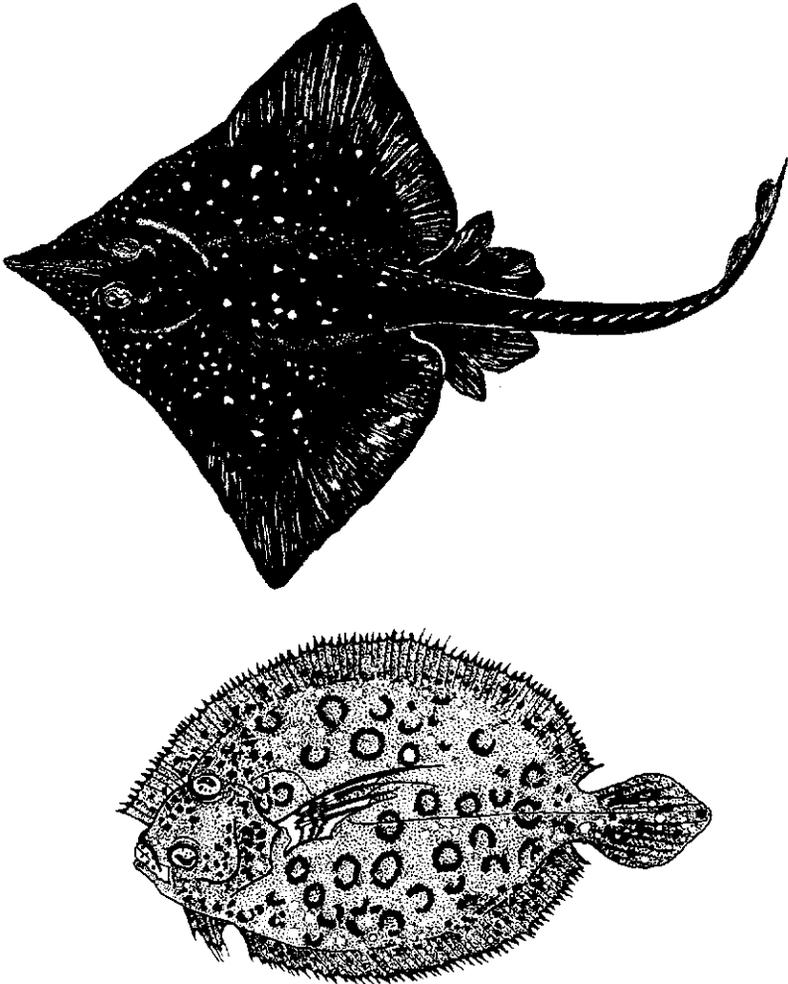


Figura 4.7. Dos maneras de ser un pez plano: la noriega, *Raja batis*, una raya (arriba), reposa sobre el vientre, mientras que la solleta *Bothus lunatus*, un pez plano, descansa sobre un costado.

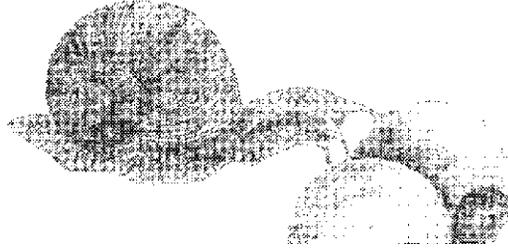
pecie podría abrirse paso pendiente abajo el trecho suficiente para cruzar un valle y llegar al pie de una cumbre alta. Una vez allí, cuando la selección natural empezara a morder de nuevo, se encontraría en posición de evolucionar escalando rápidamente la pendiente. Desde un punto de vista global, pues, una fórmula para la mejora evolutiva consiste en alternar periodos de fuerte selección con periodos de relaja-

ción. Puede que esta relajación sea verdaderamente importante en la vida real. ¿Cuándo podría tener lugar una «relajación» semejante? Una posibilidad es que exista un vacío por llenar. A pequeña escala, esto ocurrirá siempre que una población crezca porque haya menos individuos de los que puede mantener el área considerada. Puede haber bonanzas de oportunidades y relajación de la selección cuando un continente virgen es colonizado por vez primera después de haber sido vaciado por una catástrofe. Es posible que, después de que los dinosaurios se extinguieran, los mamíferos existentes tuvieran tantas oportunidades que algunos de sus linajes «relajaran la guardia», desplazándose temporalmente cuesta abajo y accediendo con ello a cumbres más altas del monte Improbable, de las cuales habrían sido excluidos en condiciones normales.

Otra fórmula es la transfusión de genes frescos procedentes de otros lugares. Este es el punto al que dije que volvería en el capítulo 2. En el modelo NetSpinner de telarañas no existía sólo una población sexual de tejedoras de redes, sino tres «demos» que evolucionaban en paralelo. Se consideraba que los tres evolucionaban independientemente en tres áreas geográficas distintas, pero (y éste es el punto importante) de forma no *completamente* independiente. Existía un goteo de genes, lo que significa que de vez en cuando un individuo migra de una población local a otra. Lo planteé como si estos genes migratorios fueran una especie de inyección de «ideas» frescas procedentes de otra población: «Es casi como si una subpoblación próspera enviara genes que "sugieren" a una población con menos éxito una solución mejor al problema de construir una red». Esto equivale a orientarse por el camino que asciende hasta la cumbre más alta de la montaña metafórica con ayuda de un mapa pasado de contrabando.

Estamos preparados para abordar el objetivo favorito de los creacionistas, y el principal impedimento para los creyentes potenciales en la evolución, encaramado de forma precaria en la cima del farallón más formidable con que cuenta el monte Improbable: el ojo.

Las cuarenta sendas hacia la iluminación



Todos los animales tienen que habérselas con su mundo con los objetos que hay en él. Caminan sobre objetos, se arrastran bajo ellos, evitan estrellarse contra ellos, los cogen, se los comen, se aparean con ellos, huyen de ellos. En los albores geológicos, cuando la evolución era joven, los animales tenían que entrar en contacto físico con los objetos antes de saber de su presencia. ¡Qué cúmulo de beneficios aguardaba al primer animal que desarrollara una tecnología de percepción remota!: distinguir un obstáculo antes de chocar con él, un depredador antes de ser capturado, alimento que, sin estar al alcance de la mano, podía hallarse en las inmediaciones. ¿En qué podría consistir esta tecnología avanzada?

El Sol proporcionaba no sólo la energía para hacer funcionar los engranajes químicos de la vida. También ofrecía la oportunidad de una tecnología de percepción remota. Aporreaba cada milímetro cuadrado de la superficie de la Tierra con una andanada de fotones: partículas elementales que se desplazan en línea recta a la mayor velocidad que permite el universo, entrecruzándose y rebotando a través de agujeros y grietas, de modo que no había rincón que se escapara ni hendidura que se librara. Puesto que los fotones se desplazan en línea recta y tan deprisa, puesto que son absorbidos por algunos materiales más que por otros, y puesto que siempre han sido tan numerosos y omnipresentes, estas partículas ofrecían la oportunidad para el desarrollo de tecnologías de percepción remota de enorme precisión y potencia. Sólo era necesario detectar los fotones y (lo que es más difícil) distinguir la dirección de procedencia de éstos. ¿Iba a aprovecharse esta oportunidad? Tres mil millones de años después el lector conoce la respuesta, porque puede ver estas palabras.

Darwin utilizó el ojo en su famosa introducción de su discusión sobre «órganos de perfección y complicación extremas»:

«Parece completamente absurdo, lo confieso con franqueza, suponer que el ojo, con todos sus inimitables dispositivos para acomodar el foco a diferentes distancias, para admitir diferentes cantidades de luz, y para la corrección de las aberraciones esférica y cromática, pueda haberse formado por selección natural».

Es posible que Darwin se dejase influir por las dificultades de su esposa, Emma, en relación con esta misma cuestión. Quince años antes de *El origen de las especies*, Darwin había escrito un largo ensayo en el que esbozaba su teoría de la evolución por selección natural. Era su voluntad que Emma lo publicara en caso de que él muriera, así que se lo dio a leer. Se conservan sus notas marginales, y resulta particularmente interesante que Emma seleccionara la sugerencia que hacía su marido de que el ojo humano «puede haber sido adquirido *posiblemente* mediante selección gradual de desviaciones pequeñas pero en cada caso útiles». La nota de Emma reza así: «Una gran suposición / E. D». Mucho después de publicarse *El origen de las especies*, en una carta a un colega americano, Darwin confesaba: «El ojo, hasta el día de hoy, me produce escalofríos, pero cuando pienso en las finas gradaciones conocidas, la razón me dice que debe vencer los escalofríos». Las dudas ocasionales de Darwin eran presumiblemente similares a las del físico que cité al principio del capítulo 3. Sin embargo, Darwin vio en sus dudas un reto para seguir reflexionando, no una bienvenida excusa para rendirse.

Hay que decir que, cuando hablamos de «el» ojo, no estamos haciendo justicia al problema. Los expertos en la cuestión han estimado que los ojos han evolucionado no menos de cuarenta veces, y probablemente más de sesenta, de forma independiente en diversos dominios del reino animal. En algunos casos, estos ojos hacen uso de principios radicalmente distintos. Se han reconocido nueve principios diferentes entre los cuarenta a sesenta ojos evolucionados de manera independiente. Mencionaré algunos de los nueve tipos básicos de ojo (que podemos considerar como otras tantas cumbres distintas en diferentes partes del *macizo* del monte Improbable) en las páginas que siguen.

¿Cómo podemos saber que algo ha evolucionado de manera independiente en dos grupos diferentes de animales? Por ejemplo, ¿cómo

sabemos que murciélagos y aves desarrollaron alas de forma independiente? Los murciélagos son únicos entre los mamíferos por poseer alas verdaderas. Podría ser, en teoría, que los mamíferos ancestrales tuvieran alas y que todos, excepto los murciélagos, las hubieran perdido posteriormente. Pero esto implicaría un gran número, nada realista, de pérdidas independientes de alas, y la evidencia viene en apoyo del sentido común al indicar que esto no ocurrió. Los mamíferos ancestrales utilizaban sus extremidades anteriores no para volar, sino para andar, como hacen todavía la mayoría de sus descendientes. Mediante razonamientos similares se ha llegado a la conclusión de que los ojos han surgido varias veces de forma independiente en el reino animal. También podemos servirnos de otra información, como detalles del desarrollo de los ojos en distintos tipos de embriones. Ranas y calamares, por ejemplo, poseen buenos ojos tipo cámara, pero dichos ojos se desarrollan de manera tan distinta en uno y otro caso que podemos estar seguros de que evolucionaron de manera independiente. Ello no significa que el antepasado común de ranas y calamares careciera totalmente de ojos de alguna clase. No me sorprendería que se descubriese que el antepasado común de todos los animales actuales, que debió de vivir hace unos mil millones de años, poseía ojos. Quizá presentaba algún tipo de mancha pigmentaria sensible a la luz que le servía únicamente para percibir la diferencia entre el día y la noche. Pero los ojos, en el sentido de aparato refinado para la formación de imágenes, han evolucionado muchas veces de manera independiente, unas veces convergiendo hacia diseños similares y otras ofreciendo diseños radicalmente diferentes. En fecha muy reciente se han presentado nuevas e interesantes evidencias en relación con la cuestión de la independencia de la evolución de los ojos en diferentes dominios del reino animal. Volveré a ello al final del capítulo.

Mientras paso revista a la diversidad de los ojos de los animales, con frecuencia mencionaré dónde se situaría cada tipo en las laderas del monte Improbable. Recuérdese, no obstante, que todos son ojos de animales modernos, no de auténticos ancestros. Es conveniente pensar que pueden ofrecernos algunos atisbos sobre los tipos de ojos que tenían los ancestros verdaderos. Al menos demuestran que ojos que para nosotros estarían a medio camino de la cima del monte Improbable ciertamente habrían funcionado. Esto tiene su importancia, porque,

como ya he señalado, ningún animal se ganó nunca la vida siendo un estadio intermedio en alguna ruta evolutiva. Lo que podemos contemplar como una estación de paso a medio camino en la ascensión hacia un ojo más avanzado, para el animal mismo puede ser su órgano más vital, y probablemente el ojo ideal para su modo de vida particular. Los ojos que forman imágenes de alta resolución, por ejemplo, no son adecuados para animales muy pequeños. Los ojos de gran calidad tienen que sobrepasar cierto tamaño (tamaño absoluto, no en relación al cuerpo del animal) y cuanto más grandes más aptos, en términos absolutos. Para un animal muy pequeño, un ojo grande en términos absolutos sería probablemente demasiado costoso de construir y demasiado pesado y voluminoso de transportar y mover. Un caracol tendría un aspecto ridículo si sus ojos tuvieran la capacidad visual de los ojos humanos (figura 5.1). Los caracoles cuyos ojos sean mínimamente mayores que la media podrán ver mejor que sus rivales, pero deberán pagar la penalización de tener que transportar una carga mayor, lo que dificultará su supervivencia. Dicho sea de paso, el mayor ojo jamás registrado tiene un tamaño colosal: 37 centímetros de diámetro. El leviatán que puede permitirse transportar tales ojos es un calamar gigante con tentáculos de 10 metros.

Aceptando las limitaciones de la metáfora del monte Improbable, vayamos directamente al fondo de las pendientes de la visión. Aquí encontramos ojos tan sencillos que apenas merecen ser considerados como tales. Es mejor decir que la superficie general del cuerpo es ligeramente sensible a la luz. Esto ocurre en algunos animales unicelulares, medusas, estrellas de mar, sanguijuelas y otros gusanos. Dichos animales son incapaces de formar una imagen o discernir siquiera la dirección de la que procede la luz. Todo lo que pueden ver (nebulosamente) es la presencia de luz (brillante) en algún lugar de las inmediaciones. Curiosamente, hay pruebas de que en los genitales de ciertas mariposas, tanto machos como hembras, existen células que responden a la luz. No se trata de ojos formadores de imágenes, pero pueden percibir la diferencia entre luz y oscuridad, y pueden representar la clase de punto de partida al que nos referimos cuando hablamos de los orígenes evolutivos remotos de los ojos. Nadie parece saber qué uso hacen de ellos las mariposas, ni siquiera William Eberhard, de cuyo entretenido libro *Sexual Selection and Animal Genitalia* he extraído esta información.

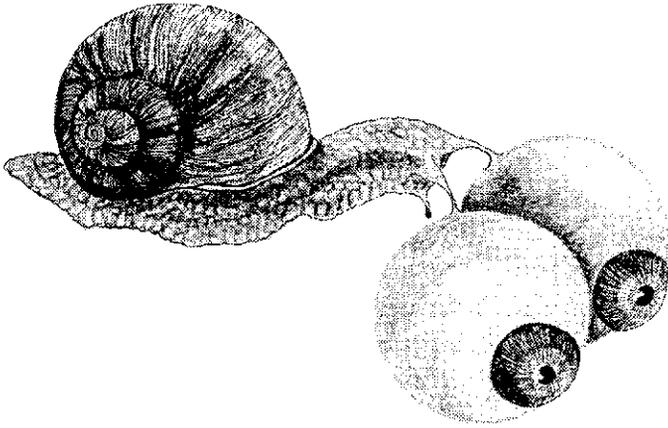


Figura 5.1. Caracol fantástico, con ojos del tamaño que precisaría para ver tan bien como ven los seres humanos.

Si pensamos que la llanura al pie del monte Improbable estaría poblada por animales ancestrales totalmente insensibles a la luz, la piel fotosensitiva, no direccional, de estrellas de mar y sanguijuelas (y los genitales de las mariposas) se encuentran a un trecho muy corto del comienzo del sendero ascendente. No es difícil encontrar este sendero. En realidad, es posible que la «llanura» de insensibilidad absoluta a la luz haya sido siempre pequeña. Puede que las células vivas estén de alguna manera abocadas a verse afectadas en mayor o menor medida por la luz, posibilidad que hace que los genitales sensibles a la luz de las mariposas parezcan menos extraños. Un rayo de luz está formado por un flujo recto de fotones. Si un fotón golpea una molécula de alguna sustancia coloreada, éste puede quedar atrapado y la molécula cambiada en una forma distinta de la misma especie molecular. Cuando esto ocurre se libera algo de energía. En las plantas y las bacterias verdes esta energía es utilizada para fabricar moléculas de alimento, dentro del conjunto de procesos denominado fotosíntesis. En los animales la energía puede desencadenar una reacción en un nervio, lo que constituye el primer paso del proceso que llamamos visión, incluso en animales que carecen de ojos reconocibles como tales. Cualquiera de entre una gran variedad de pigmentos puede servir para una visión rudimentaria. Tales pigmentos abundan, y se utilizan para todo tipo de fines

además de captar la luz. Los primeros pasos vacilantes cuesta arriba del monte Improbable habrían consistido en la mejora gradual de las moléculas pigmentarias. Existe una rampa continua y suave de mejora, fácil de subir a base de pasos pequeños.

Esta rampa que empieza en las tierras bajas fue ascendiendo laboriosamente hacia la evolución del equivalente vivo de la fotocélula, una célula especializada en la captación de fotones mediante un pigmento y su traducción en impulsos nerviosos. Continuaré utilizando el término fotocélula para las células de la retina (en nosotros reciben el nombre de bastones y conos) especializadas en captar fotones. El truco del que se sirven todas ellas es aumentar el número de capas de pigmento disponible para la captación de fotones. Esto es importante, porque un fotón tiene muchas posibilidades de atravesar una capa de pigmento y salir intacto por el otro lado. Cuantas más capas de pigmento haya, mayor será la probabilidad de captar un fotón concreto. ¿Por qué es tan importante el número de fotones captados en relación a los que escapan? ¿No hay siempre fotones de sobra? No, y este punto es fundamental para nuestra comprensión del diseño de los ojos. Existe una especie de economía de fotones, una economía tan tacaña como la economía monetaria humana, y que implica transacciones inevitables.

Antes de entrar en estas interesantes transacciones económicas, es indudable que, en términos absolutos, hay momentos en que los fotones escasean. En una noche clara y estrellada de 1986 desperté a mi hija Juliet (que entonces tenía dos años) y, arropada en mantas, la llevé al jardín y dirigí su cara soñolienta hacia donde, según se había publicado, debía estar el cometa Halley. No comprendía lo que le decía, pero yo le seguía susurrando obstinadamente al oído la historia del cometa y la certeza de que yo no lo volvería a ver nunca más, pero que ella sí podría cuando tuviera setenta y ocho años. Le expliqué que la había despertado para que pudiera contarles a sus nietos en el año 2062 que había visto el cometa antes, y quizá recordaría entonces el capricho quijotesco de su padre de sacarla al raso en plena noche para enseñárselo. (Puede que hasta le susurrara las palabras «quijotesco» y «capricho», porque a los niños pequeños les gusta el sonido de palabras que no conocen, cuidadosamente articuladas.)

Es probable que algunos fotones del cometa Halley llegaron efectivamente a las retinas de Juliet aquella noche de 1982, pero, para ser

sincero, me costó un gran esfuerzo convencerme de que yo mismo podía ver el cometa. A veces me parecía poder conjurar una mancha débil y grisácea situada aproximadamente en el lugar esperado. En otros momentos se difuminaba. El problema era que el número de fotones que incidían sobre nuestras retinas se aproximaba a cero.

Los fotones llegan en instantes aleatorios, como las gotas de lluvia. Cuando llueve como es debido no tenemos ninguna duda de ese hecho y suspiramos por el paraguas que nos han robado. Pero cuando la lluvia comienza a caer gradualmente, ¿cómo decidimos el momento exacto de su inicio? Sentimos una gota y miramos aprensivamente hacia arriba, todavía no convencidos, hasta que arriban una segunda y una tercera gotas. Cuando la lluvia salpica de este modo, una persona puede decir que está lloviendo a la vez que su acompañante lo niega. Las gotas pueden caer con una frecuencia tan baja que puede pasar un minuto antes de que el acompañante note a su vez una salpicadura. Para convencernos de que hay luz, necesitamos que los fotones incidan sobre nuestras retinas a un ritmo apreciablemente alto. Cuando Juliet y yo dirigíamos la mirada hacia la posición del cometa Halley, fotones procedentes del cometa estaban probablemente golpeando fotocélulas concretas de nuestras retinas a la tasa fantásticamente lenta de alrededor de ¡uno cada cuarenta minutos! Esto significa que una fotocélula determinada podía estar diciendo «sí, aquí hay luz», mientras la inmensa mayoría de sus vecinas no lo hacía. La única razón por la que recibí una cierta sensación de un objeto en forma de cometa es que mi cerebro estaba sumando los veredictos de cientos de fotocélulas. Dos fotocélulas captan más fotones que una. Tres captan más que dos, y así sucesivamente, cuesta arriba del monte Improbable. Los ojos avanzados como los nuestros poseen millones de fotocélulas densamente apretadas, como la lanilla de una alfombra, y cada una de ellas está dispuesta para captar tantos fotones como sea posible.

La figura 5.2 muestra una fotocélula avanzada, humana para ser exactos, pero todas se parecen. Lo que parece una colonia de queresas contorneantes en el centro de la figura son mitocondrias. Se trata de pequeños orgánulos que viven en el interior de las células. Descienden originalmente de bacterias parásitas, pero se han vuelto indispensables para la producción de energía en todas nuestras células. El cable de conexión nerviosa de la fotocélula puede verse a la izquierda de la ilus-

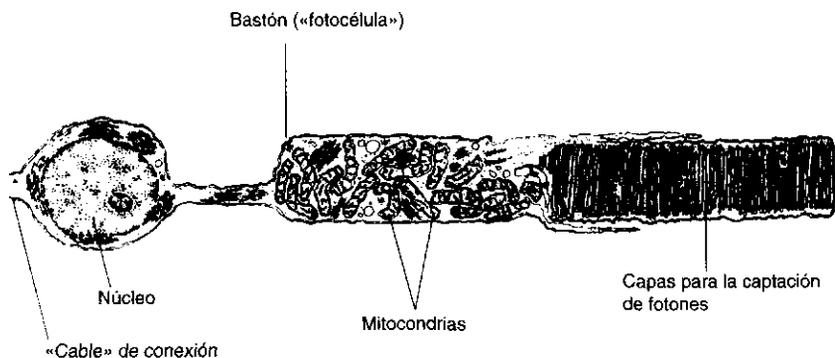


Figura 5.2. Dispositivo captador de fotones o «fotocélula biológica»: una única célula retiniana (bastón) de un ser humano.

tración. La elegante disposición rectangular de membranas, alineadas con precisión militar a la derecha, es el aparato captador de fotones. Cada capa contiene moléculas del pigmento vital que atrapa los fotones. En esta figura cuento noventa y una capas membranosas. El número exacto no es importante: en lo que a captar fotones se refiere, cuantas más mejor, aunque habrá costes indirectos que prohiban demasiadas capas. El caso es que noventa y una membranas son más efectivas a la hora de atrapar fotones que noventa, y noventa lo son más que ochenta y nueve... y una membrana es más efectiva que cero membranas. Ésta es la clase de cosas a las que me refiero cuando digo que existe un gradiente suave de ascenso al monte Improbable. Estaríamos ante un abrupto precipicio si, por ejemplo, cualquier número de membranas por encima de cuarenta y cinco fuera altamente efectivo, mientras que cualquier número por debajo de cuarenta y cinco fuera totalmente ineficaz. Ni el sentido común ni la evidencia nos llevan a sospechar la existencia de tales discontinuidades súbitas.

Los calamares, como hemos visto, desarrollaron sus ojos similares a los nuestros con independencia de los vertebrados. Incluso sus fotocélulas son muy parecidas. La principal diferencia es que en los calamares las capas, en lugar de hallarse empaquetadas como un montón de discos, son anillos amontonados alrededor de un tubo hueco. (Estas diferencias superficiales son comunes en evolución, por la misma clase de razón trivial por la que, por ejemplo, en los interruptores de luz

ingleses hay que accionar la palanca hacia abajo para encender la luz, mientras que en los norteamericanos es hacia arriba.) Todas las fotocélulas animales avanzadas emplean versiones diversas del mismo ardid de incrementar el número de capas membranosas repletas de pigmento captador de fotones. Desde el punto de vista del monte Improbable, el aspecto importante es que una capa adicional aumenta marginalmente la probabilidad de atrapar un fotón, con independencia de cuántas capas hay ya presentes. Al final, cuando el dispositivo sea capaz de captar la mayoría de fotones que lo atraviesen, se impondrá una ley de rendimientos decrecientes para el coste incrementado de las capas adicionales.

Es obvio que en la naturaleza no existe una gran demanda para la detección del cometa Halley, que hace acto de presencia una vez cada setenta y seis años con una contribución despreciable de fotones. Pero sí es muy útil tener ojos que sean lo suficientemente sensibles para aprovechar la luz de la Luna, y hasta la de las estrellas si uno es un búho. En una noche típica, cada una de nuestras fotocélulas puede recibir fotones a razón de uno por segundo; hay que admitir que es una tasa superior a la del cometa, pero todavía tan lenta que se hace vital atrapar hasta el último fotón siempre que sea posible. Pero cuando hablamos de una dura economía de fotones sería totalmente erróneo suponer que la dureza se restringe a la noche. A plena luz del día los fotones pueden redoblar sobre la retina como un aguacero tropical, pero sigue existiendo un problema. La esencia de la visión de una imagen pautada es que las fotocélulas de diferentes partes de la retina deben informar de intensidades diferentes de luz, y esto significa distinguir diferentes tasas de bombardeo de fotones en distintas partes del aguacero. Seleccionar los fotones que proceden de diferentes partes de la escena para obtener una imagen con cierta definición puede conducir a empobrecimientos locales de fotones, tan serios como el empobrecimiento global nocturno. De esta selección nos ocuparemos ahora.

Por sí solas, las fotocélulas únicamente le dicen a un animal si hay luz o no. El animal puede distinguir entre noche y día, y puede advertir una sombra que se cierne sobre él y que podría corresponder a un depredador. El siguiente paso debió de ser la adquisición de alguna percepción rudimentaria de la dirección de la luz, así como de la dirección del movimiento de, por ejemplo, una sombra amenazadora. La solu-

ción mínima consiste en revestir las fotocélulas por un lado con una pantalla oscura. Una fotocélula transparente sin ninguna pantalla recibe luz de todas direcciones, por lo que no puede discernir de dónde proviene la luz. Un animal con una sola fotocélula en la cabeza ya será capaz de dirigirse hacia la luz o apartarse de ella siempre que dicha fotocélula esté apantallada. Una fórmula sencilla para conseguirlo es balancear la cabeza como un péndulo y, si hay disparidad en la intensidad luminosa a uno y otro lado, cambiar de dirección hasta que se iguale. Algunas queresas siguen esta pauta para apartarse de la luz.

Pero balancear la cabeza de un lado a otro es una forma muy rudimentaria de detectar la dirección de la luz, propia de las laderas más bajas del monte Improbable. Una solución mejor es poseer más de una fotocélula apuntando en direcciones distintas, cada una de ellas apantallada en su parte posterior. Después, mediante la comparación de las tasas de lluvia fotónica sobre las dos células se pueden hacer inferencias sobre la dirección de la luz. Si se posee toda una alfombra de fotocélulas, una solución aún mejor es combarla de manera que las fotocélulas de las diferentes partes de la curva resultante apunten en direcciones sistemáticamente distintas. Una curva convexa puede conducir al «ojo compuesto» que poseen los insectos, y volveré a ello después. Una curva cóncava forma una concavidad que conduce al otro tipo principal de ojo, el ojo tipo cámara como el nuestro. La luz procedente de direcciones distintas estimulará fotocélulas de diferentes partes del cáliz, y cuántas más células haya mayor será la discriminación.

Los rayos luminosos son detenidos por la pantalla negra que reviste la concavidad (figura 5.3). Si se sigue la pista de qué fotocélulas son estimuladas y cuáles no, el cerebro puede detectar la dirección de la que procede la luz. Desde el punto de vista del ascenso al monte Improbable, lo que importa es que existe una gradación evolutiva continua (una suave inclinación montaña arriba) que conecta los animales dotados de un tapiz plano de fotocélulas con los animales dotados de una concavidad. Las concavidades pueden hacerse gradualmente más profundas o gradualmente más someras, mediante una gradación lenta y continua. Cuanto más profunda es la concavidad, mayor es la capacidad del ojo para discriminar la procedencia de la luz. En esta ascensión no hay que superar saltando ningún precipicio escarpado.

Los ojos en copa como éstos son comunes en el reino animal. La

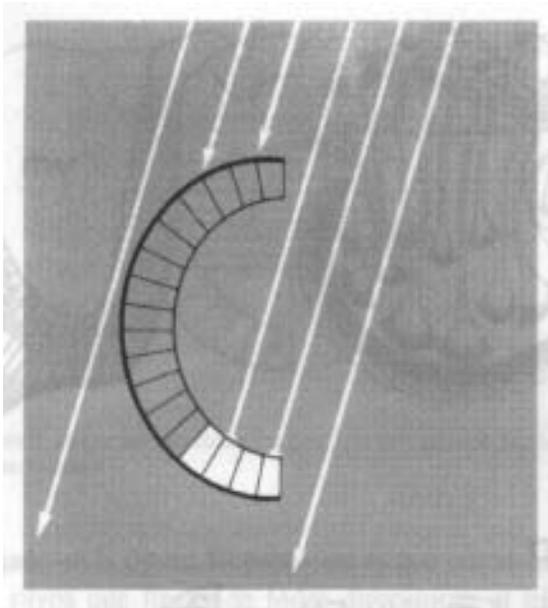


Figura 5.3. Un ojo en copa sencillo puede detectar la dirección de la luz.

figura 5.4 muestra los ojos de una lapa, un poliqueto, una almeja y una planaria. Es probable que estos ojos hayan desarrollado evolutivamente su forma cóncava de manera independiente. Esto resulta especialmente claro en el caso del ojo de la planaria, que traiciona su origen distinto al situar sus fotocélulas *debajo* de las células nerviosas. A primera vista, esta disposición parece un tanto estrafalaria (los rayos luminosos tienen que atravesar una espesura de nervios conectores antes de llegar a las fotocélulas) pero no nos mostremos demasiado desdénosos al respecto, porque este mismo diseño aparentemente pobre deslucen nuestros propios ojos, mucho más elaborados. Volveré sobre ello y demostraré que, de hecho, no es una solución tan mala como parece.

En cualquier caso, un ojo en copa por sí solo está lejos de poder formar lo que nosotros humanos, con nuestros excelentes ojos, reconoceríamos como una imagen aceptable. Nuestro procedimiento de formación de imágenes, que depende del principio de la lente, requiere unas cuantas explicaciones. Abordaremos el problema preguntándonos por qué un tapiz de fotocélulas por sí solo, o una concavidad somera,

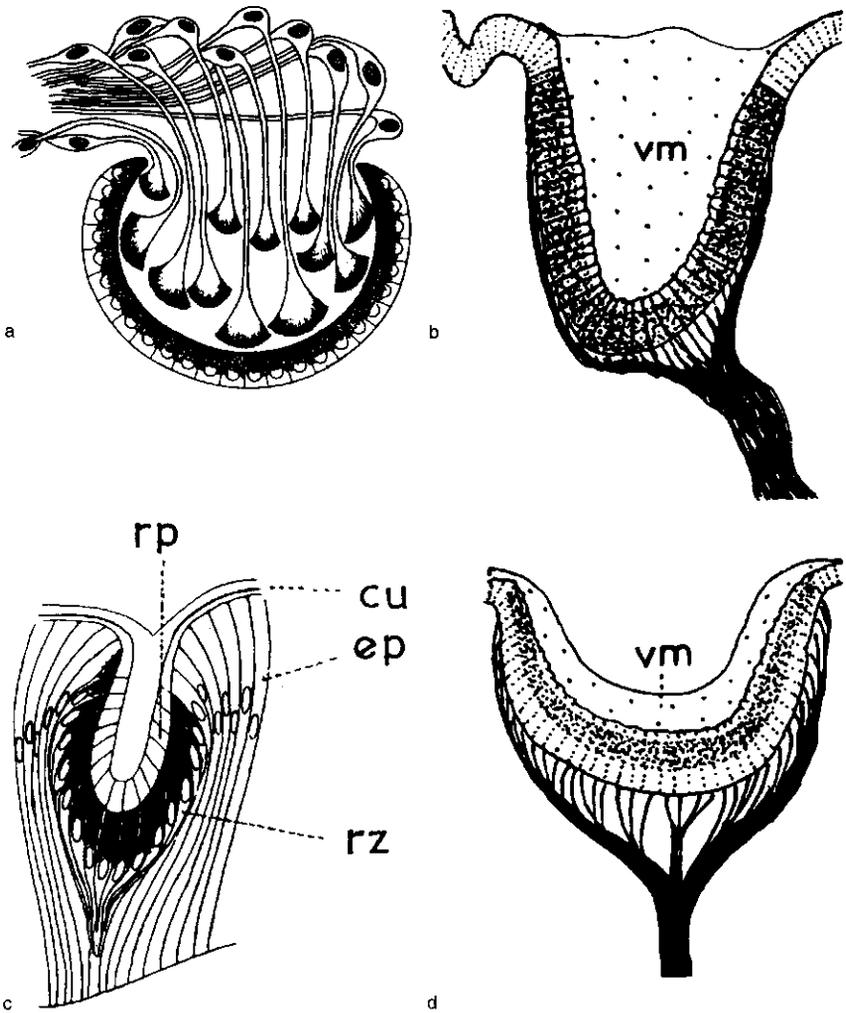


Figura 5.4. Ojos en copa de todo el reino animal: a) platelminto; b) molusco bivalvo; c) gusano poliqueto; d) lapa.

no verán la imagen de, digamos, un delfín, aun cuando dicho delfín se muestre de manera conspicua ante ellos.

Si los rayos luminosos se comportaran como en la figura 5.5, todo sería fácil: sobre la retina aparecería una imagen del delfín, en la misma posición que el original. Pero, desafortunadamente, no se comportan así. Para ser más exactos, hay rayos que sí hacen exactamente lo

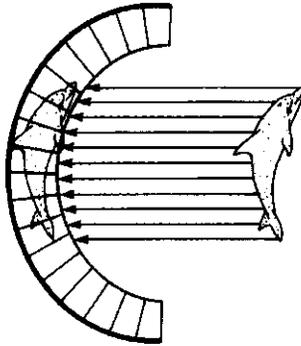


Figura 5.5. Manera en que *no* funcionan los ojos; ¡ya nos gustaría que los rayos luminosos fueran tan serviciales!

que he dibujado en la figura. El problema es que son inundados por innumerables rayos que llegan de todas direcciones al mismo tiempo. Todos y cada uno de los puntos del delfín envían un rayo a todos y cada uno de los puntos de la retina; y no sólo todos y cada uno de los puntos del delfín, sino todos y cada uno de los puntos del fondo y del resto de la escena. Se puede visualizar el resultado como un número infinito de imágenes del delfín en todas las localizaciones y posiciones posibles sobre la superficie de la concavidad. Pero lo que esto supone, obviamente, es que no se forma imagen alguna, sólo una dispersión uniforme de luz sobre toda la superficie (figura 5.6).

Hemos diagnosticado el problema. El ojo está viendo demasiado: una infinidad de delfines en lugar de uno solo. La solución obvia es restar: eliminar todas las imágenes del delfín excepto una, no importa cuál. Ahora bien, ¿cómo nos libramos de las restantes? Una manera es ascender penosamente por la misma senda del monte Improbable que nos dio la concavidad, haciéndola cada vez más profunda y cerrada hasta que la abertura quede reducida a un pequeño agujero. Ahora la inmensa mayoría de rayos tiene vedada la entrada. La minoría restante forma un número reducido de imágenes similares (invertidas) del delfín (figura 5.7). Si el agujero se reduce hasta el extremo, desaparece la imagen borrosa y queda una única imagen del delfín (en realidad, los agujeros extremadamente pequeños introducen un nuevo tipo de borrosidad, pero por el momento olvidaremos este punto). Podemos consi-

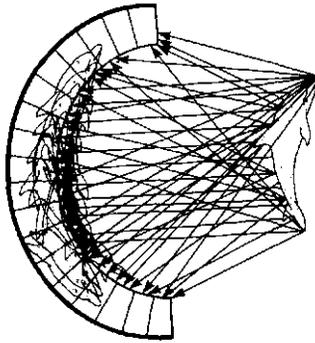


Figura 5.6. Los rayos luminosos procedentes de todas partes van a todas partes y no se ve ninguna imagen. Una infinidad de imágenes de delfines que entrechocan, y no se ve nada claro.

derar que el agujero es un filtro de imágenes que elimina todos los delfines menos uno de la ofuscadora cacofonía visual.

El efecto del orificio minúsculo es sólo una versión extrema del efecto de la concavidad ya comentado, que permite discernir la procedencia de la luz. Sólo hay que subir un poco por la misma pendiente del monte Improbable, sin precipicios de por medio. No hay ninguna dificultad para que evolucione un ojo tipo cámara oscura a partir de un ojo en copa, como tampoco la hay para que evolucione un ojo en copa a partir de una lámina plana de fotocélulas. La pendiente ascendente del tapiz plano a la cámara es gradual y se puede subir fácilmente por ella. Subirla representa una eliminación progresiva de las imágenes conflictivas hasta que, en la cumbre, sólo queda una.

Los ojos tipo cámara oscura se encuentran por todo el reino animal. El ojo más completo de esta clase es el del enigmático *Nautilus* (figura 5.8a), un molusco emparentado con los extinguidos amonites (y pariente lejano del pulpo, aunque provisto de una concha arrollada). Otros, como el ojo del caracol marino de la figura 5.8b, quizá se describan mejor como concavidades profundas más que como cámaras oscuras, e ilustran la suavidad de esta pendiente ascendente particular del monte Improbable.

En primera aproximación, parece que el ojo tipo cámara oscura tendría que funcionar bastante bien, siempre que el orificio frontal fuera lo bastante pequeño. Uno podría pensar que, si el orificio fuera

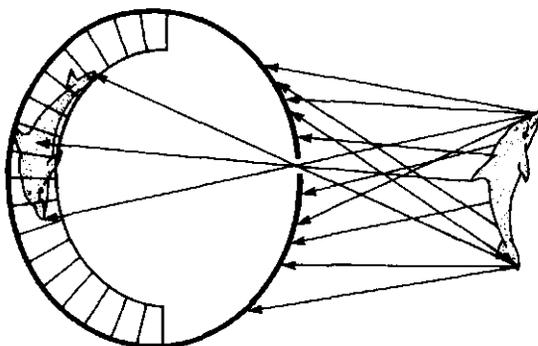


Figura 5.7. Principio del ojo tipo cámara oscura. La mayor parte de las imágenes del delfín que compiten entre sí son omitidas. Idealmente, sólo una (invertida) atraviesa el orificio.

casi infinitesimal, se obtendría una imagen casi infinitamente perfecta al eliminarse la inmensa mayoría de imágenes competidoras que interfieren. Pero ahora surgen dos nuevos obstáculos. Uno es la difracción. Se trata de un problema de borrosidad derivada del hecho de que la luz se comporta como lo harían las ondas, que pueden interferir entre sí. Esta borrosidad se acentúa al disminuir el orificio. El otro obstáculo que surge con un orificio pequeño nos hace recordar la dureza de nuestra «economía fotónica». Si el orificio es lo bastante pequeño para dar una imagen nítida, entonces dejará pasar tan poca luz que no se podrá ver el objeto a menos que esté iluminado por una luz de intensidad descomunal. Con una intensidad de luz normal no pasarán a través del orificio suficientes fotones para que el ojo esté seguro de lo que ve, lo que constituye otra versión del problema del cometa Halley. Esto puede combatirse abriendo de nuevo el orificio, pero entonces volvemos a estar como al principio, con una confusión de «delfines» en competencia. La economía fotónica nos ha conducido a un atolladero en esta ladera concreta del monte Improbable. El ojo tipo cámara oscura sólo puede ofrecer una imagen nítida pero oscura, o una imagen luminosa pero borrosa. No se pueden tener las dos cosas a la vez. Estas limitaciones son el pan de cada día para los economistas, y por eso acuñé la idea de una economía de fotones. Ahora bien, ¿acaso no hay manera de conseguir una imagen que sea brillante y nítida a la vez? Por suerte sí la hay.

En primer lugar, pensemos en el problema en términos informáticos. Imaginemos que ampliamos el orificio para permitir que pase una buena cantidad de luz, pero, en lugar de dejarlo abierto, insertamos una «ventana mágica», una obra maestra de la magia electrónica embutida en vidrio y conectada a un ordenador (figura 5.9). La propiedad de esta ventana controlada por ordenador es la siguiente: los rayos luminosos, en lugar de atravesar el cristal en línea recta, son desviados con un cierto ángulo cuidadosamente calculado por el ordenador para que todos los rayos que parten de un punto (por ejemplo, el hocico del delfín) converjan en un punto correspondiente de la retina. Sólo he dibujado los rayos que parten del hocico del delfín, pero, obviamente, la pantalla mágica no tiene preferencias y realiza el mismo cálculo para los demás puntos. Todos los rayos que se originan en la cola del delfín son desviados para converger en un punto de la retina correspondiente a la cola, y así sucesivamente. El resultado de la ventana mágica es que sobre la retina aparece una imagen nítida del delfín. Pero no es oscura como la imagen procedente de un orificio minúsculo, porque gran cantidad de rayos (lo que significa un torrente de fotones) convergen desde el hocico del delfín, gran cantidad de rayos convergen desde la cola del delfín, gran cantidad de rayos convergen desde cualquier punto del delfín hasta el punto correspondiente en la retina. La ventana mágica tiene todas las ventajas de la cámara oscura, sin su gran desventaja.

Todo esto de la «ventana mágica» está muy bien como ejercicio de la imaginación, ¿pero acaso no es más fácil decirlo que hacerlo? Piénsese en la enorme complicación de los cálculos que tiene que efectuar el ordenador conectado a la ventana mágica. Está recibiendo millones de rayos luminosos procedentes de millones de puntos del mundo exterior. De cada punto del delfín parten millones de rayos en millones de ángulos hacia puntos diferentes de la superficie de la ventana mágica. Los rayos se entrecruzan en una abrumadora maraña de líneas rectas como si fueran espaguetis. La ventana mágica, con su ordenador asociado, debe tratar todos y cada uno de estos millones de rayos por separado y calcular con precisión su propio ángulo de desvío. ¿De dónde podría venir este ordenador maravilloso, como no sea de un complicado milagro? ¿Es aquí donde encontramos nuestro Waterloo, un precipicio inevitable en nuestro camino monte Improbable arriba?

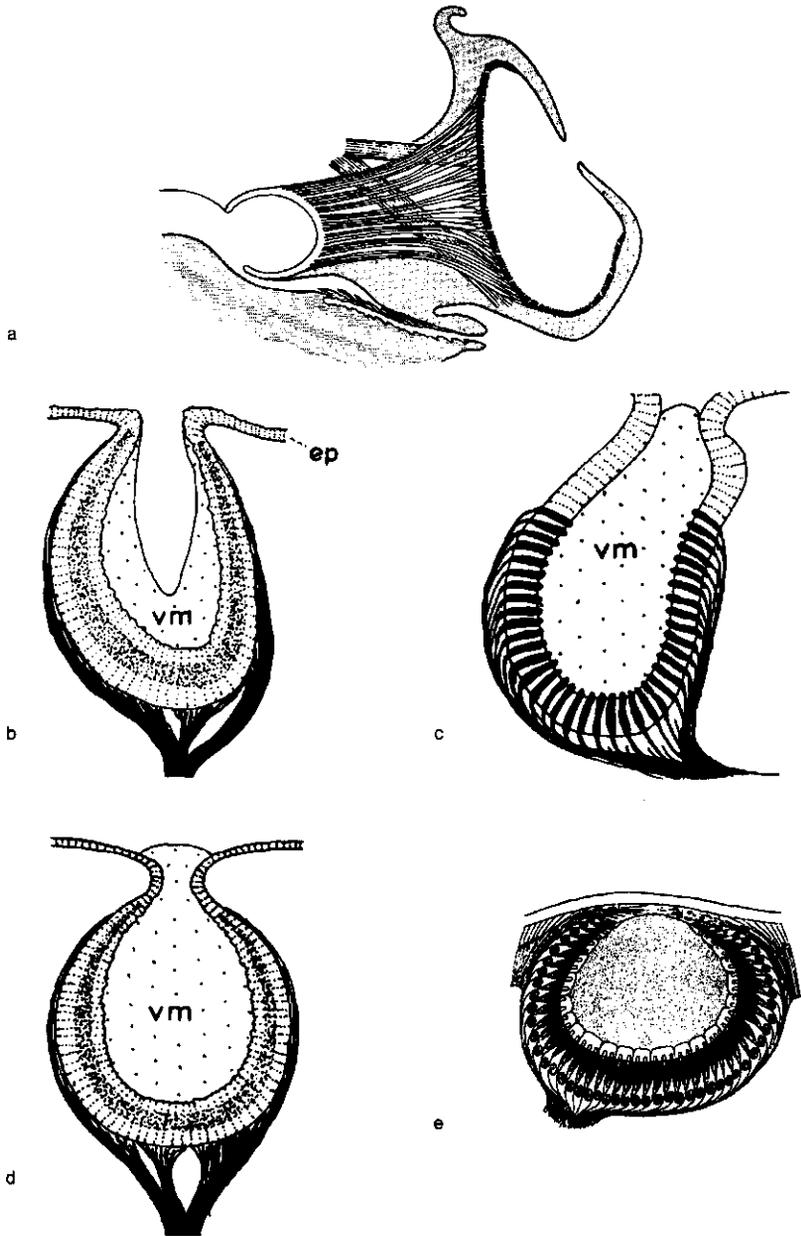


Figura 5.8. (Página opuesta). Una selección de ojos de invertebrados que ilustran distintas aproximaciones a la formación de imágenes toscas pero efectivas: a) ojo tipo cámara oscura de *Nautilus*; b) caracol marino; c) molusco bivalvo; d) oreja de mar; e) gusano poliqueto (*Nereis diversicolor*).

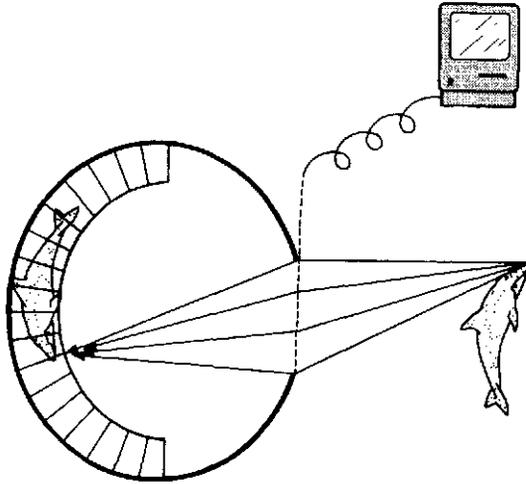


Figura 5.9. Un enfoque hipotético, complicado y ridículamente caro, del problema de formar una imagen que sea a la vez nítida y luminosa: la «lente computerizada».

Curiosamente, la respuesta es no. El ordenador de la figura no es más que una creación imaginaria para subrayar la complejidad *aparente* de la tarea si se considera de cierta manera. Pero si enfocamos el problema de otra forma, la solución resulta absurdamente fácil. Existe un dispositivo ridículamente simple que tiene justo las mismas propiedades que nuestra ventana mágica, pero sin ordenador, sin brujería electrónica, sin complicación alguna. Este dispositivo es la lente. No necesitamos ordenador porque no hay ninguna necesidad de hacer cálculos de manera explícita. De los cálculos aparentemente complicados de millones de ángulos de desviación se ocupa, de forma automática y sin alharaca, una masa curvada de material transparente, el cristalino. Dedicaré algo de tiempo a explicar el funcionamiento de las lentes, como prelude de la demostración de que la evolución del cristalino no tiene por qué haber sido enormemente difícil.

Es un hecho físico que los rayos luminosos se desvían al pasar de un material transparente a otro (figura 5.10). El ángulo de desviación depende del tipo de materiales considerados, porque algunas sustancias poseen un índice de refracción (una medida de la capacidad de desviar la luz) mayor que el de otras. Si hablamos de cristal y agua, el ángulo de desviación es pequeño, porque el índice de refracción del agua es casi el

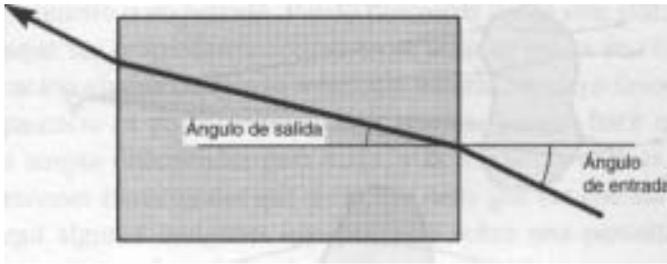


Figura 5.10. Desviación de la luz. Principio de refracción en un bloque de cristal.

mismo que el del cristal. Si la interfase es entre cristal y aire, la luz se desvía en un ángulo mayor porque el aire posee un índice de refracción relativamente bajo. En la interfase entre agua y aire, el ángulo de desviación es lo bastante grande para hacer que un remo parezca quebrado.

La figura 5.10 representa un bloque de cristal en el aire. La línea gruesa es un rayo luminoso que penetra en el bloque y es desviado por el cristal, y cuando sale por el otro lado se desvía de nuevo recuperando el ángulo original. Pero, obviamente, no hay razón por la que un glóbulo de material transparente deba tener lados netamente paralelos. En función del ángulo de la superficie del glóbulo, un rayo puede ser desviado en cualquier dirección que uno elija, y si el glóbulo tiene facetas con muchos ángulos distintos se puede hacer desviar un conjunto de rayos en muchas direcciones distintas (figura 5.11). Si el glóbulo está curvado de forma convexa en una de sus caras o en ambas, será una lente: el equivalente funcional de nuestra ventana mágica. Los materiales transparentes no son especialmente raros en la naturaleza. El aire y el agua, dos de las sustancias más comunes de nuestro planeta, son transparentes. También lo son muchos otros líquidos. Lo son asimismo algunos cristales si su superficie está pulida, por ejemplo por la acción del oleaje en el mar, de manera que se hayan eliminado las asperezas superficiales. Imagínese un guijarro de algún material cristalino desgastado por las olas. Los rayos luminosos de una fuente puntual son desviados en toda clase de direcciones por el guijarro, en función de los ángulos de la superficie del mismo. Hay guijarras de todas las formas. Es muy común que sean convexos por ambas caras. ¿Qué efecto producirá esto sobre los rayos luminosos procedentes de una fuente determinada, como una bombilla incandescente?

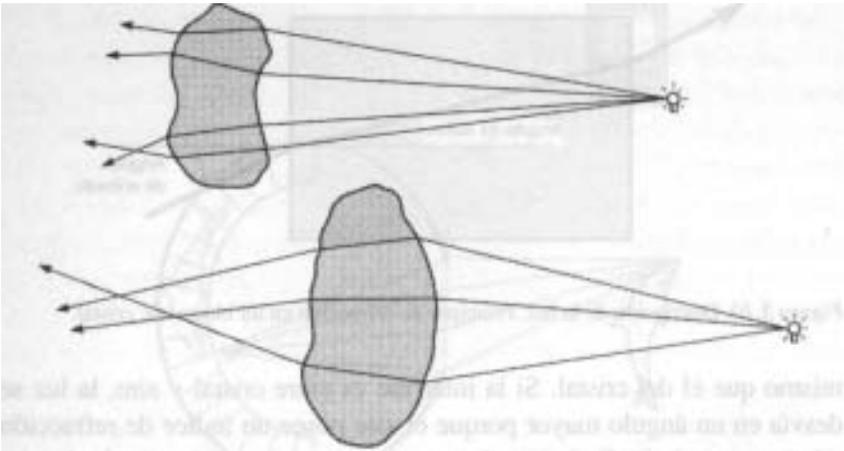


Figura 5.11. Guijarros aleatorios refractan los rayos en direcciones sin ninguna utilidad.

Quando los rayos emergen de un guijarro cuyas caras son vagamente convexas tienden a converger. No hacia un punto definido y único como haría nuestra «ventana mágica» hipotética. Esto sería esperar demasiado. Pero existe una tendencia definida en la dirección correcta. Cualquier guija de cuarzo a la que la erosión haya dado una forma suavemente curvada por ambas caras serviría como una «ventana mágica» aceptable, una lente capaz de formar imágenes que, aunque lejos de ser nítidas, serían mucho más luminosas que las que produciría una cámara oscura. Las guijas desgastadas por el agua suelen ser convexas por ambas caras. Si estuviesen hechas de material transparente, muchas de ellas constituirían unas lentes bastante útiles, aunque toscas.

Un guijarro es sólo un ejemplo de un objeto accidental, no diseñado, que puede funcionar como una lente tosca. Hay otros. Una gota de agua que pende de una hoja tiene bordes curvos. No puede remediarlo. Automáticamente, sin necesidad de refinamiento adicional alguno por nuestra parte, funcionará como una lente rudimentaria. Líquidos y geles adoptan de manera automática formas curvadas a menos que haya alguna fuerza, como la de la gravedad, que se oponga positivamente a ello. Ello significará muchas veces que no tendrán más remedio que funcionar como lentes. Lo mismo sucede a menudo con los materiales biológicos. Una medusa joven tiene forma de lente y a la

vez es bellamente transparente. Puede funcionar como una lente aceptable, aunque sus propiedades ópticas no se utilizan nunca en vida y no hay indicación alguna de que la selección natural las haya favorecido. La transparencia es probablemente una ventaja, porque hace que sus enemigos tengan dificultades para verla, y la forma curvada es ventajosa por razones estructurales que no tienen nada que ver con las lentes.

He aquí algunas imágenes que proyecté sobre una pantalla utilizando varios dispositivos formadores de imágenes, toscos y no diseñados intencionalmente. La figura 5.12a muestra una gran letra A tal como se ve proyectada sobre una hoja de papel en la parte posterior de una cámara oscura (una caja de cartón cerrada con un agujero en una cara). Probablemente no la podríamos leer si no se nos dijera qué es, aunque utilicé una luz bastante intensa para producir la imagen. Para que entrara la luz suficiente para poder leerla, tuve que hacer el orificio bastante grande, de alrededor de un centímetro de diámetro. Podría haber conseguido una imagen más nítida reduciendo el orificio, pero entonces la película no la habría registrado (la restricción económica que ya hemos comentado).

Veamos ahora la diferencia que supone una «lente», aunque sea accidental y tosca. Para la figura 5.12b se proyectó de nuevo la misma letra a través del mismo agujero sobre la pared posterior de la misma caja de cartón. Pero esta vez colgué delante del agujero una bolsa de polietileno llena de agua. La bolsa no estaba diseñada para actuar de lente. Simplemente pende de manera natural adoptando una forma curvilínea cuando se la llena de agua. Sospecho que una medusa, al tener una curvatura lisa y no fruncida en arrugas, habría producido una imagen todavía mejor. La figura 5.12c (CAN YOU READ THIS? [¿Puedes leer esto?]) se hizo con la misma caja de cartón y el mismo agujero, pero esta vez se colocó delante una copa de vino redondeada llena de agua en lugar de una bolsa colgante. Huelga decir que la copa de vino es un objeto manufacturado, pero sus diseñadores nunca pretendieron que actuara como lente y le dieron su forma globular por otras razones. De nuevo, un objeto que no fue diseñado con este propósito resulta ser una lente aceptable.

Es obvio que los animales ancestrales no disponían de bolsas de polietileno ni copas de vino. No estoy sugiriendo que la evolución del ojo pasó por una fase de bolsa de polietileno, del mismo modo que no pasó

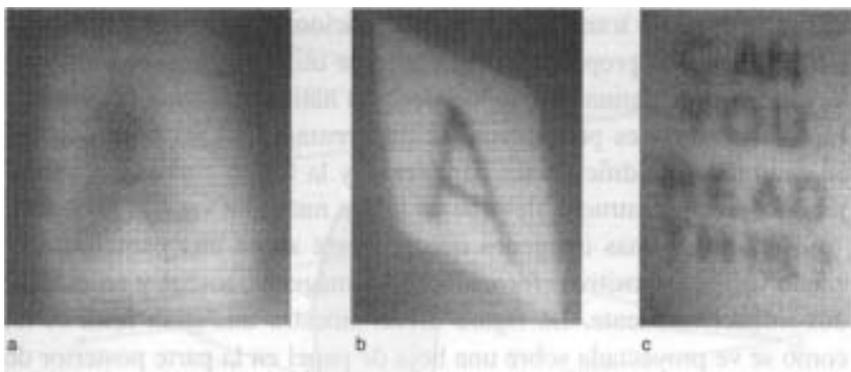


Figura 5.12. Imágenes vistas a través de varios orificios provisionales y de lentes provisionales y toscas: a) un orificio simple; b) una bolsa blanda de polieteno llena de agua; c) una copa de vino cilíndrica llena de agua.

por una fase de caja de cartón. Lo importante acerca de la bolsa de polieteno es que, igual que una gota de lluvia, una medusa o un cristal de cuarzo redondeado, no fue diseñada para actuar como lente. Su forma de lente se debe a alguna otra razón que resulta tener alguna influencia sobre su naturaleza.

Así, pues, no es difícil que aparezcan espontáneamente objetos lentiformes rudimentarios. Basta con que cualquier burujo de gelatina semitransparente adopte una forma curvada (y hay todo tipo de razones para que lo haga) y de inmediato conferirá al menos una cierta mejora sobre una concavidad o un orificio simple. Una cierta mejora es todo lo que hace falta para subir lentamente las pendientes inferiores del monte Improbable. ¿Qué aspecto debían tener las formas intermedias? Volvamos a la figura 5.8 (de nuevo tengo que recordar que se trata de animales modernos, y por lo tanto no se les debe considerar una verdadera serie ancestral). Adviértase que la concavidad de la figura 5.8b, correspondiente a un caracol marino, posee un revestimiento de gelatina transparente, la «masa vítrea» (vm), que posiblemente sirve para proteger las fotocélulas sensoriales del contacto directo con el agua de mar que fluye a través de la abertura. Esta masa vítrea meramente protectora posee una de las cualidades necesarias de una lente (transparencia), pero carece de la curvatura correcta y necesita engrosarse. Obsérvense ahora las figuras 5.8c, d y e, que son los ojos de un molusco bi-

valvo, una oreja de mar y un gusano poliqueto. Además de proporcionar ejemplos adicionales de ojos en copa y de intermedios entre copa y cámara oscura, todos estos ojos poseen masas vitreas muy engrosadas. Las masas vitreas de forma más o menos regular son ubicuas en el reino animal. En tanto que lentes, ninguno de estos grumos de gelatina llamaría la atención del señor Zeiss o el señor Nikon. No obstante, cualquier grumo de gelatina que posea una pequeña curvatura convexa supondría una mejora significativa sobre un orificio abierto.

La principal diferencia entre una buena lente y algo parecido a la masa vitrea de la oreja de mar es ésta: para obtener los mejores resultados, la lente debe estar desligada de la retina y separada una cierta distancia de ella. La separación no tiene por qué estar vacía. Puede estar rellena con más masa vitrea. Todo lo que se necesita es que la lente posea un índice de refracción superior al de la sustancia que separa la lente de la retina. Hay varias maneras de conseguirlo, ninguna de ellas difícil. Mencionaré sólo una, en la que la lente se condensa a partir de una región localizada en la porción frontal de una masa vitrea como la que se ilustra en la figura 5.8e.

En primer lugar, recuérdese que todas las sustancias transparentes poseen un cierto índice de refracción, que es una medida de su capacidad para desviar los rayos luminosos. Los constructores de lentes normalmente asumen que el índice de refracción de una masa de vidrio es uniforme. Una vez un rayo luminoso ha penetrado en una lente de vidrio determinada y ha cambiado apropiadamente de dirección, sigue una línea recta hasta que llega al otro extremo de la lente. El arte del constructor de lentes reside en esmerilar y pulir la superficie del vidrio para darle una forma precisa y en unir diferentes lentes en cascadas compuestas.

Se pueden acoplar distintos tipos de vidrio de forma complicada para producir lentes compuestas con diversos índices de refracción en las distintas partes del conjunto. La lente de la figura 5.13a, por ejemplo, tiene un núcleo central formado por un tipo de vidrio con un índice de refracción superior. Pero todavía es un cambio discreto de un índice de refracción a otro. En principio, sin embargo, no hay razón por la que una lente no pueda tener un índice de refracción que varíe de manera continua en todo su interior. Esto se ilustra en la figura 5.13b. A los constructores humanos de lentes les resulta difícil conse-

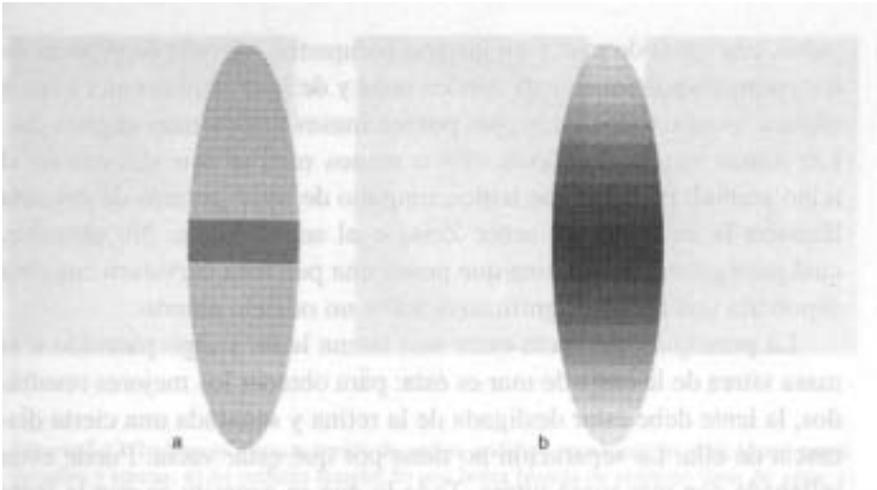


Figura 5.13. Dos tipos de lente compleja.

guir una «lente de índice gradual» de este estilo.* Pero las lentes vivas no tienen dificultad para adquirir esta estructura, porque no se forman de golpe, sino que se desarrollan a partir de pequeños esbozos embrionarios. De hecho, encontramos lentes de índice de refracción gradual en peces, pulpos y otros muchos animales. Si se observa con detenimiento la figura 5.8e, se puede ver lo que concebiblemente es una región de índice de refracción variable en la región tras la abertura del ojo.

Pero estaba empezando a contar la historia de cómo podrían haber evolucionado las lentes a partir de una masa vítrea que ocupaba todo el

* Después de escribir esto un corresponsal, Howard Kleyn, que había trabajado para la compañía Cable and Wireless, me informó de que los fabricantes sí producen algo equivalente a una lente de índice gradual. De hecho se trata de una fibra óptica de índice gradual. Según su descripción, funciona del siguiente modo. Se empieza con un tubo hueco de vidrio de cerca de un metro de longitud y unos pocos centímetros de diámetro, que hay que caldear. A continuación se insufla polvo de vidrio en el tubo. El vidrio en polvo se funde y se une al revestimiento interno del tubo, con lo que lo engruesa al tiempo que se estrecha el diámetro interior. Ahora viene la parte ingeniosa. A medida que avanza el proceso, se modifica gradualmente la calidad del polvo de vidrio insuflado, obtenido a partir de vidrio de un índice de refracción progresivamente mayor. Para cuando el hueco central se ha rellenado, el tubo se ha convertido en una varilla de vidrio muy refractante en su núcleo central, pero con un índice de refracción progresivamente menor de dentro a fuera. Entonces se calienta de nuevo la varilla y se estira en un fino filamento. Este filamento conserva el gradiente de índice de refracción de la varilla de la que procede. Técnicamente es una lente de índice gradual, aunque muy delgada y larga. Sus propiedades ópticas se utilizan no para enfocar una imagen, sino para mejorar su calidad como guía luminoso que no permite que su haz de luz se disperse. Por lo general, se utilizan varios de estos filamentos para fabricar un cable de fibra óptica multihebra. (*N. del A.*)

ojo. El principio del proceso y la velocidad con la que pudo haber transcurrido han sido magníficamente simulados con un modelo informático obra de los biólogos suecos Dan Nilsson y Susanne Pelger. Describiré este elegante modelo de una manera algo oblicua. En lugar de ir directamente al grano, comenzaremos rememorando nuestra progresión desde el modelo de los biomorfos hasta NetSpinner, y nos preguntaremos de qué modo podríamos, idealmente, abordar un modelo similar de la evolución del ojo. Después veremos que esto es lo que en esencia hicieron Nilsson y Pelger, aunque su planteamiento no fue exactamente el mismo.

Recordemos que los biomorfos evolucionaban mediante selección artificial: el agente seleccionador era la predilección humana. Dado que no se nos ocurría una manera realista de incorporar la selección natural al modelo, decidimos que era mejor modelar telarañas. La ventaja de las telarañas era que, al desenvolverse en un plano bidimensional, su eficiencia en la captura de moscas podía estimarse automáticamente con ayuda del ordenador. También podía calcularse el coste de la seda, lo que permitía que el ordenador pudiese «elegir» automáticamente telarañas modelo en una especie de selección natural. Conveníamos en que las telarañas eran excepcionales en este sentido: no podíamos esperar aplicar el mismo tratamiento a la columna vertebral de un guepardo que caza o a la aleta dorsal de una ballena que nada, porque los detalles físicos implicados en la evaluación de la eficiencia de un órgano tridimensional son demasiado complicados. Pero, en este sentido, un ojo es como una telaraña. La eficiencia de un modelo de ojo en dos dimensiones puede ser estimada automáticamente por el ordenador. No quiero decir que el ojo sea una estructura bidimensional, porque no lo es. Lo que pasa es que, si se supone que el ojo es esférico, puede estimarse su eficiencia tridimensional a partir de una sección transversal que pase por el centro. El ordenador puede efectuar un sencillo análisis del recorrido de los rayos y establecer la agudeza de la imagen que se formaría. Esta puntuación de calidad es equivalente al cálculo que hacía NetSpinner de la eficiencia de una telaraña en la captura de moscas informáticas.

Al igual que las redes de NetSpinner procreaban telarañas hijas mutantes, podemos hacer que los modelos de ojo generen ojos hijos mutantes. Cada ojo hijo tendrá básicamente la misma forma que su

progenitor, pero con algún pequeño cambio aleatorio en algún aspecto morfológico menor. Algunos de estos «ojos» informáticos serán tan diferentes de los ojos reales que no merecerán este nombre; pero no importa, todavía podrán desarrollarse, y todavía se podrá puntuar numéricamente su calidad óptica (presumiblemente muy baja). Por lo tanto, y al igual que con NetSpinner, podemos hacer evolucionar en el ordenador ojos mejorados por la selección natural. Podemos empezar con un ojo bastante bueno y a partir de él desarrollar evolutivamente un ojo muy bueno, pero también podemos comenzar con un ojo muy burdo, o sin ojo de ninguna clase.

Es instructivo ejecutar un programa del estilo de NetSpinner como una simulación real de la evolución, haciéndolo comenzar desde un punto de partida rudimentario y esperando a ver en qué termina. Puede ocurrir incluso que distintas series terminen en puntos culminantes diferentes, porque puede que sean accesibles varias cumbres alternativas del monte Improbable. Podríamos hacer funcionar nuestro programa generador de ojos de la misma manera, y obtendríamos una demostración vivida de su evolución. Pero, en realidad, no aprenderíamos mucho más de lo que podemos aprender explorando de manera más sistemática hacia dónde lleva(n) la(s) senda(s) que ascienden por el monte Improbable. Dado un punto de partida, la senda que seguirá la selección natural será siempre ascendente, nunca descendente. Si se hace funcionar el programa en modo evolutivo, es seguro que la selección natural seguirá una senda de este estilo. Lo importante es que las reglas del juego prohíben ir cuesta abajo. Así pues, ahorraremos tiempo de proceso si nos dedicamos a buscar sistemáticamente sendas ascendentes y cumbres que puedan alcanzarse a partir de puntos de partida establecidos. Esto es lo que hicieron Nilsson y Pelger, pero ahora el lector puede ver por qué he preferido introducir su investigación *como si* estuviéramos planeando, junto con ellos, una simulación de la evolución al estilo NetSpinner.

Tanto si decidimos hacer funcionar nuestro modelo en el «modo de selección natural» como en el «modo de exploración sistemática de la montaña», tenemos que decidir sobre algunas reglas embriológicas, es decir, reglas que rigen la manera en que los genes controlan el desarrollo del cuerpo. ¿Sobre qué aspectos de la forma actúan realmente las mutaciones? ¿Y cuán grandes, o cuán pequeñas, son las propias muta-

ciones? En el caso de NetSpinner, las mutaciones actúan sobre aspectos conocidos del comportamiento de las arañas. En el caso de los biomorfos, las mutaciones actúan sobre los ángulos y longitudes de las ramas de árboles en crecimiento. En el caso de los ojos, Nilsson y Pelger empezaron reconociendo que en un ojo tipo «cámara» prototípico hay tres tipos principales de tejido. Existe una envoltura externa generalmente opaca, una capa de «fotocélulas» sensibles a la luz, y algún tipo de material transparente que puede constituir una ventana protectora o bien rellenar el interior de la concavidad (si es que existe tal concavidad, porque en nuestra simulación no damos nada por sentado). El punto de partida de Nilsson y Pelger es una capa plana de fotocélulas (figura 5.14, en gris oscuro), situada sobre una pantalla plana (en negro) y recubierta por una capa plana de tejido transparente (gris claro). Supusieron que la mutación opera causando un pequeño cambio porcentual en el tamaño de algo, como puede ser un pequeño porcentaje de reducción en el grosor de la capa transparente, o un pequeño porcentaje de aumento en el índice de refracción local de una región de dicha capa transparente. La pregunta que se plantearon es: ¿hasta dónde podemos llegar en nuestra ascensión de la montaña si partimos de un determinado campamento base y vamos subiendo uniformemente? Subir significa mutar, un pequeño paso cada vez, y aceptar sólo aquellas mutaciones que mejoren el rendimiento óptico.

¿Adonde nos conduce esto? Plácidamente, a través de una senda de pendiente suave, y partiendo de una situación sin ojo de ninguna clase, llegamos hasta el familiar ojo de pez, con cristalino y todo. No se trata de una lente uniforme como las fabricadas por nosotros, sino de índice gradual, como la de la figura 5.13b. Su índice de refracción, que varía de manera continua, se ha representado en la figura mediante tonos variables de gris. El cristalino se ha «condensado» a partir de la masa vítrea mediante cambios graduales, punto por punto, en el índice de refracción. Aquí no hay juegos de manos. Nilsson y Pelger no preprogramaron su masa vítrea simulada con una lente primordial esperando para entrar en escena. Simplemente permitieron que el índice de refracción de cada elemento de material transparente variara bajo control genético. Cada elemento del material transparente era libre de hacer variar su índice de refracción al azar en cualquier dirección. En el interior de la masa vítrea *podía* haber surgido un número infinitamente va-

nado de patrones de índice de refracción. Lo que hizo que el cristalino apareciera «en forma de lente» fue la movilidad ascendente ininterrumpida, el equivalente de una cría selectiva a partir del ojo que mejor veía en cada generación.

El objetivo de Nilsson y Pelger no era sólo demostrar que existe una trayectoria suave de mejora desde un no-ojo plano hasta un buen ojo de pez. También utilizaron su modelo para estimar el tiempo que tardaría en evolucionar un ojo partiendo de cero. Si a cada paso se modificaba la magnitud de algo en un 1 %, el número total de pasos requeridos era de 1829. No hay nada mágico en este 1%. Si en su lugar tomamos un 0,005%, la misma transformación total habría requerido 363.992 pasos. Nilsson y Pelger tuvieron que reexpresar la transformación total en unidades realistas, no arbitrarias, lo que significa unidades de cambio genético. Para llevar esto a cabo era necesario hacer algunas suposiciones. Tuvieron que fijar, por ejemplo, la intensidad de la selección. Asumieron que, por cada 101 animales con un ojo mejorado que sobrevivían, sobrevivían 100 animales sin mejora. Como puede verse, es una intensidad de selección baja según lo que dicta el sentido común: uno está casi tan bien sin la mejora como con ella. Eligieron deliberadamente esta cifra tan conservadora y «pesimista» para que su estimación de la tasa de evolución estuviese en todo caso sesgada por defecto antes que por exceso. También tuvieron que fijar otros dos parámetros: la «heredabilidad» y el «coeficiente de variación». El coeficiente de variación es una medida de la variabilidad de una población. La selección natural necesita variación para operar, y Nilsson y Pelger eligieron de nuevo un valor bajo, pesimista. La heredabilidad es una medida de la cantidad de variación (la variación total disponible en la población) que se hereda. Si la heredabilidad es baja, entonces la mayor parte de la variación poblacional es causada por el ambiente, y la selección natural, aunque puede «escoger» individuos para que sobrevivan o mueran, tiene escaso impacto sobre la evolución. Si la heredabilidad es alta, la selección tiene un gran impacto sobre las generaciones futuras, porque la supervivencia del individuo se traduce efectivamente en la supervivencia de los genes. Las heredabilidades acostumbran a ser superiores al 50%, de modo que la decisión de Nilsson y Pelger de adoptar un 50% fue también pesimista. Una última imposición pesimista fue que en una generación no podían cambiar simultáneamente distintas partes del ojo.

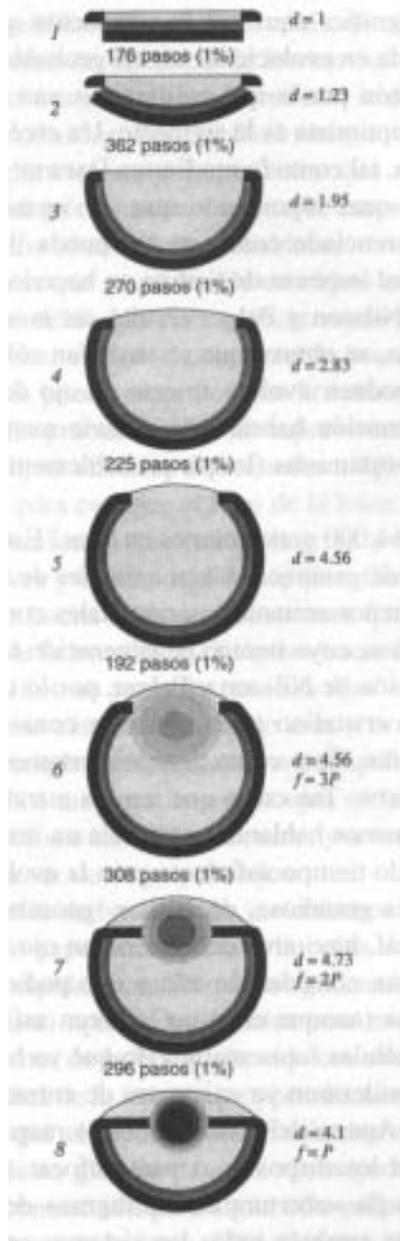


Figura 5.14. Serie evolutiva teórica de Nilsson y Pelger que conduce a un ojo de «pez». El número de pasos entre las distintas fases asume, de forma arbitraria, que cada paso representa un cambio del 1% en la magnitud de algo. Véase en el texto la traducción de estas unidades arbitrarias a número de generaciones de evolución.

«Pesimista» significa aquí que la estimación que tenemos al final del tiempo que tarda en evolucionar un ojo probablemente será errónea por exceso. La razón por la que calificamos una sobreestimación de pesimista y no de optimista es la siguiente. Un escéptico acerca del poder de la evolución, tal como lo era Emma Darwin, tiende de forma natural a considerar que, suponiendo que un órgano tan notablemente complicado y diferenciado como un ojo pueda llegar a evolucionar, tardará una cantidad inmensa de tiempo en hacerlo. En realidad, la estimación final de Nilsson y Pelger resultó ser inesperadamente corta. Al final del cálculo, se obtuvo que se tardarían sólo unas 364.000 generaciones para producir evolutivamente un ojo de pez con cristalino funcional. La estimación habría sido todavía menor si los supuestos hubieran sido más optimistas (lo que probablemente significa más realistas).

¿Cuánto son 364.000 generaciones en años? Esto depende, naturalmente, del tiempo de generación. Los animales de los que estamos hablando serían pequeños animales marinos tales como gusanos, moluscos y peces pequeños, cuyo tiempo de generación típico es de un año o menos. La conclusión de Nilsson y Pelger, por lo tanto, es que la evolución del ojo con cristalino podría haberse conseguido en menos de medio millón de años. Este es un tiempo ciertamente corto, según los estándares geológicos. Tan corto que, en los estratos de las eras antiguas de las que estamos hablando, parecería un instante. La acusación de que no ha habido tiempo suficiente para la evolución del ojo no es que sea errónea, es grandiosa, decisiva e ignominiosamente errónea.

Como es natural, hay otros detalles de un ojo completo que Nilsson y Pelger no han considerado aún y que pudieran tardar bastante más en evolucionar (aunque ellos no lo creen así). Está la evolución preliminar de las células fotosensibles (lo que yo he llamado fotocélulas), que ellos consideraron ya existentes de entrada en su modelo de sistema evolutivo. Aparte del cristalino, otros rasgos avanzados de los ojos modernos son los dispositivos para enfocar, para cambiar el tamaño de la pupila (la «apertura de diafragma» de la cámara) y para mover el ojo. Están también todos los sistemas cerebrales necesarios para procesar la información procedente del ojo. Mover el ojo es importante por razones obvias, pero también (lo que es más indispensable) para mantener la mirada fija cuando el cuerpo se mueve. Las aves

lo consiguen utilizando los músculos del cuello para mantener la posición de la cabeza, con independencia de los movimientos del resto del cuerpo. Los sistemas avanzados para hacer esto implican mecanismos cerebrales bastante refinados. Pero es fácil ver que siempre serían mejor unos ajustes rudimentarios e imperfectos que ninguno, de modo que no hay dificultad en reconstruir una serie ancestral siguiendo una senda suave de ascenso al monte Improbable.

Para enfocar rayos que proceden de un objeto muy distante se necesita una lente más débil que para enfocar rayos procedentes de un objeto cercano. Enfocar con precisión tanto de cerca como de lejos es un lujo sin el cual se puede vivir, pero en la naturaleza cualquier pequeño aumento de las probabilidades de supervivencia cuenta, y es un hecho que muchos tipos distintos de animales exhiben una gran variedad de mecanismos para cambiar el foco de la lente. Los mamíferos lo hacemos mediante músculos que tensan la lente y cambian su forma, lo mismo que las aves y la mayoría de reptiles. Camaleones, serpientes, peces y ranas lo hacen de la misma manera que una cámara, desplazando ligeramente la lente hacia delante o hacia atrás. Los animales con ojos más pequeños no se molestan. Sus ojos son como una Box Brownie, es decir, una cámara sencilla de usar y tirar: enfocan de manera aproximada, aunque poco brillante, a cualquier distancia. A medida que nos hacemos mayores, nuestros ojos se hacen por desgracia cada vez más parecidos a una Box Brownie, y a menudo necesitamos lentes bifocales para ver de cerca y de lejos.

Imaginar la evolución gradual de mecanismos de enfoque no es nada difícil. Cuando experimentaba con la bolsa de polietileno llena de agua, me di cuenta rápidamente de que la agudeza del foco podía mejorarse (o empeorarse) apretando la bolsa con mis dedos. Sin tener conciencia de la forma de la bolsa, sin siquiera mirarla, sólo concentrándome en la calidad de la imagen proyectada, simplemente apreté la bolsa al azar hasta que el foco mejoró. Cualquier músculo situado en las inmediaciones de un glóbulo de masa vitrea podría, como producto secundario de una contracción para algún otro propósito, mejorar incidentalmente el enfoque de la lente. Ello abre una amplia avenida para la mejora paulatina pendiente arriba del monte Improbable, que puede culminar tanto en el método de enfoque de los mamíferos como en el de los camaleones.

Cambiar la apertura (el tamaño del agujero a través del cual entra la luz) puede ser algo más difícil, pero no demasiado. La razón para querer hacerlo es la misma que en una cámara. Para una sensibilidad dada de la película o las fotocélulas, puede haber demasiada luz (que deslumhra) o demasiado poca. Además, cuanto más estrecho es el agujero mejor es la profundidad de campo, la gama de distancias que se encuentran enfocadas simultáneamente. Una cámara o un ojo complicados poseen un fotómetro incorporado que automáticamente cierra el agujero cuando sale el sol y lo abre cuando el sol se pone. La pupila del ojo humano es una pieza de tecnología automática muy compleja, algo de lo que un microingeniero japonés se sentiría orgulloso.

Pero, una vez más, no es difícil apreciar de qué modo podría haberse abierto la senda hacia este mecanismo avanzado en las laderas bajas del monte Improbable. Nuestra pupila es circular, pero esto no es en absoluto obligatorio. Cualquiera forma sirve. Las ovejas y las vacas poseen una pupila alargada, horizontal y romboidal. También la tienen así los pulpos y algunas serpientes, pero en otras es una hendidura vertical. Los gatos poseen una pupila variable entre un círculo y una estrecha rendija vertical (figura 5.15):

¿Sabrá Minnaloushe que sus pupilas
Pasan de un cambio a otro,
Y que de redondas a media luna,
De media luna a redondas fluctúan?
Minnaloushe se arrastra entre la hierba
Solo, importante y sabio,
Y dirige a la luna cambiante
Sus cambiantes ojos.*

W. B. Yeats

Incluso las cámaras más caras suelen tener pupilas poligonales toscas en lugar de círculos perfectos. Lo importante es poder controlar la cantidad de luz que penetra en el ojo. Cuando uno comprende esto, la

* *Does Minnaloushe know that his pupils / Will pass from change to change, / And that from round to crescent, / From crescent to round they range? / Minnaloushe creeps through the grass / Alone, important and wise, / And lifts to the changing moon / His changing eyes.*

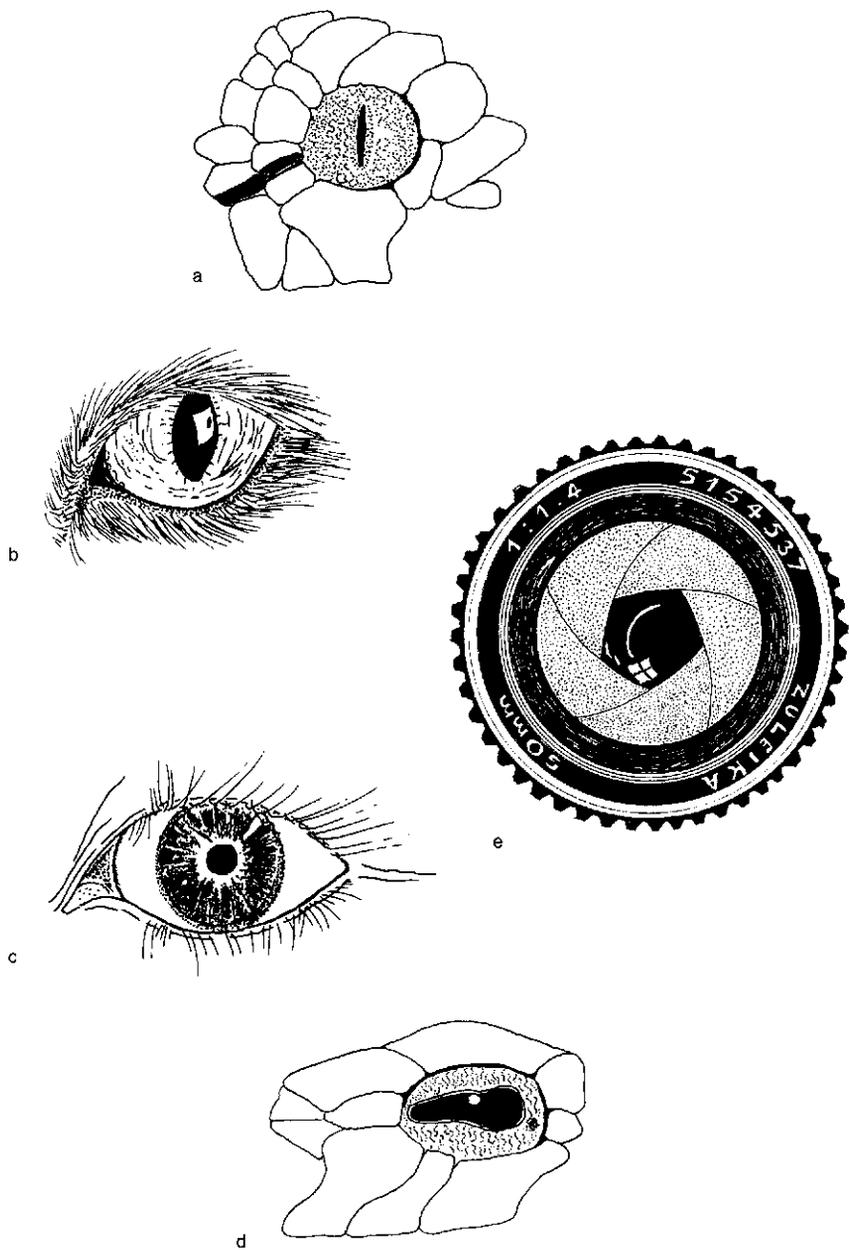


Figura 5.15. Varias pupilas, incluida la de una cámara. La forma exacta de una pupila no importa, razón por la cual es tan variable: a) pitón reticulada; b) gato; c) ser humano; d) serpiente arborícola hocicuda; e) cámara fotográfica.

evolución inicial de la pupila variable deja de ser un problema. Hay muchísimos caminos graduales que seguir desde las laderas inferiores del monte Improbable. El diafragma de iris no es una barrera evolutiva más impenetrable de lo que pueda serlo el esfínter anal. Quizá la magnitud mejorable más importante sea la velocidad de respuesta de la pupila. Una vez se poseen nervios, aumentar su velocidad es un paseo fácil ladera arriba. Las pupilas humanas responden con rapidez, como el lector puede verificar fácilmente iluminando sus ojos con una linterna al tiempo que mira su pupila en un espejo. (El efecto es más espectacular si se dirige la linterna encendida a un ojo mientras se mira la pupila del otro, pues ambos ojos están acoplados.)

Como hemos visto, el modelo de Nilsson y Pelger desarrolló una lente de índice gradual, que es distinta de las lentes manufacturadas, pero semejante a la de peces, calamares y otros ojos tipo cámara de animales subacuáticos. El cristalino surge por condensación de una zona que localmente tiene un índice de refracción elevado en el interior de una gelatina que previamente era de una transparencia uniforme.

No todos los cristalinos evolucionaron mediante condensación de una masa gelatinosa. La figura 5.16 muestra dos ojos de insectos cuyas lentes se forman de manera muy distinta. Se trata de los llamados ojos simples, que no hay que confundir con los ojos compuestos, a los que llegaremos en un momento. En el primero de estos ojos simples, perteneciente a una larva de avispa portasierra, la lente se forma a partir de un engrosamiento de la córnea (la capa externa transparente). En el segundo, perteneciente a una efímera, la córnea no está engrosada, y la lente se desarrolla como una masa de células transparentes e incoloras. Ambos métodos de desarrollo de una lente se prestan al mismo tipo de escalada del monte Improbable que ya hemos visto para el ojo de masa vitrea del gusano. Las lentes o cristalinos, como los propios ojos, parecen haber evolucionado de forma independiente muchas veces. El monte Improbable tiene muchas cumbres y altozanos.

También las retinas delatan sus orígenes diversos. Con una excepción, todos los ojos hasta aquí ilustrados tienen sus fotocélulas situadas por delante de los nervios que las conectan al cerebro. Esta es la disposición evidente, pero no es universal. En el ojo de platelminto de la figura 5.4a los nervios conectores están aparentemente fuera de sitio.

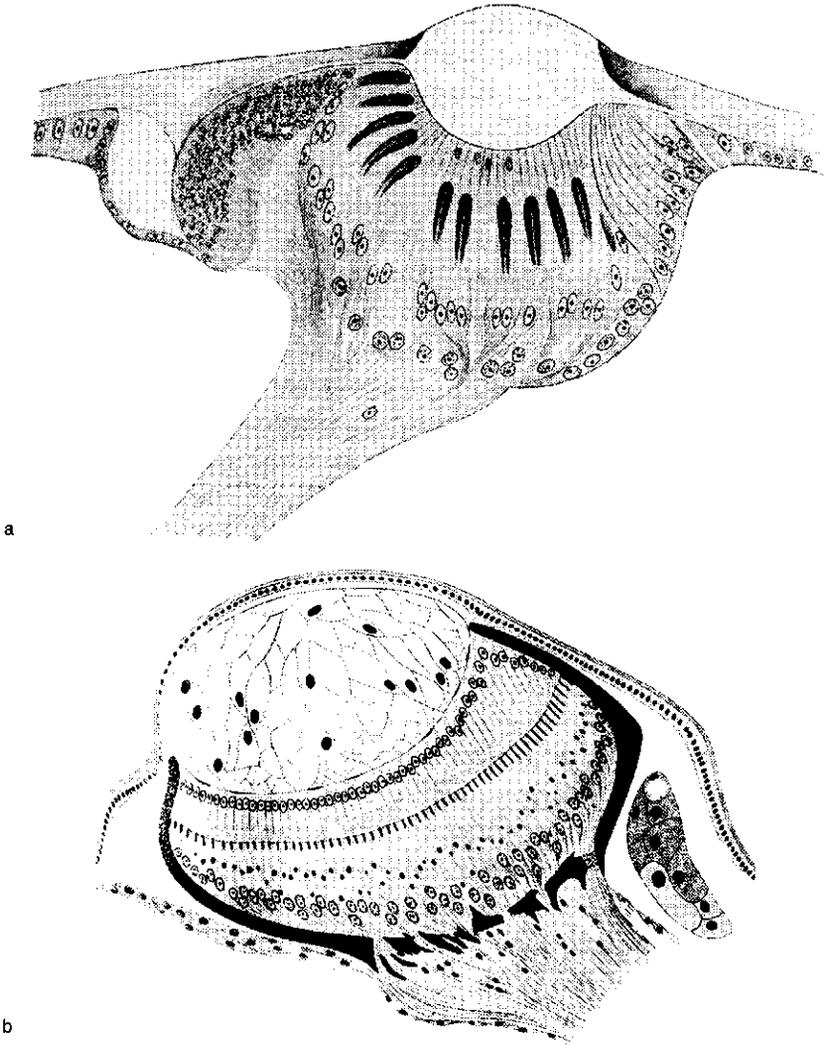


Figura 5.16. Dos formas distintas en que se desarrollan las lentes de los insectos: a) larva de avispa portasierra; b) efímera.

Algo parecido ocurre con nuestros propios ojos de vertebrado. Las fotocélulas apuntan hacia atrás, en sentido contrario a la llegada de la luz. Esto no es tan absurdo como parece. Puesto que son diminutas y transparentes, no importa mucho en qué sentido se disponen las fotocélulas: la mayoría de fotones las atravesarán limpiamente y 11

las pantallas cargadas de pigmento que esperan para captarlos. El único sentido en el que se puede decir que las fotocélulas de los vertebrados apuntan hacia atrás es que los «cables» (nervios) que las conectan al cerebro salen en la dirección equivocada, hacia la luz y no hacia el cerebro. Después recorren la superficie frontal de la retina hacia una zona concreta, el llamado «punto ciego». Por allí atraviesan toda la retina para formar el nervio óptico, razón por la cual la retina es ciega en este punto, aunque apenas nos damos cuenta, porque el cerebro es muy ingenioso a la hora de reconstruir el hueco que falta. Sólo nos apercebimos del punto ciego si la imagen de algún objeto pequeño y discreto, de cuya existencia tenemos una evidencia indirecta, se desplaza hasta situarse en él; entonces parece apagarse como una luz, aparentemente reemplazado por el color de fondo general del área.

He dicho que importa poco el que la retina esté invertida. Se podría argumentar que, dejando igual todo lo demás, habría sido mejor si nuestras retinas tuvieran la posición correcta. Este quizá sea un buen ejemplo de que el monte Improbable tiene más de una cumbre, con valles profundos que las separan. Una vez ha empezado a evolucionar un ojo aceptable con su retina invertida, la única manera de ascender es mejorar el diseño actual del ojo. Cambiar a un diseño completamente distinto significaría ir cuesta abajo, no ya un corto trecho, sino a lo largo de un profundo precipicio, y esto está prohibido por la selección natural. La retina de los vertebrados tiene la posición que tiene debido a la manera en que se forma en el embrión, y esto sin duda se remonta a sus remotos antepasados. Los ojos de muchos invertebrados se desarrollan de maneras distintas y, en consecuencia, sus retinas se hallan en la posición «correcta».

Dejando aparte el interesante hecho de que estén dirigidas hacia atrás, las retinas de los vertebrados escalan algunas de las cimas más altas de la montaña. La retina humana posee alrededor de 166 millones de fotocélulas, clasificables en varios tipos. La división básica es entre bastones (especializados en la visión de baja precisión, en blanco y negro y con niveles de luz relativamente bajos) y conos (especializados en la visión cromática, de alta precisión y con luz intensa). Para leer las palabras aquí escritas el lector utiliza únicamente los conos. Si Juliet hubiera visto el cometa Halley, los responsables hubieran sido sus bastones. Los conos se concentran en una pequeña área central, la fó-

vea, donde no hay bastones. Ésta es la razón por la que, si uno quiere ver un objeto realmente mortecino como el cometa Halley, no debe dirigir sus ojos directamente a él, sino desviar ligeramente la mirada de manera que su escasa luz caiga fuera de la fóvea. El número de fotocélulas y su diferenciación en más de un tipo no presenta especiales problemas desde el punto de vista de la ascensión por el monte Improbable. Es evidente que ambos mejoramientos constituyen gradientes suaves montaña arriba.

Las retinas grandes ven mejor que las pequeñas. En ellas caben más fotocélulas, lo que permite ver con más detalle. Ahora bien, como siempre, esto tiene costes añadidos. Recuérdese el caracol surrealista de la figura 5.1. Sin embargo, hay una forma de que un animal pequeño pueda gozar de una retina mayor de lo que puede permitirse. El profesor Michael Land, de la Universidad de Sussex (que tiene una trayectoria envidiable de descubrimientos exóticos en el mundo de los ojos, y de quien he aprendido mucho de lo que sé sobre el tema) encontró un ejemplo maravilloso en las arañas saltadoras.* Las arañas no poseen ojos compuestos, pero las arañas saltadoras han llevado el ojo tipo cámara a una cumbre notable en cuanto a economía (figura 5.17). Lo que Land descubrió fue una retina extraordinaria. En lugar de una lámina amplia sobre la que se proyecta una imagen completa, consiste en una larga banda vertical, demasiado estrecha para acomodar una imagen decente. Pero la araña compensa la estrechez de su retina mediante un ingenioso truco: la mueve de forma repetitiva, «barriendo» el área de proyección de imágenes. Su retina efectiva es, por lo tanto, mucho mayor que su retina real (en aplicación de un principio semejante al de la araña boleadora, que con su único filamento giratorio se aproxima al área de captura de una telaraña completa). Si la retina de la araña saltadora detecta un objeto interesante, como una mosca en movimiento u otra araña saltadora, concentra sus movimientos de barrido en el área precisa del blanco. Esto le proporciona el equivalente dinámico de una fóvea. Utilizando este inge-

* Estos simpáticos animalillos, cuya costumbre de ladear la cabeza para mirarle a uno les confiere un encanto casi humano, acechan a sus presas como un gato y después saltan sobre ella de manera explosiva y sin previo aviso. Dicho sea de paso, se trata de una actividad explosiva en sentido más o menos literal, puesto que saltan mediante un sistema hidráulico, bombeando fluido simultáneamente a las ocho patas (un poco como hacemos nosotros con nuestros penes —los que lo tenemos—, pero sus «erecciones de patas» son súbitas y no graduales). (*N. del A.*)



Figura 5.17. Arañas saltadoras.

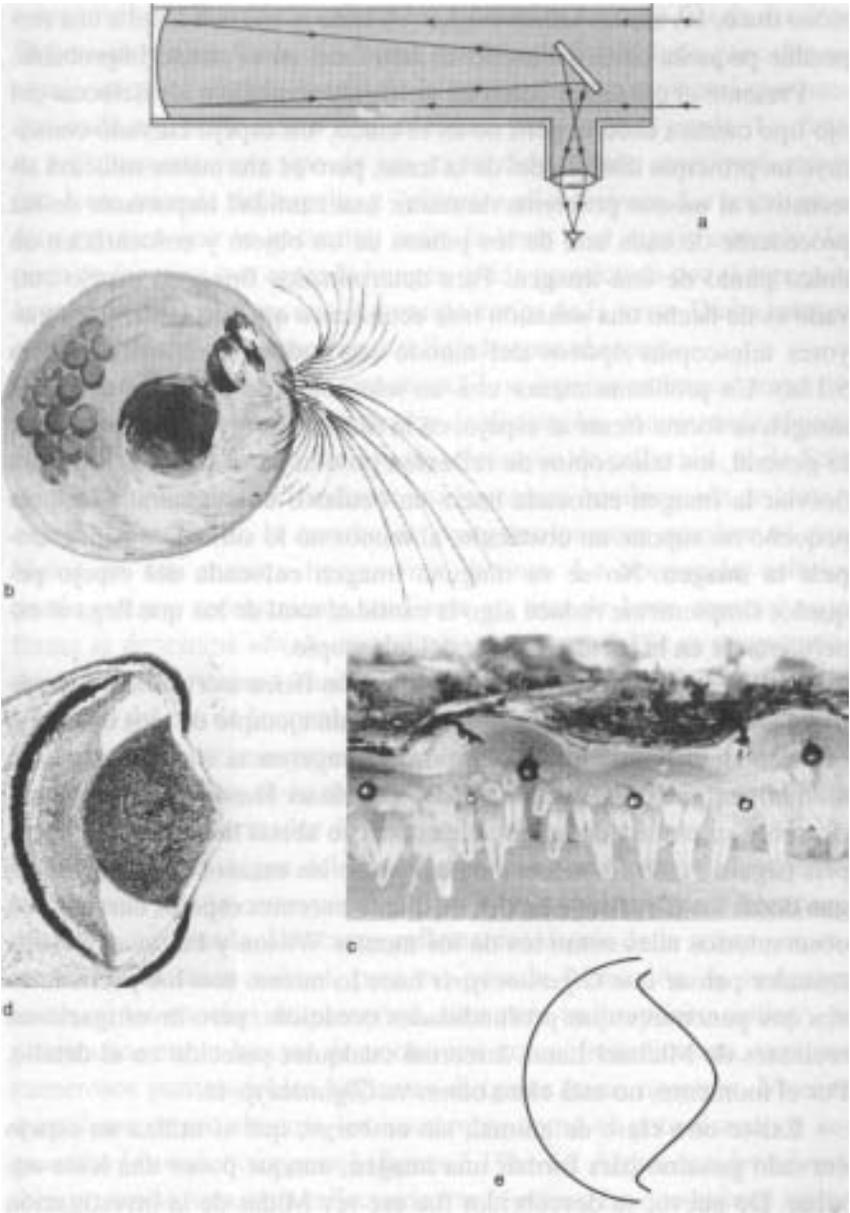


Figura 5.18. Soluciones de espejo curvado al problema de la formación de imágenes: a) telescopio de reflexión; b) *Gigantocypris*, un ostrácodo (crustáceo) planctónico relativamente grande, pintado por Sir Alister Hardy; c) ojos de concha de peregrino que atisban a través de las valvas entreabiertas; d) sección transversal de un ojo de concha de peregrino; e) óvalo cartesiano.

nioso truco, las arañas saltadoras han elevado el ojo con lente a una respetable pequeña cima dentro de su área local en el monte Improbable.

Presenté el cristalino como un excelente remedio a los defectos del ojo tipo cámara oscura, pero no es el único. Un espejo curvado constituye un principio distinto del de la lente, pero es una buena solución alternativa al mismo problema de reunir una cantidad importante de luz procedente de cada uno de los puntos de un objeto y enfocarla en un único punto de una imagen. Para determinados fines, un espejo curvado es de hecho una solución más económica que una lente, y los mayores telescopios ópticos del mundo son todos de reflexión (figura 5.18a). Un problema menor con un telescopio de reflexión es que la imagen se forma frente al espejo, en la ruta de los rayos incidentes. Por lo general, los telescopios de reflexión poseen un pequeño espejo para desviar la imagen enfocada hacia un ocular o una cámara. El espejo pequeño no supone un obstáculo, al menos no lo suficiente para estropear la imagen. No se ve ninguna imagen enfocada del espejo pequeño, simplemente reduce algo la cantidad total de luz que llega al espejo grande en la parte posterior del telescopio.

El espejo curvado es, pues, una solución física teóricamente operativa a un problema importante. ¿Existe algún ejemplo de ojos de espejo curvado en el reino animal? La primera sugerencia en este sentido la hizo mi antiguo profesor de Oxford, Sir Alister Hardy, en un comentario sobre su pintura de un notable crustáceo abisal llamado *Gigantocypris* (figura 5.18b). Los astrónomos captan los escasos fotones que llegan desde las distantes estrellas mediante enormes espejos curvados en observatorios tales como los de los montes Wilson y Palomar. Resulta tentador pensar que *Gigantocypris* hace lo mismo con los pocos fotones que penetran en las profundidades oceánicas, pero investigaciones recientes de Michael Land descartan cualquier parecido en el detalle. Por el momento, no está claro cómo ve *Gigantocypris*.

Existe otra clase de animal, sin embargo, que sí utiliza un espejo curvado genuino para formar una imagen, aunque posee una lente auxiliar. De nuevo, su descubridor fue ese rey Midas de la investigación de los ojos animales que es Michael Land. Este animal es la concha de peregrino.

La fotografía de la figura 5.18c corresponde a un pequeño fragmento (dos acanaladuras de la concha) del resquicio entre las valvas de

estos bivalvos. Entre la concha y los tentáculos hay una fila de docenas de pequeños ojos. Cada ojo forma una imagen, utilizando para ello un espejo curvado situado detrás de la retina. Es este espejo el que hace que cada ojo brille como una diminuta perla azul o verde. La figura 5.18d muestra este tipo de ojo en sección. Como mencioné, existe una lente además del espejo, y volveré a ello después. La retina es el área grisácea que se encuentra entre la lente y el espejo curvado. La parte de la retina que capta la imagen nítida proyectada por el espejo es la porción que contacta con la parte posterior de la lente. Dicha imagen está invertida, y la forman rayos reflejados por el espejo.

¿Por qué hay una lente, entonces? Los espejos esféricos como éstos están sujetos a un tipo particular de distorsión, denominada aberración esférica. Un diseño famoso de telescopio de reflexión, el de Schmidt, evita el problema mediante una ingeniosa combinación de lente y espejo. Los ojos de la concha de peregrino parecen resolver el problema de una manera ligeramente distinta. La aberración esférica puede evitarse teóricamente mediante un tipo de lente especial cuya forma se denomina «óvalo cartesiano». La figura 5.18e es un esquema de un óvalo cartesiano ideal. Obsérvese ahora de nuevo el perfil de la lente real del ojo de la concha de peregrino (figura 5.18d). Sobre la base de la sorprendente semejanza, el profesor Land sugiere que la lente está aquí como corrector de la aberración esférica del espejo, que es el principal dispositivo formador de la imagen.

En cuanto al origen del ojo de espejo curvado en las laderas inferiores de su región correspondiente en la montaña, podemos hacer una conjetura informada. Las capas reflectantes detrás de la retina son comunes en el reino animal, pero no para la formación de imágenes como en las conchas de peregrino, sino para un propósito distinto. Si penetramos en un bosque de noche con una potente linterna, veremos numerosos puntos dobles brillantes dirigidos hacia nosotros. Muchos mamíferos, especialmente los nocturnos, como el poto dorado o angantibo [*Perodicticus potto*] (figura 5.19b) del África occidental, poseen un tapete, una capa reflectante tras la retina. Lo que hace el tapete es proporcionar una segunda oportunidad de captar los fotones no interceptados por las fotocélulas: cada fotón es reflejado de vuelta a la misma fotocélula que no lo captó en primera instancia, de modo que la imagen no queda distorsionada. También los invertebrados han des-

cubierto el tapete. Una potente linterna en el bosque es una excelente manera de localizar determinados tipos de arañas. En realidad, observando la fotografía de una araña lobo (figura 5.19a), uno se pregunta por qué los reflectantes «ojos de gato» que marcan nuestras carreteras no se llaman «ojos de araña». Tapetes para captar hasta el último fotón bien pudieran haber evolucionado en ojos en copa ancestrales antes que las mismas lentes. Quizá el tapete es la preadaptación que, en algunos animales aislados, se ha modificado para formar un tipo de ojo en telescopio de reflexión. O bien el espejo pudo haber surgido de otra fuente. Es difícil estar seguro.

Lentes y espejos curvados son dos maneras de enfocar con precisión una imagen. En ambos casos la imagen está invertida, lo de arriba abajo y la derecha a la izquierda. Un tipo de ojo completamente distinto, que produce una imagen en la misma posición que el objeto, es el ojo compuesto, preferido por insectos, crustáceos, algunos gusanos y moluscos, cacerolas de las Molucas (extraños animales marinos que parecen estar más cerca de las arañas que de los cangrejos) y el gran grupo de los trilobites, hoy extinguidos. En realidad, existen varios tipos distintos de ojo compuesto. Empezaré con el más elemental, el llamado ojo compuesto de aposición. Para comprender cómo funciona tendremos que volver atrás, casi a la base misma del monte Improbable. Como hemos visto, si queremos que un ojo haga algo más que discernir la mera intensidad de luz, se necesita más de una fotocélula, y éstas deben captar luz procedente de distintas direcciones. Una manera de hacer que apunten en direcciones diferentes es colocarlas en una copa o concavidad, revestidas por una pantalla opaca. Todos los ojos de los que hemos hablado hasta ahora son derivaciones de este principio de superficie cóncava. Pero quizá una solución aún más evidente al problema es situar las células en la superficie externa, convexa, de una copa, con lo que se hace que miren hacia fuera en diferentes direcciones. Esta es una buena manera de visualizar un ojo compuesto en su versión más sencilla.

Recordemos la introducción que hice del problema de formar la imagen de un delfín. Entonces señalé que el problema era de exceso de imágenes. Un número infinito de «delfines» sobre la retina, en todas las posiciones posibles y en todas las localizaciones sobre la retina, equivale a ningún delfín visible (figura 5.20a). El ojo tipo cámara os-



Figura 5.19. Ahorrando fotones para reflejarlos. Tapetes brillantes detrás de los ojos de: a) una araña lobo, *Geolycosa sp.*, y b) un potto dorado o angwantibo.

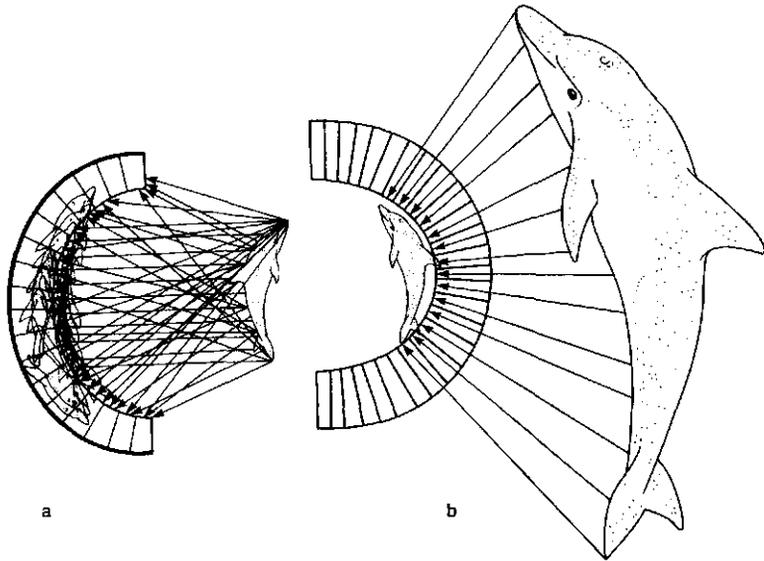


Figura 5.20. a) Reproducción de la figura 5.6; b) la copa vuelta del revés. Principio del ojo compuesto de aposición.

cura funcionaba porque filtraba casi todos los rayos, dejando sólo la minoría que se entrecruza en el orificio y forma una única imagen invertida del delfín. Tratamos la lente o cristalino como una versión más elaborada del mismo principio. El ojo compuesto de aposición resuelve el problema de una manera todavía más simple.

El ojo en cuestión está construido como un denso manojo de tubos largos y rectos, que irradian en todas direcciones desde el techo de un domo. Cada tubo es como una mira de fusil que sólo capta la pequeña parte del mundo en su propia y directa línea de fuego. En términos de nuestra metáfora del filtrado, podríamos decir que se impide (por parte de las paredes del tubo y del revestimiento del domo) que los rayos procedentes de otras partes del mundo incidan en la parte posterior del tubo que contiene las fotocélulas.

Así es como funciona básicamente el ojo compuesto de aposición. En la práctica, cada uno de los pequeños ojos tubulares, denominado omatidio, es algo más que un tubo. Tiene su propia lente y su propia «retina» minúscula, constituida generalmente por una media docena de fotocélulas. Cada omatidio produce una imagen invertida en la base

del estrecho tubo. El omatidio funciona, pues, como un ojo tipo cámara, largo y de baja calidad. Pero estas imágenes invertidas de los omatidios individuales son ignoradas. El omatidio informa sólo de la cantidad de luz que penetra por su tubo. La lente sirve únicamente para captar más rayos luminosos procedentes de la dirección de mira de fusil del omatidio y enfocarlos sobre la retina. Cuando se consideran todos los omatidios juntos, su «imagen» sumada está en la posición correcta, como se indica en la figura 5.20b.

Como siempre, «imagen» no significa lo que nosotros consideraríamos como tal: una percepción precisa, en *technicolor*, de toda una escena. Estamos hablando de *cualquier* forma de utilizar los ojos para distinguir lo que está ocurriendo en diferentes direcciones. Por ejemplo, puede que algunos insectos utilicen sus ojos compuestos sólo para seguir objetivos en movimiento, y en cambio sean ciegos para las escenas inmóviles. La cuestión de si los animales ven las cosas tal como las vemos nosotros es en parte filosófica, e intentar responderla puede ser una tarea más que difícil.

El principio del ojo compuesto funciona de sobra para, pongamos por caso, una libélula que se abate sobre una mosca en movimiento, pero para que un ojo compuesto captara tanto detalle como los nuestros tendría que ser muchísimo más grande que el tipo de ojo simple en cámara que poseemos. La explicación, a grandes rasgos, es la siguiente. Es evidente que, cuantos más omatidios se posean, con cada uno apuntando en una dirección ligeramente distinta, más detallada será la imagen. Una libélula puede tener hasta 30.000 omatidios, y es muy buena a la hora de atacar insectos en vuelo (figura 5.21). Pero para ver con la misma definición que nosotros harían falta millones de omatidios. La única manera de dar cabida a millones de omatidios es miniaturizarlos. Por desgracia, existe un límite estricto a la reducción de un omatidio. Es el mismo principio con el que nos topamos al hablar de la reducción del orificio frontal en una cámara oscura, y se denomina límite de difracción. La consecuencia es que, para que un ojo compuesto viera con la definición de un ojo humano, tendría que tener un tamaño absurdamente grande: ¡veinticuatro metros de diámetro! El científico alemán Kuno Kirschfeld escenificó esto dibujando el aspecto que tendría un hombre que viese como una persona normal pero utilizando ojos compuestos (figura 5.22). El diseño en panal del dibujo es

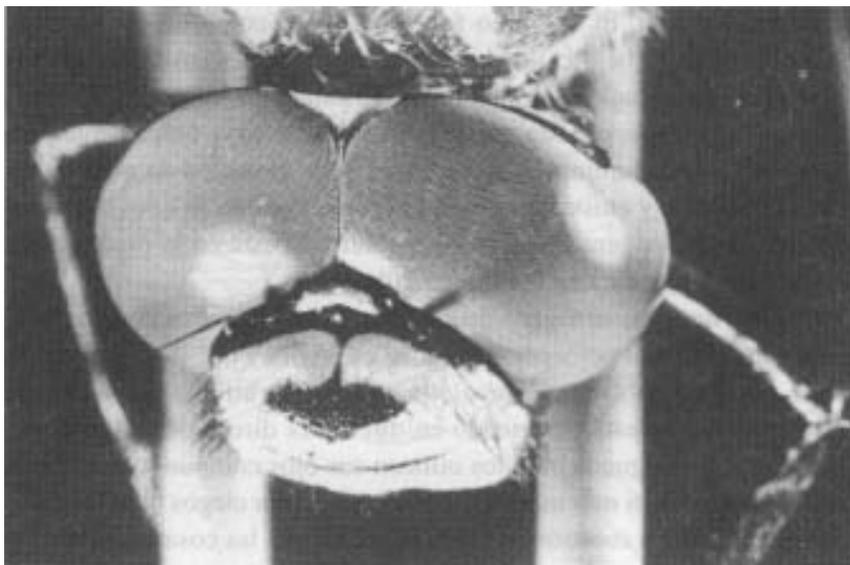


Figura 5.21. Grandes ojos compuestos en un depredador aéreo que caza visualmente, la libélula *Aeshna cyanea*.

impresionista. Cada faceta dibujada contendría en realidad 10.000 omatidios. La razón por la que los ojos compuestos del hombre tienen sólo un metro de diámetro en lugar de veinticuatro es que Kirschfeld tomó en consideración el hecho de que nuestros ojos sólo forman imágenes de gran definición en el centro de nuestra retina. Tomó un promedio de nuestra visión central y de nuestra visión mucho menos precisa en la periferia de la retina, y le salió el ojo de un metro ilustrado. Tenga un metro de diámetro o veinticuatro, un ojo compuesto tan grande no es factible. La moraleja es que: si uno desea ver imágenes precisas y detalladas del mundo, debe utilizar un ojo tipo cámara simple, con una lente única y de buena calidad, no un ojo compuesto. Dan Nilsson lo ha expresado así: «Es sólo una pequeña exageración decir que la evolución parece estar trabando una lucha desesperada para mejorar un diseño básicamente desastroso».

¿Por qué razón, pues, insectos y crustáceos no abandonan el ojo compuesto y se pasan evolutivamente a los ojos tipo cámara? Puede que estemos ante uno de esos casos de confinamiento en la vertiente equivocada de un valle en el macizo del monte Improbable. Para trans-

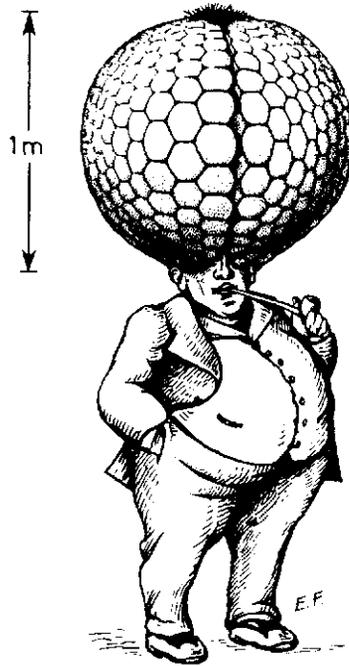


Figura 5.22. Ilustración de Kuno Kirschfeld del aspecto que tendría un hombre con ojos compuestos para poder ver tan bien como un ser humano normal.

formar un ojo compuesto en un ojo tipo cámara hay que pasar por una serie continua de formas intermedias funcionales: no se puede descender a un valle como prelude para escalar una cumbre más alta. Así pues, ¿cuál es el problema de las formas intermedias entre un ojo compuesto y un ojo en cámara?

Al menos una dificultad importante acude a la mente. Un ojo tipo cámara forma una imagen invertida. La imagen de un ojo compuesto no lo es. Encontrar una forma intermedia entre estas dos es una proposición dura, por decirlo suavemente. Un intermedio posible es ninguna imagen en absoluto. Algunos animales, que viven en las profundidades del mar o en otros lugares donde la oscuridad es casi total, tienen tan pocos fotones con los que jugar que han desistido de formar imágenes. Todo lo que pueden esperar es saber si hay algo de luz. Un animal de esta clase podría perder totalmente su aparato nervioso procesador de imágenes y, por eso mismo, hallarse en una posición que le permitiera

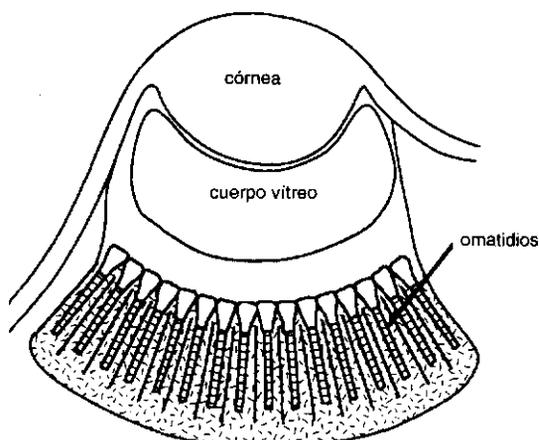


Figura 5.23. Ojo tipo cámara con un ojo compuesto en su historia ancestral. El notable ojo de *Ampelisca*.

empezar de cero el ascenso de una ladera completamente diferente de la montaña. De esta forma podría constituir una forma intermedia en el camino de un ojo compuesto a un ojo tipo cámara.

Algunos crustáceos abisales tienen grandes ojos compuestos, pero carecen de lentes o aparato óptico. Sus omatidios han perdido sus tubos y sus fotocélulas se encuentran expuestas directamente en la superficie exterior, desde donde captarán los pocos fotones que haya, con independencia de la dirección. De aquí al notable ojo de la figura 5.23 sólo hay un pequeño paso. Perteneció a un crustáceo, *Ampelisca*, que no vive a gran profundidad (quizá se encuentre de nuevo en el camino de retorno a partir de antepasados abisales). El ojo de *Ampelisca* funciona como un ojo tipo cámara, con un único cristalino que forma una imagen invertida en la retina. Pero la retina deriva claramente de un ojo compuesto, pues está constituida por los restos de un banco de omatidios. Un pequeño paso, quizá, pero sólo si, durante el interregno de ceguera casi total, el cerebro tuvo suficiente tiempo evolutivo para «olvidarlo» todo acerca del procesamiento de imágenes sin invertir.

Este es un ejemplo de evolución desde un ojo compuesto a un ojo tipo cámara (un ejemplo más, por cierto, de la facilidad con que los ojos parecen evolucionar de forma independiente en todo el reino animal). Ahora bien, ¿cómo evolucionó en un principio el ojo compuesto?

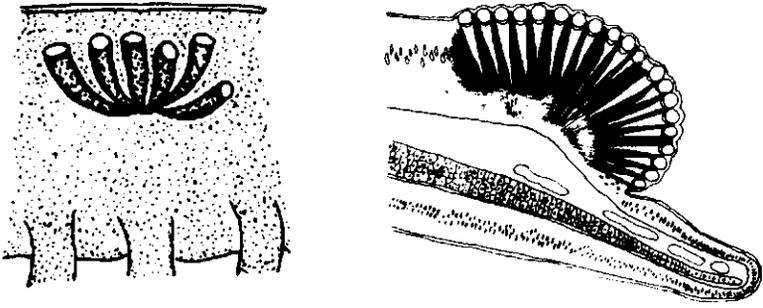


Figura 5.24. Ojos compuestos posiblemente primitivos de dos tipos de gusanos.

¿Qué es lo que encontramos en las laderas bajas de esta cumbre particular del monte Improbable?

Una vez más, nos puede ayudar echar un vistazo al reino animal actual. Fuera de los artrópodos (insectos, crustáceos y afines), se encuentran ojos compuestos sólo en algunos gusanos poliquetos (gusanas y gusanos tubícolas) y en algunos moluscos bivalvos (de nuevo, presumiblemente evolucionados de manera independiente). Gusanos y moluscos son una ayuda para nosotros los historiadores de la evolución, porque incluyen entre sus formas algunos ojos primitivos que parecen formas intermedias plausibles que se alinean a lo largo de las laderas bajas del monte Improbable que llevan a la cumbre del ojo compuesto. Los ojos de la figura 5.24 proceden de dos especies diferentes de gusanos. Repito que no se trata de antepasados, sino de especies modernas que probablemente ni siquiera descienden de las auténticas formas intermedias. Pero muy bien podrían estar proporcionándonos un atisbo de lo que podría haber sido la progresión evolutiva desde una agrupación laxa de fotocélulas a la izquierda hasta un ojo compuesto propiamente dicho a la derecha. A buen seguro, esta pendiente es tan suave como la que acabamos de recorrer para alcanzar el ojo tipo cámara ordinario.

La efectividad de los ommatidios, como ya hemos comentado, depende de su aislamiento mutuo. La mira de fusil que está apuntando al extremo de la cola del delfín no debe captar rayos de otras partes del delfín, de otro modo nos encontraríamos de nuevo con el problema original de millones de imágenes superpuestas del delfín. La mayoría de ommatidios se aísla mediante una vaina de pigmento oscuro alrededor

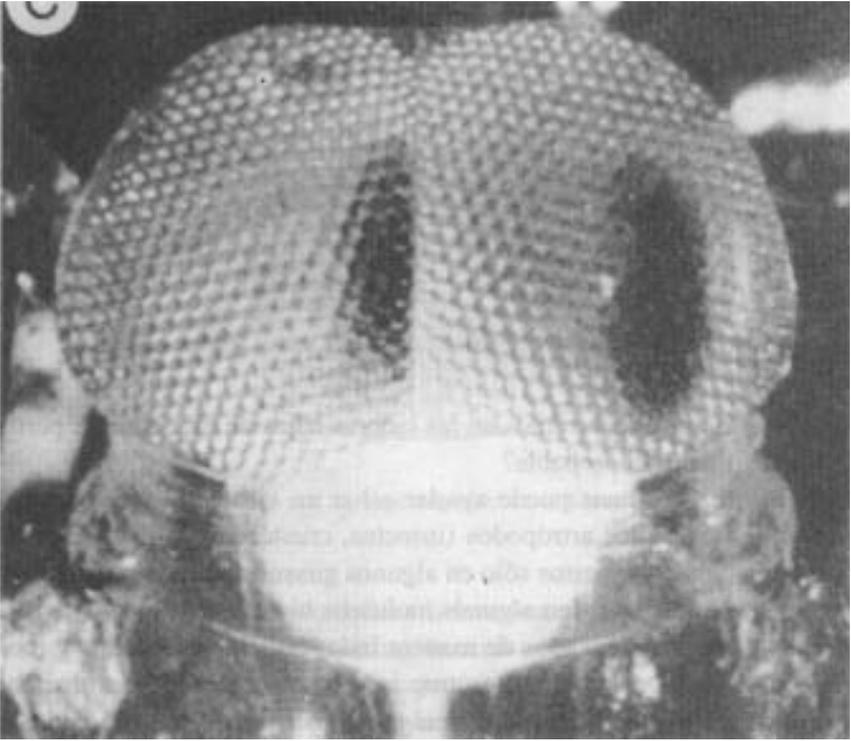


Figura 5.25. Ojo de un crustáceo abisal con fibras ópticas que funcionan como guías luminosas.

del tubo. Pero hay veces en que esto tiene efectos colaterales indeseables. Algunos animales marinos se basan en la transparencia para su camuflaje. Viven en el agua de mar y parecen agua de mar. La esencia de su camuflaje, pues, reside en evitar la captación de fotones. Pero todo el significado de las pantallas oscuras alrededor de los omatidios es captar fotones. ¿Cómo librarse de esta cruel contradicción?

Algunos crustáceos abisales han encontrado una ingeniosa solución parcial (figura 5.25). Carecen de pigmento, y sus omatidios no son tubos en el sentido ordinario, sino guías luminosas transparentes, que funcionan exactamente como las fibras ópticas de fabricación humana. Cada guía luminosa termina en su extremo anterior en un abultamiento que constituye una lente diminuta, de índice de refracción variable, como un ojo de pez. Con lente y todo, la guía luminosa concentra una gran cantidad de luz sobre las fotocélulas que se encuentran



Figura 5.26. Retrato de Charles Darwin, fotografiado por Michael Land a través de la lente compuesta de una luciérnaga.

en su base. Pero esto incluye sólo la luz que proviene directamente de la línea de la mira de fusil. Los rayos que llegan a un tubo lateralmente, en lugar de ser desviados por una pantalla de pigmento, son reflejados y no penetran en la guía luminosa.

No todos los ojos compuestos intentan aislar su suministro privado de luz. Únicamente lo hacen los ojos de aposición. Existen al menos tres tipos diferentes de ojo compuesto de «superposición» que hacen algo más sutil. Lejos de atrapar rayos **de** luz en tubos o fibras ópticas, permiten que los rayos que pasan a través de la lente de un omatidio sean captados por las fotocélulas de omatidios vecinos. Existe una zona vacía, transparente, que comparten todos los omatidios. Las lentes de todos los omatidios se confabulan para formar una única imagen sobre una retina compartida que está constituida a partir de las cé-

lulas fotosensibles del conjunto de omatidios. La figura 5.26 es una fotografía de Charles Darwin realizada por Michael Land a través de la lente compuesta del ojo de superposición de una luciérnaga.

La imagen en un ojo compuesto de superposición, igual que en uno de aposición, no está invertida, a diferencia de lo que ocurre en los ojos tipo cámara o en el de *Ampelisca* (figura 5.23). Esto es lo que cabría esperar si se asume que los ojos de superposición derivan de antepasados de aposición, lo cual tiene sentido histórico, y debe haber propiciado una transición fácil en lo que al cerebro se refiere. Pero sigue siendo un hecho muy notable. Considere el lector los problemas físicos que conlleva construir una imagen simple, en la posición correcta, de este modo. Cada omatidio individual en un ojo de aposición tiene frente a sí una lente normal que produce una imagen invertida (si es que produce alguna). Por lo tanto, para convertir un ojo de aposición en uno de superposición los rayos, a medida que pasan a través de cada lente, deben ser girados de alguna manera en la posición correcta. No sólo eso: todas las imágenes separadas de las distintas lentes deben superponerse cuidadosamente para producir una imagen conjunta. La ventaja de esto es que la imagen conjunta es mucho más brillante. Pero las dificultades físicas para dar la vuelta a los rayos son formidables. Resulta sorprendente que este problema no sólo haya sido resuelto por la evolución, sino que lo haya sido con al menos tres soluciones independientes: mediante lentes suplementarias, mediante espejos suplementarios y mediante circuitería neural suplementaria. Los detalles son tan intrincados que explicarlos desequilibraría este capítulo ya de por sí bastante complicado, por lo que sólo los describiré escuetamente.

Una única lente hace que la imagen se invierta. Por la misma razón, otra lente situada a la distancia adecuada tras la primera devolvería la imagen a la posición correcta. Esta combinación se utiliza en un instrumento denominado telescopio kepleriano. Puede conseguirse un efecto equivalente con una lente compleja, utilizando gradaciones suplementarias del índice de refracción. Como hemos visto, las lentes vivientes, a diferencia de las manufacturadas, son buenas a la hora de conseguir gradaciones del índice de refracción. Este método de simular el efecto de un telescopio kepleriano es utilizado por diversos grupos de insectos: efímeras (efemerópteros), crisopas (neurópteros), escara-

bajos (coleópteros), polillas (lepidópteros), frigáneas (tricópteros) y especies de cinco grupos distintos de crustáceos. La lejanía de su parentesco sugiere que al menos algunos de estos grupos desarrollaron de manera independiente el mismo truco kepleriano. Un truco equivalente, pero que implica la utilización de espejos, es empleado por tres grupos de crustáceos. Dos de estos tres grupos incluyen también especies que emplean el truco de las lentes. En realidad, si se observa qué grupos animales han adoptado uno u otro de los distintos tipos de ojo compuesto, se advierte un hecho fascinante: las distintas soluciones a los problemas surgen aquí, allá y acullá, lo que de nuevo sugiere que evolucionan rápidamente y sin mayores problemas.

La «superposición neural» ha evolucionado en el importante grupo de los insectos con dos alas, los dípteros (moscas y afines). Un sistema similar se encuentra en los nadadores de espalda y barqueros, chinches de agua de las familias notonéctidos y coríxidos, en los que parece haber evolucionado (otra vez) de forma independiente. La superposición neural es diabólicamente ingeniosa. En cierto sentido, no debería llamársela superposición, porque los omatidios son tubos aislados igual que en los ojos de aposición. Pero consiguen un efecto parecido al de la superposición por la ingeniosa conexión de las neuronas situadas tras los omatidios. He aquí cómo. Recordemos que la «retina» de un único omatidio está formada por una media docena de fotocélulas. En los ojos de aposición ordinarios, la descarga de las seis fotocélulas simplemente se suma, razón por la cual he escrito «retina» entre comillas: se cuentan todos los fotones que penetran en el tubo, con independencia de qué fotocélulas estimulan. El único motivo para que haya varias fotocélulas es aumentar la sensibilidad total a la luz. Ésta es la razón por la que no importa que la minúscula imagen que se forma en el fondo de un omatidio de aposición se encuentre técnicamente invertida.

Pero en el ojo de una mosca las salidas de cada una de las seis células no se mezclan *entre sí*. En lugar de ello, cada una se mezcla con las salidas de células *concretas* de los omatidios *vecinos* (figura 5.27). En interés de la claridad, la escala en este esquema es falsa. Por la misma razón, las flechas no representan rayos (que serían desviados por las lentes), sino la correspondencia topológica entre puntos del delphin y puntos en la parte inferior de los tubos. Adviértase ahora lo abso-

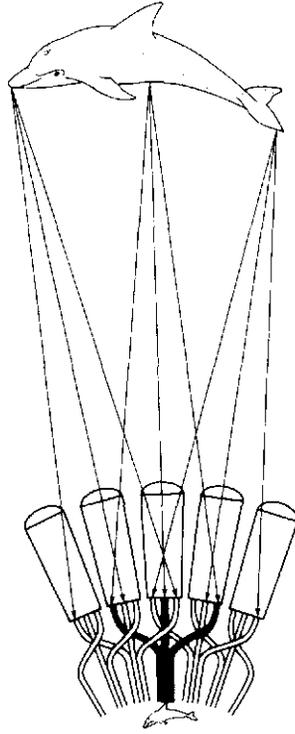


Figura 5.27. El ingenioso principio del ojo compuesto con «superposición conectada».

lutamente ingenioso de esta disposición. La idea esencial es que las fotocélulas que captan la cabeza del delfín en un omatidio están conectadas con las fotocélulas que captan la cabeza del delfín en los omatidios de las inmediaciones. Las fotocélulas que captan la cola del delfín en un omatidio están interconectadas con las fotocélulas que captan la cola del delfín en los omatidios de las inmediaciones, y así sucesivamente. El resultado es que cada punto del delfín es señalado por un número superior de fotones de lo que lo sería en un ojo de aposición ordinario con una disposición tubular simple. Es una especie de solución computacional y no óptica a nuestro viejo problema de cómo aumentar el número de fotones procedentes de cualquier punto de nuestro delfín.

El lector puede comprender ahora por qué se denomina superposición a este acomodo, aunque no lo sea en sentido estricto. En la verda-

dera superposición, mediante lentes o espejos suplementarios, la luz que llega a través de facetas inmediatas se superpone de modo que los fotones procedentes de la cabeza del delfín terminan en el mismo lugar que otros fotones procedentes de la cabeza del delfín; los fotones procedentes de la cola terminan en el mismo sitio que otros fotones que llegan de la cola. En la superposición neural, los fotones siguen terminando en lugares distintos, como lo harían en un ojo de aposición, pero la señal *originada* por estos fotones termina en el mismo lugar, debido al hábil entrecruzado de los cables que conducen al cerebro.

El lector recordará que la estima de Nilsson para la tasa de evolución de un ojo tipo cámara con lente era, según los estándares geológicos, más o menos instantánea. Seríamos muy afortunados si encontráramos fósiles que registraran los estadios de transición. No se han hecho estimas exactas para los ojos compuestos ni para ningún otro diseño de ojo, pero dudo que fueran significativamente más lentas. Por lo general no se espera poder ver los detalles de los ojos en los fósiles, porque son demasiado blandos para que se conserven. Los ojos compuestos son una excepción, porque gran parte de su detalle es delatado por la elegante disposición de las facetas más o menos córneas de la superficie exterior. La figura 5.28 muestra el ojo de un trilobites del Devónico, hace cerca de 400 millones de años. Parece tan avanzado como un ojo compuesto moderno. Esto es lo que cabría esperar si el tiempo que tarda en evolucionar un ojo fuera despreciable a escala geológica.

Un mensaje fundamental de este capítulo es que los ojos evolucionan fácil y rápidamente, sin mayores problemas. Empecé citando la conclusión de un experto de que los ojos han evolucionado de forma independiente al menos cuarenta veces en diferentes dominios del reino animal. A primera vista, este mensaje parece quedar en entredicho por un intrigante conjunto de resultados experimentales recientemente comunicados por un grupo de investigadores en Suiza, colaboradores del profesor Walter Gehring. Describiré brevemente estas observaciones, y explicaré por qué no ponen en tela de juicio la conclusión principal de este capítulo. Antes de empezar, tengo que pedir excusas por una convención exasperantemente absurda adoptada por los genéticos. El gen llamado *eyeless* [sin ojos, ciego] en la mosca del vinagre *Drosophila* ¿produce ojos! (¿No es maravilloso?) La razón de

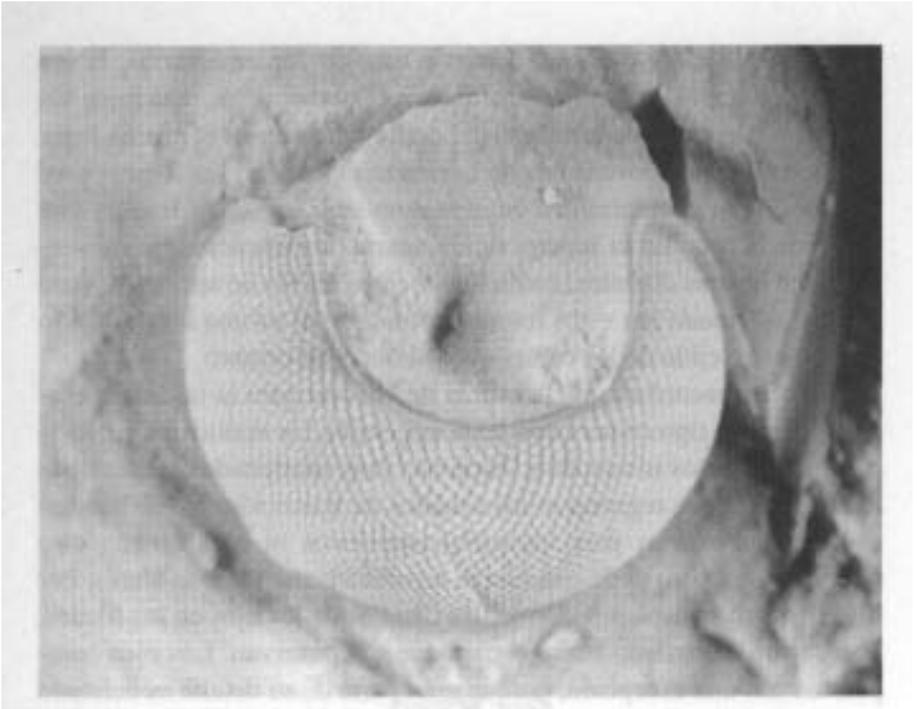


Figura 5.28. Los ojos compuestos ya estaban muy avanzados hace 400 millones de años: ojo fosilizado de un trilobites.

esta contradicción terminológica caprichosamente equívoca es de hecho muy simple, y hasta tiene cierto interés. Reconocemos el efecto de un gen al advertir lo que ocurre cuando funciona mal. Existe un gen que, cuando funciona mal (cuando muta), hace que las moscas nazcan sin ojos. La posición de este gen en el cromosoma es, por lo tanto, el locus *eyeless* (*locus* es el término latino que significa «lugar», y los genéticos lo emplean para indicar la posición de un cromosoma donde se sitúan las formas alternativas de un gen determinado). Pero, en general, cuando hablamos del locus denominado *eyeless* nos estamos refiriendo a la forma normal, no alterada, del gen. De ahí la paradoja de que el gen *eyeless* produzca ojos. Es como denominar «dispositivo silencioso» a un altavoz porque hemos descubierto que, cuando desconectamos el altavoz de una radio, ésta se queda muda. Estoy tentado de rebautizar el gen como *eyemaker* [hacedor de ojos], pero esto también sería equívoco. En cualquier caso, me niego a emplear el nombre *eyeless*, por lo que adoptaré la abreviación reconocida *ey*.

Es un hecho general que, aunque todos los genes de un animal están presentes en todas sus células, sólo una minoría de tales genes están realmente activados o «expresados» en una parte del cuerpo dada. Esta es la razón por la que los hígados son distintos de los riñones, aunque ambos contienen el mismo conjunto de genes. Por regla general, en una *Drosophila* adulta el gen *ey* se expresa sólo en la cabeza, razón por la cual se desarrollan allí los ojos. George Halder, Patrick Callaerts y Walter Gehring hallaron una manipulación experimental que hacía que *ey* se expresara en otras partes del cuerpo. Aplicando ingeniosos tratamientos a larvas de *Drosophila* consiguieron que *ey* se expresara en las antenas, las alas y las patas. Sorprendentemente, las moscas adultas resultantes ostentaban ojos compuestos completamente formados en alas, patas, antenas y otras partes (figura 5.29). Aunque algo más pequeños que los normales, estos ojos «ectópicos» son ojos compuestos verdaderos con omatidios completamente formados. Incluso son funcionales. No sabemos si las moscas ven realmente algo a través de ellos, pero al menos los registros eléctricos de los nervios basales de los omatidios demuestran que son sensibles a la luz.

Este es el hecho notable número uno. El hecho número dos es más notable todavía. En los ratones existe un gen llamado *small eye* [ojo pequeño] y en nuestra especie otro denominado *aniridia* [ausencia de iris]. También estos genes reciben su nombre de acuerdo con la convención negativa de los genéticos: la alteración mutacional de estos genes produce reducción o ausencia de ojos o de partes del ojo. Rebecca Quiring y Uwe Waldorf, que trabajan en el mismo laboratorio suizo, encontraron que estos genes de mamífero son casi idénticos, en sus secuencias de DNA, al gen *ey* de *Drosophila*. Esto significa que un mismo gen se ha perpetuado casi sin cambios desde los remotos antepasados comunes de animales modernos tan distantes entre sí como mamíferos e insectos. Es más, en estas dos grandes ramas del reino animal dicho gen parece tener mucho que ver con los ojos. El hecho notable número tres es casi demasiado sorprendente. Halder, Callaerts y Gehring consiguieron introducir el gen del ratón en embriones de *Drosophila*. *Mirabile dictu*, el gen del ratón indujo ojos ectópicos en *Drosophila*. La figura 5.29 (abajo) muestra un pequeño ojo compuesto inducido en la pata de una mosca del vinagre por el equivalente del gen

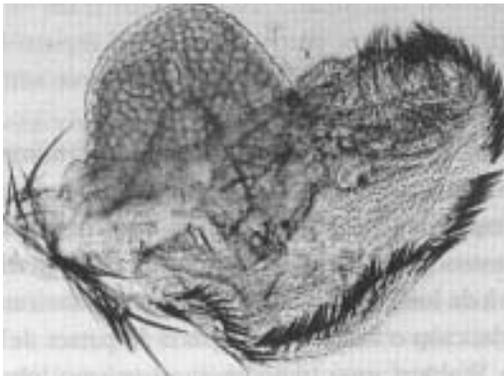
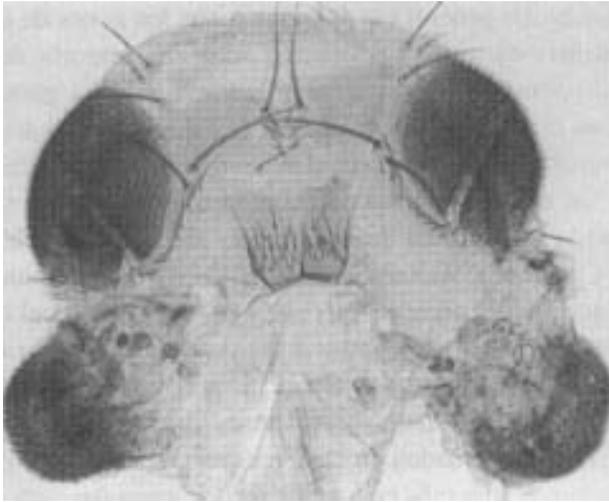
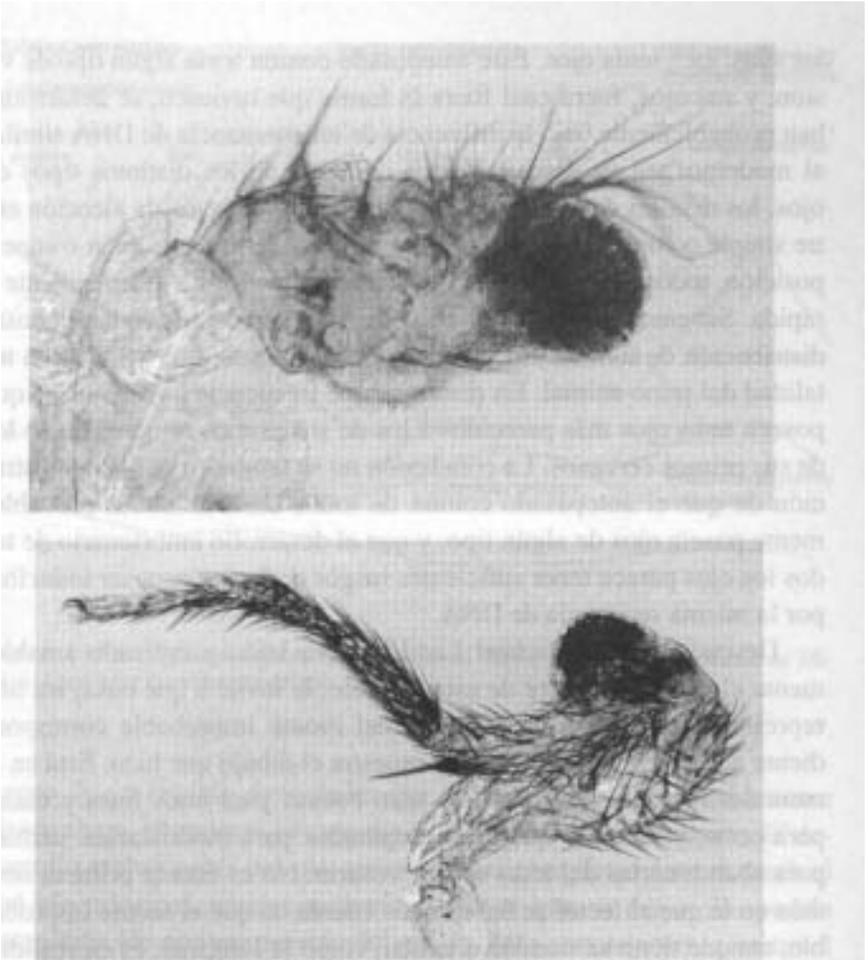


Figura 5.29. Ojos ectópicos inducidos en *Drosophila*; el inferior ha sido inducido por un gen de ratón.

ey en el ratón. Adviértase, de paso, que se ha inducido la formación de un ojo compuesto de insecto, no un ojo de ratón. El gen del ratón simplemente ha puesto en marcha la maquinaria embrionaria generadora del ojo de *Drosophila*. Se han encontrado genes con una secuencia de DNA muy parecida a la de *ey* también en moluscos, nemertinos (un tipo de gusanos marinos) y ascidias. Puede que *ey* sea universal en el reino animal, y puede que sea una regla general el que una versión del



gen tomada de un donante en una parte del reino animal pueda inducir el desarrollo de ojos en receptores de otra parte del reino animal extremadamente alejada de la primera.

¿Qué es lo que esta espectacular serie de experimentos significa para la conclusión de este capítulo? ¿Nos equivocamos al pensar que los ojos se han desarrollado cuarenta veces de forma independiente? No lo creo así. Al menos el espíritu de la afirmación de que los ojos evolucionan fácilmente y sin mayores problemas permanece incólume. Lo que estos experimentos probablemente significan es que el remoto antepasado común de *Drosophila*, los ratones, los seres humanos, las

ascidias, etc., tenía ojos. Este antepasado común tenía algún tipo de visión, y sus ojos, fuera cual fuera la forma que tuviesen, se desarrollaban probablemente bajo la influencia de una secuencia de DNA similar al moderno gen *ey*. Pero la forma concreta de los distintos tipos de ojos, los detalles de las retinas y de las lentes o espejos, la elección entre simple o compuesto y, en este último caso, entre aposición o superposición, todos estos aspectos evolucionaron de forma independiente y rápida. Sabemos que es así al observar la esporádica (casi caprichosa) distribución de todos estos dispositivos y sistemas, que salpican la totalidad del reino animal. En resumen, con frecuencia hay animales que poseen unos ojos más parecidos a los de sus primos remotos que a los de sus primos cercanos. La conclusión no se tambalea por la demostración de que el antepasado común de todos estos animales probablemente poseía ojos de algún tipo, y que el desarrollo embrionario de todos los ojos parece tener suficientes rasgos comunes para ser inducible por la misma secuencia de DNA.

Después de que Michael Land hubiera leído y criticado amablemente el primer borrador de este capítulo, le invité a que ensayara una representación visual de la región del monte Improbable correspondiente al ojo. En la figura 5.30 se muestra el dibujo que hizo. Está en la naturaleza de las metáforas que sean buenas para unos fines y malas para otros, y tenemos que estar preparados para modificarlas, incluso para abandonarlas del todo si es necesario. No es ésta la primera ocasión en la que el lector se habrá dado cuenta de que el monte Improbable, aunque tiene un nombre singular, como la Jungfrau, es en realidad un asunto mucho más complejo, con muchas cumbres.

Ese otro gran experto en los ojos de los animales que es Dan Nilsen, quien también leyó el borrador del capítulo, resumió el mensaje fundamental al llamar mi atención acerca de lo que puede ser el ejemplo más extraño de la evolución oportunista y *ad hoc* de un ojo. Por tres veces, de forma independiente en tres grupos distintos de peces, ha evolucionado la llamada «visión con cuatro ojos». Seguramente el pez de cuatro ojos más notable es *Bathylchnops exilis* (figura 5.31). Posee un típico ojo de pez que mira hacia delante, en la dirección usual, pero, además de éste, se ha desarrollado por evolución un ojo adicional, alojado en la pared del ojo principal, y que mira directamente hacia abajo. Qué es lo que mira nadie lo sabe. Quizá *Bathylchnops* padece el

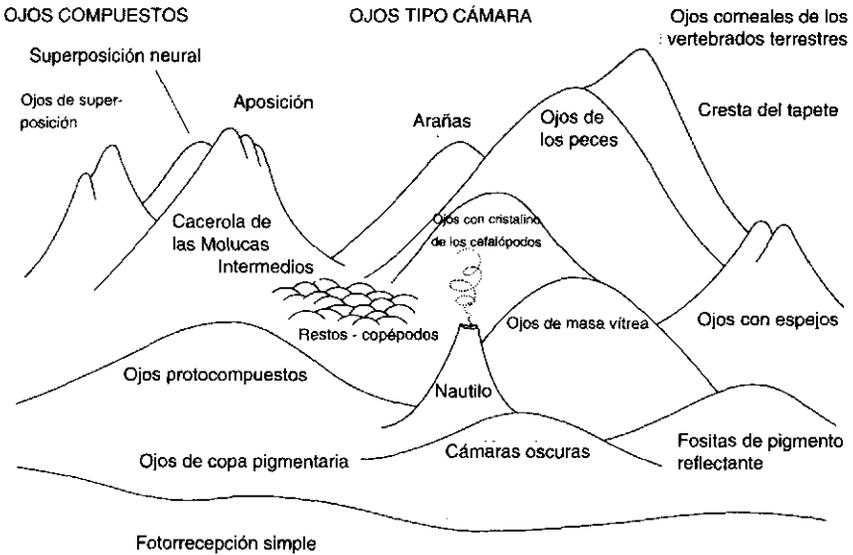


Figura 5.30. La región del ojo de la cordillera del monte Improbable: el paisaje de Michael Land para la evolución del ojo.

acoso de un terrible depredador que tiene la costumbre de acercarse desde abajo. El aspecto interesante para nosotros es el siguiente. El desarrollo embrionario del ojo secundario es completamente distinto al del ojo principal, aunque podemos suponer que su desarrollo podría estar inducido por una versión del gen *ey*. Más concretamente, como el doctor Nilsson me escribió en su carta: «Esta especie ha reinventado la lente a pesar de que ya tenía una, lo que supone un buen espaldarazo a la idea de que la evolución de las lentes no es difícil en absoluto».

No hay nada cuya evolución sea tan difícil como imaginamos los seres humanos. Darwin cedió demasiado cuando se echó atrás para convenir en la dificultad de la evolución del ojo; y su mujer se extralimitó al subrayar su escepticismo en su nota al margen. Darwin sabía lo que estaba haciendo. A los creacionistas les encanta la cita que he reproducido al comienzo de este capítulo, pero nunca la completan. Después de hacer su concesión retórica, Darwin continuaba:

«Cuando se dijo por primera vez que el Sol estaba inmóvil y que la

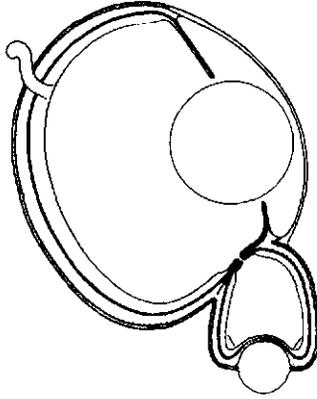


Figura 5.3J. Un curioso ojo doble, el del pez *Bathylychnops exilis*.

Tierra giraba, el sentido común de la humanidad declaró falsa esta doctrina. Pero en ciencia no puede darse crédito al viejo adagio *Vox populi, vox Dei*, como sabe cualquier filósofo. La razón me dice que, si se puede demostrar que existen numerosas gradaciones desde un ojo simple e imperfecto hasta uno complejo y perfecto, siendo cada grado útil a su poseedor, como es ciertamente el caso, y si además el ojo varía aunque sólo sea ligeramente y las variaciones son heredadas, como igualmente es el caso, y si tales variaciones resultan útiles a un animal en condiciones de vida cambiantes, entonces la dificultad de creer que un ojo perfecto y complejo pueda formarse por selección natural, aunque insuperable para nuestra imaginación, no puede considerarse real».



La selección natural es la presión que empuja la evolución pendiente arriba del monte Improbable. La metáfora de la presión es ciertamente buena. Hablamos de «presión de selección» y casi podemos sentir cómo empuja a una especie a evolucionar, haciéndola subir a empellones los gradientes de la montaña. Los depredadores, decimos, proporcionan la presión de selección que impulsó a los antílopes a desarrollar sus largas y veloces patas. Pero a la vez que decimos esto tenemos presente qué significa realmente: los genes para patas cortas tienen mayor probabilidad de terminar en la panza de los depredadores, y por lo tanto el mundo se vacía de ellos. La «presión» ejercida por unas hembras exigentes impulsó la evolución de las suntuosas plumas de los machos de faisán. Lo que esto significa es que un gen para una pluma hermosa tiene una probabilidad mayor de encontrarse dentro de un espermatozoide que penetra en el cuerpo de una hembra. Pero podemos pensar en ello como una «presión» que empuja a los machos a hacerse más bellos. Sin duda los depredadores aportaron una presión de selección en la dirección opuesta, hacia un plumaje más apagado, porque los machos de colores vivos presumiblemente llamarían la atención de los depredadores además de atraer a las hembras. Sin la presión de los depredadores los gallos serían aún más coloreados y extravagantes por la presión de las hembras. Así pues, las presiones de selección pueden empujar en sentidos opuestos, en el mismo sentido e incluso (los matemáticos podrían encontrar maneras de visualizar esto) en cualesquiera otros «ángulos» relativos. Además, las presiones de selección pueden ser «fuertes» o «débiles», y el significado ordinario de estas palabras se ajusta bien a lo que pretenden comunicar. La senda concreta que tome un linaje en su ascenso al monte Improbable estará influida por muy diferentes presiones de selección, que empujarán y ti-

rarán en distintas direcciones y con distintas intensidades, unas veces cooperando entre sí y otras oponiéndose.

Pero la presión no lo explica todo. La ruta elegida de ascenso al monte Improbable también dependerá de la forma de las laderas. Hay presiones de selección que empujarán y tirarán en toda una variedad de direcciones e intensidades, pero también existen líneas de menor resistencia y precipicios insalvables. Una presión de selección puede empujar con todas sus fuerzas en una dirección determinada, pero si dicha dirección está bloqueada por un farallón infranqueable no se llegará a ninguna parte. La selección natural debe tener alternativas para elegir. Las presiones de selección, por fuertes que sean, no pueden hacer nada sin variación genética. Decir que los depredadores aportan una presión de selección que favorece el que los antílopes corran cada vez más rápido es lo mismo que decir que los depredadores se comen los antílopes más lentos. Pero si no hay diferencia entre los genes de los antílopes rápidos y los de los lentos (es decir, si las diferencias en la velocidad de la carrera están determinadas sólo por el entorno) de ello no resultará ninguna evolución. En ese caso el monte Improbable no presentaría ninguna ladera que escalar en la dirección de la velocidad aumentada.

Llegamos ahora a una incertidumbre genuina que crea un abanico de opiniones entre los biólogos. En un extremo están quienes creen que podemos dar más o menos por sentada la variación genética. Si existe la presión de selección, piensan, siempre habrá suficiente variación genética para acomodarla. En la práctica, la trayectoria de un linaje en el espacio evolutivo estará determinada sólo por la pugna entre las presiones de selección. En el otro extremo están quienes creen que la variación genética disponible es la consideración importante que determina la dirección de la evolución. Algunos llegan incluso a relegar la selección natural, rebajándola a un papel subsidiario. A modo de caricatura, imaginemos dos biólogos que no se ponen de acuerdo sobre la razón por la que los cerdos no tienen alas. El seleccionista extremo dice que los cerdos no tienen alas porque no les supondría ninguna ventaja poseerlas. El antiseleccionista extremo dice que los cerdos podrían beneficiarse de tenerlas, pero que no pueden porque nunca hubo muñones de alas mutantes para que la selección natural operara sobre ellos.

La controversia no es tan simple, y el monte Improbable, incluso en su versión de múltiples cumbres, no es una metáfora lo bastante potente para explorarla. Necesitamos una nueva metáfora, que utilice el tipo de imaginación de que hacen gala los matemáticos, aunque no emplearemos símbolos matemáticos explícitos. Exigirá más de nosotros que el monte Improbable, pero vale la pena. En *El relojero ciego* hice breves incursiones en lo que di en llamar «espacio genético», «país de los biomorfos» y «camino a través del espacio animal». Más recientemente, el filósofo Daniel Dennett ha penetrado todavía más en este país por descubrir, al que, en poética alusión a la Biblioteca de Babel de Borges, él llama Biblioteca de Mendel. Mi versión en este capítulo es un gigantesco museo de la imaginación zoológica.

Imaginemos un museo con galerías que se extienden hacia el horizonte en todas direcciones, y tan lejos como puede alcanzar la vista, tanto hacia arriba como hacia abajo. En el museo se conservan todos los tipos de formas animales que han existido, y todos los que pueden imaginarse. Cada animal está emplazado junto a aquellos a los que más se asemeja. Cada dimensión del museo (es decir, cada dirección a lo largo de la cual se extiende una galería) corresponde a una dimensión en la que los animales experimentan alguna variación. Por ejemplo, mientras caminamos hacia el norte a lo largo de una determinada galería, advertimos un progresivo alargamiento de los cuernos en los ejemplares de las vitrinas. Si damos la vuelta y caminamos hacia el sur, los cuernos se hacen más cortos. Si giramos y vamos hacia el este, los cuernos mantienen su longitud, pero ahora cambia otra cosa; los dientes, por ejemplo, se hacen más aguzados. Si vamos hacia el oeste, los dientes se hacen más romos. Puesto que la longitud de los cuernos y la agudeza de los dientes son sólo dos de las miles de maneras en que pueden variar los animales, las galerías deben entrecruzarse en un espacio multidimensional; y no sólo en el espacio tridimensional ordinario que nuestra mente limitada puede visualizar. A esto me refería cuando dije que teníamos que aprender a pensar como un matemático.

¿Qué significa pensar en cuatro dimensiones? Supóngase que estamos tratando con antílopes y que tenemos en cuenta cuatro variables: longitud de los cuernos, agudeza de los dientes, longitud del intestino y tupidez del pelaje. Si ignoramos una de las dimensiones (la tupidez, por ejemplo) podríamos situar cada uno de nuestros antílopes en el lugar

que le corresponda dentro de un gráfico tridimensional (un cubo) de las restantes variables: longitud de los cuernos, agudeza de los dientes y longitud del intestino. ¿Cómo podríamos introducir la cuarta dimensión, la tupidez? Una forma es hacer el ejercicio del cubo para todos los antílopes de pelo corto, después para todos los antílopes de pelaje un poco más tupido, y así sucesivamente. Un antílope determinado quedará, en primer lugar, en el cubo correspondiente a la longitud de su pelaje y después, dentro de dicho cubo, en la posición que le corresponda por sus cuernos, dientes e intestinos. La tupidez del pelaje es la cuarta dimensión. En principio se puede seguir construyendo familias de cubos, y cubos de cubos, y cubos de cubos de cubos, hasta que se han colocado los animales en el equivalente de un espacio multidimensional.

Para ilustrar lo que tenemos en mente al pensar en el Museo de Todos los Animales Posibles, este capítulo tratará de un caso particular que puede reducirse a (más o menos) tres dimensiones. En el capítulo siguiente volveré a la controversia con la que he abierto este capítulo y (dado que soy un conocido seleccionista) intentaré hacer una propuesta constructiva de cara al otro bando. El caso tridimensional especial que trataré en este capítulo es el de las conchas de caracoles y otros ejemplos de conchas arrolladas. La razón por la que las galerías de conchas pueden reducirse a tres dimensiones es que la mayor parte de la variación relevante entre las conchas puede expresarse con sólo tres números. En lo que viene a continuación, seguiré los pasos de David Raup, un distinguido paleontólogo de la Universidad de Chicago. Raup se inspiró a su vez en el célebre D'Arcy Wentworth Thompson, de la antigua y distinguida universidad escocesa de Saint Andrews, cuyo libro *Sobre el crecimiento y la forma* (publicado por vez primera en 1919) ha tenido una influencia persistente, por no decir fundamental, durante la mayor parte del siglo xx. Es una de las tragedias de la biología que D'Arcy Thompson muriera justo antes de la era de la informática, porque casi todas las páginas de su gran libro están pidiendo a gritos un ordenador. Raup escribió un programa para generar formas de conchas, y yo he escrito uno similar para ilustrar este capítulo, aunque (como cabía esperar) lo incorporé a un programa de selección artificial al estilo del Relojero Ciego.

Las conchas de los caracoles y otros moluscos (así como las de unos animales llamados braquiópodos, sin ninguna conexión con los

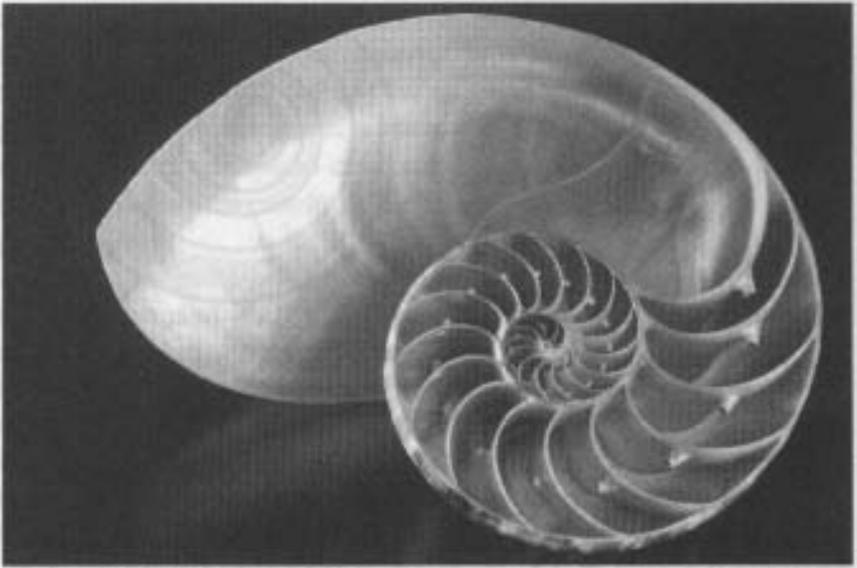


Figura 6.1. Sección a través de la concha de un *Nautilus*. El animal propiamente dicho vive en la mayor de las cámaras, la más reciente.

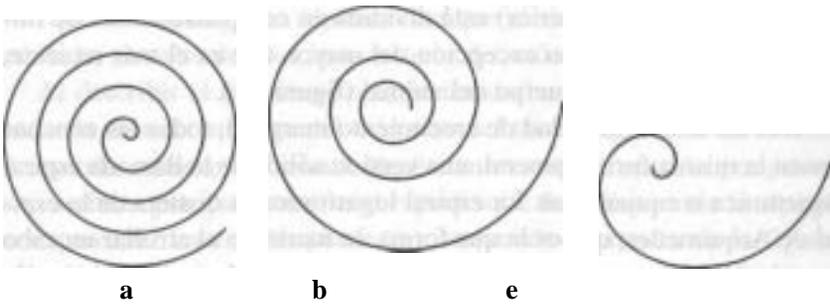


Figura 6.2. Tipos de espirales: a) espiral de Arquímedes; b) espiral logarítmica con una tasa lenta de abertura; c) espiral logarítmica con una tasa rápida de abertura.

moluscos pero superficialmente parecidos a ellos) crecen todas de la misma forma, diferente de la nuestra. Nosotros empezamos siendo pequeños y crecemos por todos lados (aunque algunas partes crecen más deprisa que otras). No se puede tomar un ser humano y disecar la parte correspondiente a su infancia. Pero con una concha de molusco sí se

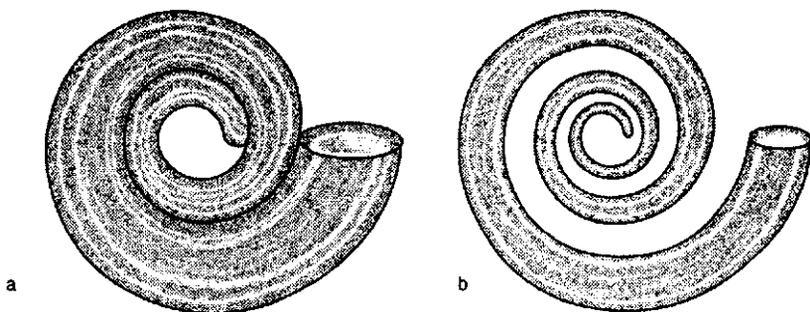


Figura 6.3. Dos tipos de tubos con la misma espiral pero con distinto diámetro: a) tubo lo suficientemente grande para llenar el espacio entre las vueltas sucesivas de la espiral; b) tubo lo suficientemente estrecho para dejar una delgada capa de aire (o de agua libre) entre las vueltas sucesivas de la espiral.

puede hacer esto. Una concha de molusco empieza siendo pequeña y crece por el margen abierto, de manera que la parte más interna de la espira del adulto es la concha infantil. Cada animal porta con él su propia forma infantil, representada por la parte más estrecha de la concha. La concha de *Nautilus* (de cuyo ojo en cámara oscura ya hemos hablado en el capítulo anterior) está dividida en compartimientos de flotación llenos de aire, con excepción del mayor, que es el más reciente, y en el cual se aloja el cuerpo del animal (figura 6.1).

Debido a su modalidad de crecimiento marginal, todas las conchas tienen la misma forma general, una versión sólida de la llamada espiral logarítmica o equiangular. La espiral logarítmica es distinta de la espiral de Arquímedes, que es la que forma un marinero al arrollar un cabo en cubierta. En esta última todas las vueltas de la espiral tienen la misma separación (el grosor de la cuerda). En una espiral logarítmica, en cambio, la curva se despliega a medida que se aleja del centro. Las distintas espirales se despliegan más o menos rápidamente, pero a una tasa determinada para cada espiral concreta. La figura 6.2 muestra, además de una espiral de Arquímedes, de cabo arrollado, dos espirales logarítmicas con distintas tasas de apertura.

Una concha crece no como una línea, sino como un tubo. La sección del tubo no tiene por qué ser circular como la de un corno francés, pero por el momento supondremos que sí lo es. También supondremos que la espiral trazada representa el borde externo del tubo. Podría su-

ceder que el diámetro del tubo se expandiera a la tasa justa para que el borde interno tocara la espira anterior de la espiral, como en la figura 6.3a, pero esto no tiene por qué ser así. Si el diámetro del tubo se expande más lentamente que el borde externo de la espiral, entre espiras sucesivas habrá un espacio creciente, como en la figura 6.3b. Cuanto más «separada» es la concha, más adecuada parece para un gusano que para un caracol.

Raup caracterizó las espirales de las conchas mediante tres números, que denominó *W*, *D* y *T*. Espero que no se considere demasiado rebuscado rebautizarlos como *abocinamiento*, *verma* y *espira*. De esta forma es más fácil recordar qué es cada cosa. El *abocinamiento* es una medida de la tasa de expansión de la espiral. Un *abocinamiento* de 2 significa que por cada vuelta completa de la espiral ésta se despliega hasta dos veces su tamaño previo. Esto es lo que ocurre en la figura 6.2b. La anchura de la espiral se duplica en cada vuelta. La figura 6.2c, que corresponde a una concha mucho más abierta, tiene un *abocinamiento* de 10. La anchura de la espiral se multiplica por diez en cada vuelta (aunque en la práctica la espiral se acaba antes de completar un circuito completo). Un ejemplo extremo es la concha de un berberecho, que se despliega tan rápidamente que ni siquiera la consideramos arrollada; su valor de *abocinamiento* es del orden del millar.

Al describir el *abocinamiento* he tenido buen cuidado de no mencionar la tasa de aumento del diámetro del tubo. Aquí entra en escena el segundo número, la *verma*. Necesitamos esta dimensión porque el tubo no tiene por qué ajustarse al espacio que deja disponible la espiral en expansión. La concha puede ser «separada» como la de la figura 6.3b. *Verma* deriva de «verme», gusano (vermiforme significa «en forma de gusano»). Las conchas de las figuras 6.3a y 6.3b tienen el mismo *abocinamiento* (2), pero la de la figura 6.3b posee un valor más alto de *verma* (0,7) que la de la figura 6.3a (0,5). Una *verma* de 0,7 significa que la distancia del centro de la espiral al límite interno del tubo es el 70% de la distancia del centro de la espiral al límite externo del tubo. No importa la parte del tubo que se utilice para efectuar la medición, pues el valor de la *verma* es constante (lógicamente, esto no tiene por qué ser así, pero parece que en las conchas reales suele cumplirse esta regla, y así lo supondremos a menos que se indique lo contrario). Puede verse fácilmente que una *verma* muy alta, como 0,99, corres-

ponde a un tubo muy delgado y filiforme, porque la distancia del centro al límite interno del tubo es el 99% de la distancia al límite externo del mismo.

¿Qué *verma* se precisa para asegurar un ajuste total, como en la figura 6.3a? Esto depende del *abocinamiento*. Para ser exactos, el valor crítico de la *verma* para un ajuste total es precisamente el recíproco del valor del *abocinamiento* (es decir, 1 dividido por el *abocinamiento*). En las dos conchas de la figura 6.3 el *abocinamiento* es 2, de manera que el valor crítico de la *verma* es de 0,5, y ése es el correspondiente a la figura 6.3a. La figura 6.3b tiene una *verma* superior, y por ello la concha tiene esta forma abierta. Si tomamos una concha como la de la figura 6.2c, con un *abocinamiento* de 10, el valor crítico de la *verma* sería de 0,1.

¿Qué ocurre cuando la *verma* es inferior al valor crítico? ¿Podemos imaginar un tubo tan grueso que invada el espacio de la espira previa (por ejemplo, una espiral como las de la figura 6.3 pero con una *verma* de, pongamos, 0,4)? Esta colisión puede resolverse de dos maneras. Una de ellas es, sencillamente, permitir que el tubo abarque vueltas anteriores de sí mismo. Es lo que hace *Nautilus*. Esto significa que la sección transversal útil del tubo ya no podrá ser un círculo entero, sino que le faltará un «bocado». Pero esto no es ningún desastre porque, como recordará el lector, la sección circular del tubo fue una decisión arbitraria. Muchos moluscos viven felices en tubos cuya sección está lejos de ser circular, como también veremos. En algunos casos la mejor interpretación de la forma no circular de la sección transversal del tubo es como una forma de acomodar espiras previas.

La otra manera de resolver la posible invasión de espiras previas del tubo es cambiar de plano. Esto nos lleva al tercero de nuestros números característicos de la concha, la *espira*. Imagínese que la espiral se desplaza lateralmente a medida que se expande, produciendo con ello una forma cónica como una peonza. La *espira* es la tasa a la que las sucesivas vueltas de la espiral se desplazan a lo largo de la longitud del cono. *Nautilus* tiene un valor de *espira* de 0: todas sus vueltas sucesivas se encuentran en el mismo plano.

Así pues, tenemos tres números que caracterizan las conchas: *abocinamiento*, *verma* y *espira* (figura 6.4). Estos tres valores constituyen la «signatura» de una concha. Si ignoramos uno de ellos, por ejemplo la *es-*

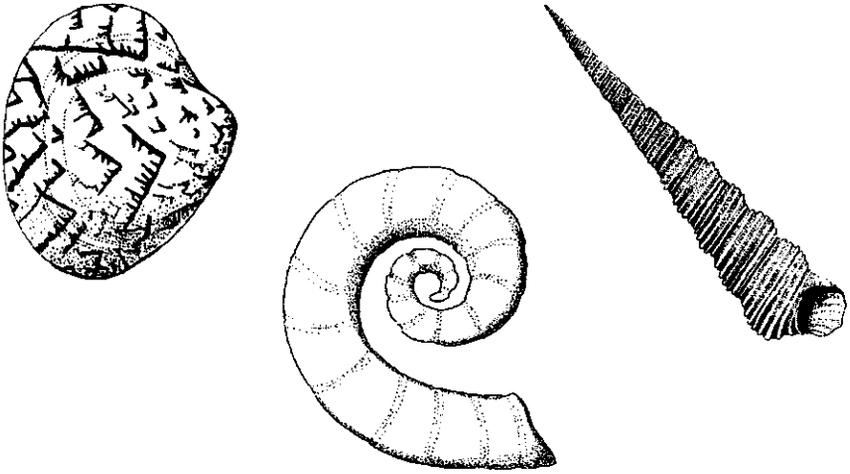


Figura 6.4. Conchas que ilustran los términos *abocinamiento*, *verma* y *espira*: a) *abocinamiento* elevado: *Liconcha castrensis*, un molusco bivalvo; b) *verma* elevada: *Spirula*; c) *espira* elevada: *Turritella terebra*.

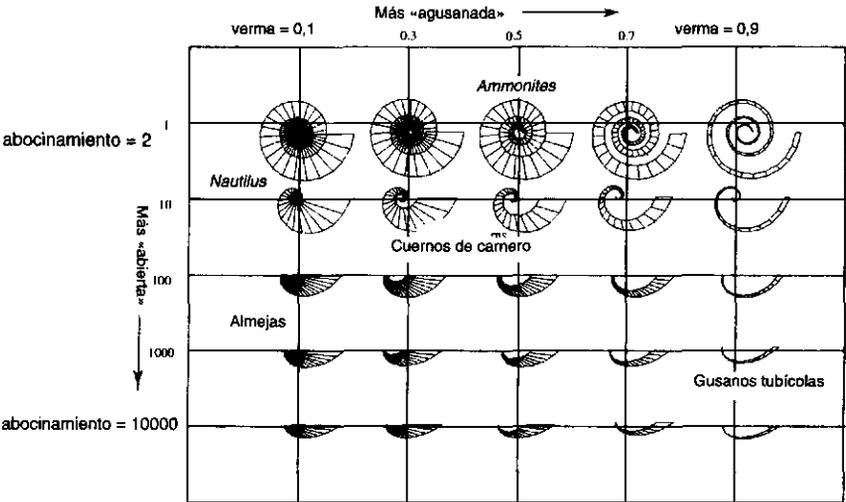
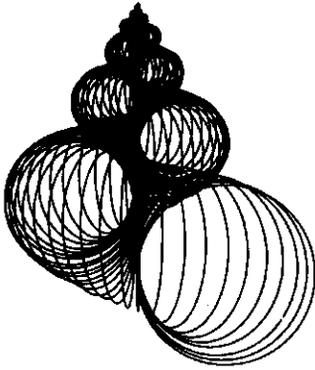
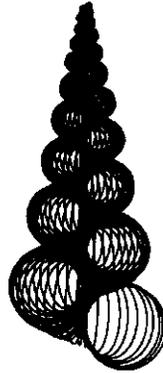


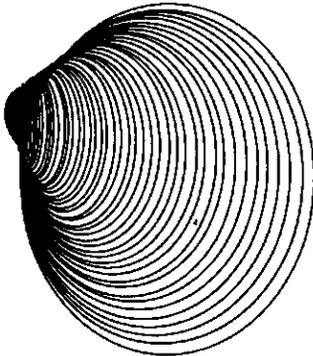
Figura 6.5. Tabla de conchas generadas por ordenador en la que la *verma* y el *abocinamiento* varían de forma sistemática. Los cambios en la tercera dimensión, la *espira*, no serían visibles en esta ilustración. El eje de *abocinamiento* es logarítmico: las divisiones de la escala a la izquierda representan múltiplos de diez del valor de *abocinamiento*. En el eje de *verma*, arriba, las divisiones de la escala representan una adición fija a la puntuación de «gusanidad». Se han indicado sólo unos cuantos animales reales en los lugares que ocuparían aproximadamente en el gráfico.



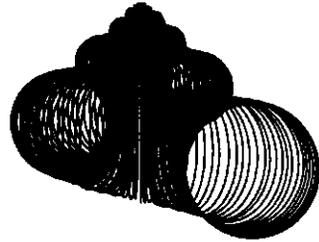
abocinamiento = 2, verma = 0, espira = 3



abocinamiento = 1,3, verma = 0, espira = 8,2



abocinamiento = 100, verma = 0, espira = 0,5



abocinamiento = 2, verma = 0,25, espira = 1,5

Figura 6.6. Cuatro conchas generadas por ordenador y «radiografiadas», que presentan distintos valores de *abocinamiento*, *verma* y *espira*.

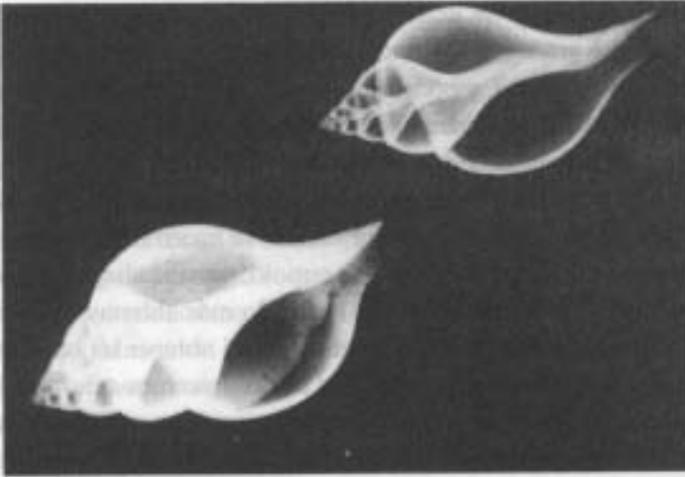


Figura 6.7. Radiografía de conchas de caracoles verdaderos.

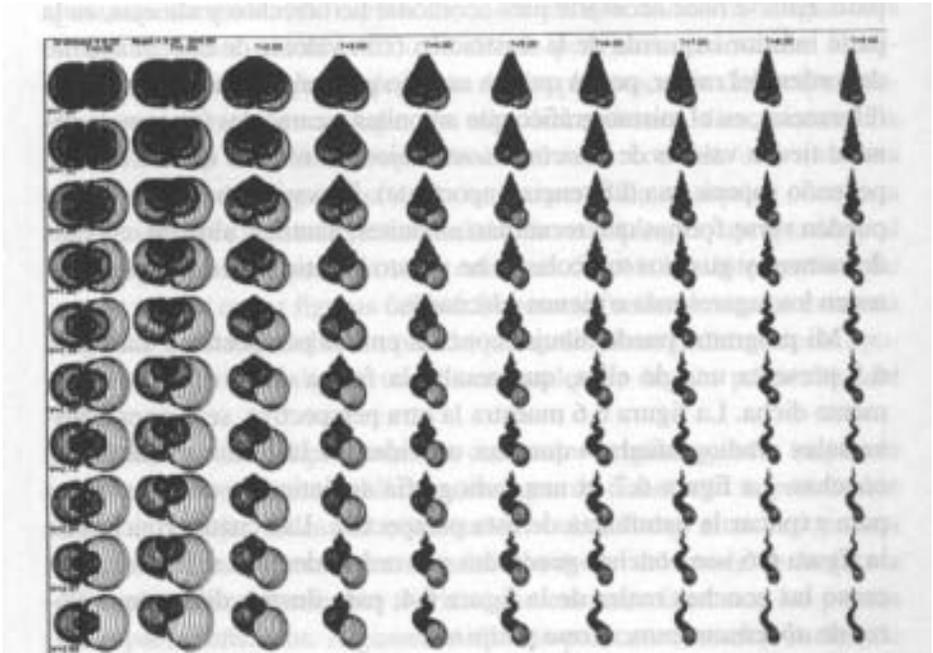


Figura 6.8. Gráfico de conchas generadas por ordenador («radiografías»), que relaciona el *abocinamiento* (indicado mediante W, en el eje vertical) con la *espira* (indicado mediante T, en el eje horizontal). Al igual que en la figura 6.5, la escala del *abocinamiento* es logarítmica, pero aquí el *abocinamiento* está confinado en valores bajos: ninguna de las conchas se abre demasiado.

pira, podemos dibujar un gráfico de los otros dos en una hoja de papel. Cada punto del gráfico representa una combinación única de valores de *abocinamiento* y *verma*, y podemos programar el ordenador para que dibuje en cada punto la concha que correspondería. La figura 6.5 muestra veinticinco puntos espaciados regularmente sobre dicho gráfico. A medida que nos desplazamos de izquierda a derecha, es decir, a medida que aumenta la *verma*, las conchas informáticas se hacen cada vez más «vermiformes». A medida que nos desplazamos de arriba abajo y aumenta el *abocinamiento*, las espirales se van haciendo más abiertas, hasta que ya no parecen espirales en absoluto. Con el fin de obtener un buen despliegue conforme nos desplazamos hacia abajo, hacemos que el *abocinamiento* aumente de forma logarítmica. Esto significa que cada paso descendente corresponde a *multiplicar* por algún número (en este caso diez) en lugar de (como en un gráfico normal y como en la progresión de valores de *verma* de un lado a otro de la página) *sumar* un número a cada paso. Esto se hace necesario para acomodar berberechos y almejas, en la parte inferior izquierda de la ilustración (con valores de *abocinamiento* del orden del millar, por lo que un cambio pequeño no supone una gran diferencia), en el mismo gráfico que amonites y caracoles (que por lo general tienen valores de *abocinamiento* bajos, de manera que un cambio pequeño supone una diferencia importante). En varias partes del gráfico pueden verse formas que recuerdan amonites, nautilus, almejas, cuernos de carnero y gusanos tubícolas, y he puesto las etiquetas correspondientes en los lugares más o menos adecuados.

Mi programa puede dibujar conchas en dos perspectivas. La figura 6.5 presenta una de ellas, que resalta la forma de la espiral propiamente dicha. La figura 6.6 muestra la otra perspectiva, secciones transversales «radiografiadas» que dan una idea de la forma sólida de las conchas. La figura 6.7 es una radiografía auténtica de conchas reales para explicar la naturaleza de esta perspectiva. Las cuatro conchas de la figura 6.6 son conchas generadas por ordenador que se han elegido, como las conchas reales de la figura 6.4, para ilustrar diferentes valores de *abocinamiento*, *verma* y *espira*.

La figura 6.8 es un gráfico similar al de la figura 6.5, excepto que las conchas generadas por ordenador se muestran en perspectiva radiografiada, y los ejes son *abocinamiento* y *espira* en lugar de *abocinamiento* y *verma*.

Naturalmente, también se puede hacer un gráfico que confronte *verma* y *espira*, pero no gastaré más espacio. En lugar de eso, iré directamente al famoso cubo de Raup (figura 6.9). Puesto que tres números bastan para caracterizar una concha (dejando aparte la cuestión de la sección transversal del tubo), se puede situar cada concha en un punto propio y único dentro de una caja tridimensional. El Museo de las Conchas Posibles (a diferencia, por ejemplo, del Museo de Huesos Pélvicos Posibles) es un bloque macizo simple. Cada dimensión corresponde a uno de los tres números característicos de la concha. Situémonos en el Museo de las Conchas Posibles y caminemos, por ejemplo, hacia el norte, siguiendo la dimensión que designaremos como *verma*. A medida que recorremos la galería, las conchas junto a las que pasamos se hacen paulatinamente más «agusanadas», mientras que todo lo demás permanece constante. Si en cualquier punto giramos hacia la izquierda y caminamos hacia el oeste, las conchas junto a las que pasamos aumentan de *espira*, lo que hace que cada vez tengan más forma de cono, mientras todo lo demás permanece constante. Finalmente, si en algún punto dejamos de desplazarnos en dirección este-oeste o norte-sur y en lugar de ello descendemos directamente (la dimensión de *abocinamiento*), encontraremos conchas con una tasa creciente de desplegamiento. Podemos pasar de cualquier concha a cualquier otra excavando a través del cubo en el ángulo apropiado, y al hacerlo pasaremos por una serie continua de conchas intermedias. Se puede pensar en las figuras 6.5 y 6.8 como si fueran dos caras externas del cubo de Raup. Sobre un papel (que es un plano bidimensional) podríamos ilustrar cualquier corte, con cualquier ángulo particular, del cubo.

Raup escribió el programa de ordenador original que ha inspirado el mío. En el esquema publicado, en lugar de intentar la impracticable tarea de dibujar todas las conchas del cubo, Raup muestreó puntos concretos. Las ilustraciones situadas alrededor del borde de la figura 6.9 representan las conchas teóricas que encontraríamos en los puntos del espacio señalados. Algunas de ellas se parecen a conchas reales, de las que podríamos encontrar en una playa. Otras no se parecen a nada de lo que existe en la Tierra, pero todavía pertenecen al espacio de todas las conchas computables. Raup sombreó en su figura aquellas regiones del espacio en las que se pueden encontrar conchas reales.

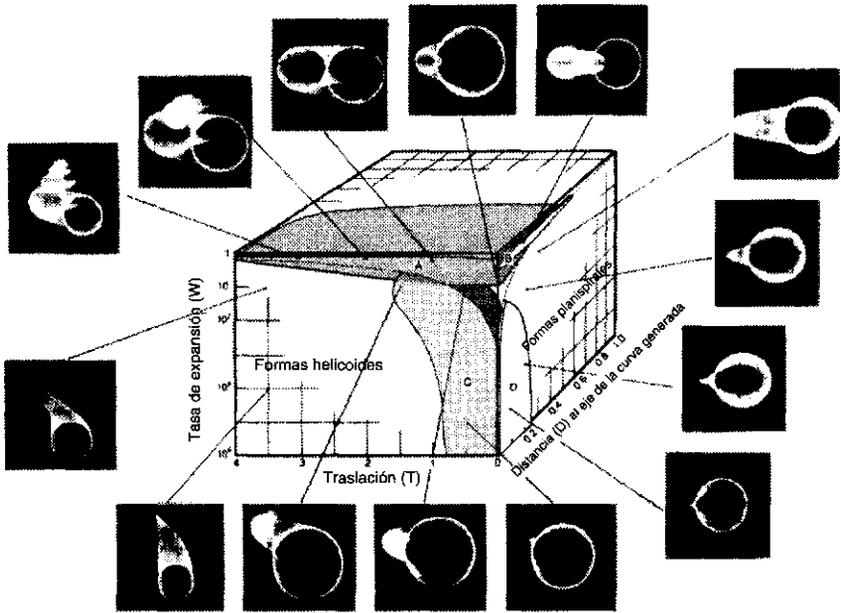


Figura 6.9. El cubo de Raup. David M. Raup dibujó un gráfico tridimensional que ponía en relación el *abocinamiento* (que él llama W), en el eje vertical, con la *espira* (que él llama T), en el eje horizontal, con la *verma* (que él llama D), en el eje de profundidad. Se ofrece una muestra de «radiografías» de conchas generadas por ordenador en puntos estratégicos del cubo. Se han sombreado aquellas regiones del cubo en las que se pueden encontrar conchas reales. Las regiones no sombreadas albergan conchas teóricamente concebibles pero que no existen en realidad.

Los amonites, aquellos parientes de los nautilus que antaño eran ubicuos y que parece que encontraron el mismo triste fin (cualquiera que fuese) que los dinosaurios, tenían conchas arrolladas, pero, a diferencia de los caracoles, las vueltas estaban casi siempre limitadas a un plano. El valor de su *espira* era de cero. Al menos, así ocurría en los amonites típicos. Resulta grato, sin embargo, que unos cuantos amonites, como el género *Turrilites* del Cretácico, desarrollaran una *espira* elevada, con lo que, de forma independiente, inventaron la forma de caracol. Dejando aparte estas formas excepcionales, los amonites se encuentran situados a lo largo de la pared oriental del Museo de las Conchas (es obvio que nombres tales como «oriental» y «meridional» son etiquetas arbitrarias). Las vitrinas de los amonites típicos no ocupan más que la mitad meridional de la pared oriental, y sólo algunos de los

pisos superiores. Los caracoles y afines se solapan con el corredor de los amonites, pero también se extienden mucho más al oeste (la dimensión *espira*) y penetran algo más en los pisos inferiores del bloque. Pero la mayor parte de estos pisos inferiores (donde la tasa de *abocinamiento* es grande y las conchas se despliegan rápidamente) pertenece a los dos grandes grupos de animales de concha doble. Los moluscos bivalvos se extienden algo hacia el oeste (sus conchas tienen una ligera vuelta, pero su tubo se despliega tan rápidamente que no parecen caracoles). Los braquiópodos (que, como hemos dicho, no son moluscos en absoluto pero superficialmente se parecen a los bivalvos) comparten con los amonites una «vuelta» que se despliega en un solo plano. Como ocurre con los bivalvos, los tubos de los braquiópodos se abocinan y se abren por completo antes de que se forme una «vuelta» que merezca tal nombre.

Cualquier historia evolutiva concreta es una trayectoria a través del Museo de Todas las Conchas Posibles, y para representar esto he incluido mi rutina de dibujo de conchas en mi programa, más extenso, de selección artificial, el Relojero Ciego. Me he limitado a eliminar de este programa la embriología de crecimiento de árboles y, en su lugar, he introducido una embriología de crecimiento de conchas. El programa combinado se denomina Caracolero Ciego. Las mutaciones equivalen a pequeños desplazamientos por el museo (recuérdese que todas las conchas están rodeadas por sus vecinos más parecidos). En el programa, cada uno de los tres números característicos está representado por un locus génico cuyo valor numérico puede variar. Tenemos, pues, tres clases de mutación: pequeños cambios de *abocinamiento*, pequeños cambios de *verma* y pequeños cambios de *espira*. Dichos cambios mutacionales pueden ser positivos o negativos, dentro de ciertos límites. El gen *abocinamiento* tiene un valor mínimo de 1 (valores inferiores indicarían un decrecimiento en lugar de un proceso de crecimiento) y no tiene un valor máximo fijo. El valor del gen *verma* es una proporción que varía entre 0 y 1 (una *verma* de 1 indicaría un tubo tan fino y vermiforme que sería prácticamente inexistente). El gen *espira* no tiene límites: los valores negativos indican trivialmente una concha invertida. Siguiendo al Relojero Ciego original, el Caracolero Ciego presenta una concha progenitora en el centro de la pantalla del ordenador, rodeada por una carnada de descendientes asexuales: sus vecinos

próximos del Museo de Todas las Conchas Posibles, mutados al azar. El seleccionador humano selecciona con el ratón una de las conchas para que se reproduzca. Ésta reemplaza al progenitor en el centro, y la pantalla se llena con una carnada de sus descendientes. El proceso se recicla siempre que el seleccionador tenga paciencia. Lentamente, nos sentimos como si avanzáramos poco a poco a través del Museo de Todas las Conchas Posibles. A veces caminamos entre conchas familiares, como las que podríamos recoger en una playa. En otros momentos sobrepasamos los límites de la realidad y penetramos en espacios matemáticos en los que nunca han existido conchas reales.

Explicué antes que, aunque el conjunto de todas las conchas posibles puede describirse en gran medida con sólo tres números, esto implica en realidad una suposición simplificadora errónea: la de que la forma de la sección transversal del tubo es siempre un círculo. Parece ser cierto en general que, a medida que el tubo se abocina, conserva la forma, pero no es ni mucho menos cierto que esta forma sea siempre un círculo. Puede ser un óvalo, y mi modelo informático incorpora un cuarto «gen», llamado *forma*, cuyo valor es la altura del tubo oval dividida por su anchura. Un círculo es un caso especial con una *forma* de 1. La incorporación de dicho gen aumenta de forma sorprendente la potencia del modelo a la hora de representar conchas reales. Pero todavía es insuficiente. Muchas conchas reales poseen secciones transversales más complicadas, ni circulares ni ovales, que no se prestan a una descripción matemática simple. La figura 6.10 muestra una gama de conchas que, además de proceder de diferentes partes del museo cúbico, poseen asimismo secciones transversales complejas, no circulares, de su tubo básico.

Mi programa Caracolero Ciego incorpora esta variación extra mediante el recurso, bastante burdo, de proporcionar un repertorio de secciones transversales predibujadas. Cada uno de estos perfiles es luego transformado (aplastado vertical u horizontalmente) por el valor actual (y mutable) del gen *forma*. A continuación el programa genera un tubo con el perfil así transformado y lo hace girar alrededor y hacia fuera como si de un tubo circular se tratara. Una manera mejor de tratar este problema (y que algún día probaré) sería programar el ordenador para que simule el proceso real de crecimiento variable alrededor del borde de ataque del tubo, para formar así secciones transversales ornamenta-

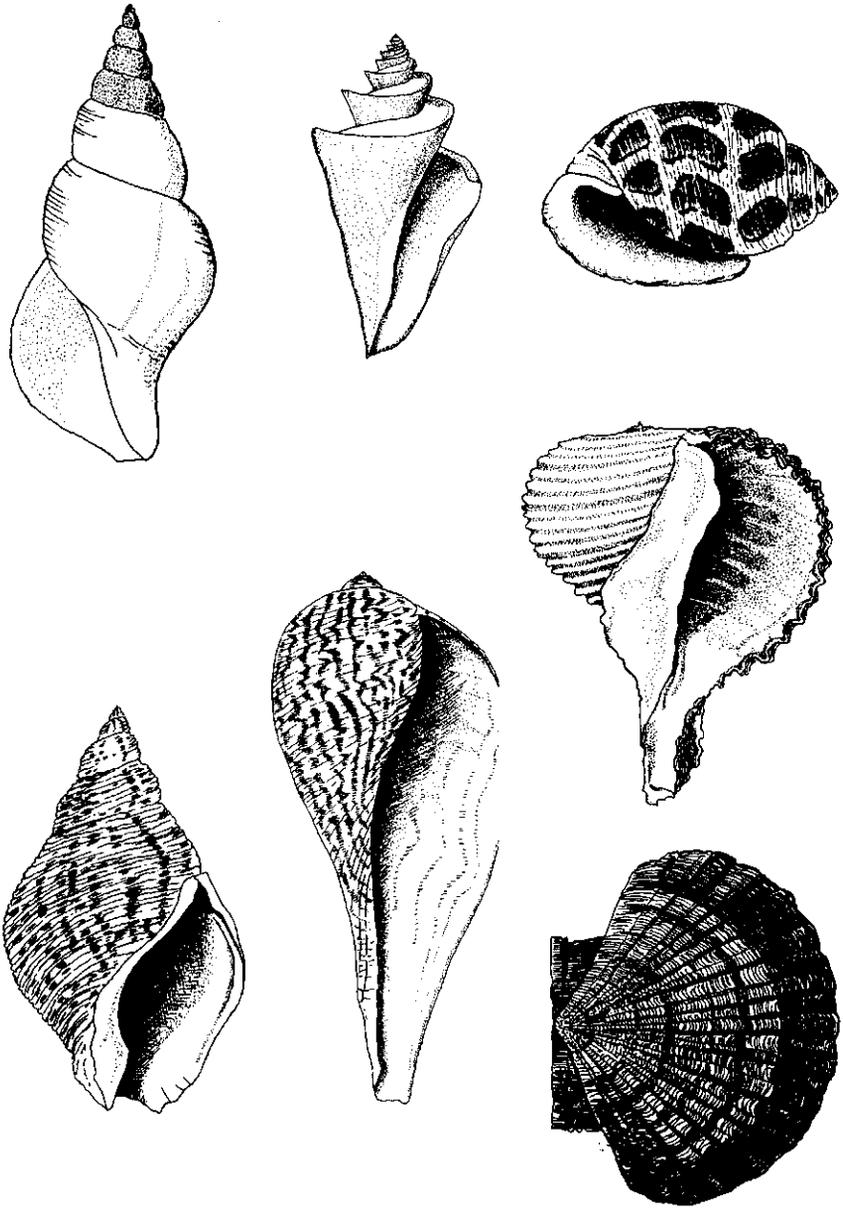


Figura 6.10. Conchas reales con una amplia gama de formas en sección transversal: (en el sentido de las agujas del reloj desde la inferior izquierda): cornetilla moteada, *Cominella adspersa*; neptuno invertido, *Neptúnea contraria*; pagoda japonesa, *Thatcheria mirabilis*; eloisa, *Acteon eloisae*; rapa, *Rapa rapa*; concha de peregrino, *Pecten maximus*; concha higo, *Ficus gracilis*.

das. No obstante, y mientras no dispongamos de nada mejor, la figura 6.11 es un «zoo» de conchas informáticas producidas por la versión actual del programa mediante selección artificial humana. Se generaron por su semejanza con conchas conocidas, algunas de ellas bastante parecidas a las de la figura 6.10, otras similares a otras conchas que uno puede encontrar en la playa o buceando.

La forma de la sección transversal puede considerarse una dimensión adicional (o conjunto de dimensiones) en el Museo de Todas las Conchas. Dejando esto de lado y volviendo a nuestra sección circular simplificadora, una parte de la belleza de las conchas es que resulta fácil hacerlas encajar en un Museo de Todas las Formas Posibles que podemos dibujar efectivamente en tres dimensiones. Pero esto no significa que todos los rincones de este museo teórico estén ocupados en la vida real. Como hemos visto, la mayor parte del volumen del edificio del museo está vacía. Raup sombreó las regiones que estaban ocupadas (figura 6.9), y suponen mucho menos de la mitad del volumen representado. Extendiéndose en la distancia hacia el norte y el oeste, una galería tras otra alberga conchas hipotéticas que según el modelo matemático podrían existir, pero que nunca han sido vistas en este planeta. ¿Por qué no? Puestos a preguntar, ¿por qué razón las conchas que *han* existido realmente se encuentran confinadas en este edificio cuboidal concreto?

¿Qué aspecto tendría una concha si no encajara en el bloque matemático descrito? La figura 6.12a muestra un caracol generado por ordenador que no lo hace. En lugar de tener una *espira* fija, su valor de *espira* cambia a medida que crece. Las partes más recientes y anchas de la concha crecen con un valor menor de *espira* que las partes de la concha desarrolladas con anterioridad y más estrechas. Esta es la razón de la existencia de ese ápice puntiagudo «antinatural» y, presumiblemente, vulnerable. Este caracol es hipotético. Sólo existe en el ordenador. El «cono» de la figura 6.12b posee asimismo un ápice puntiagudo antinatural. También fue dibujado por el programa Caracolero Ciego, pero con el valor de *espira* programado para decrecer, en lugar de permanecer constante, a medida que avanzaba el desarrollo.

Las conchas de la figura 6.13 son reales, y sospecho que también poseen un gradiente de *espira*, lo que significa que empiezan su vida con un valor de *espira* elevado que se reduce gradualmente a medida

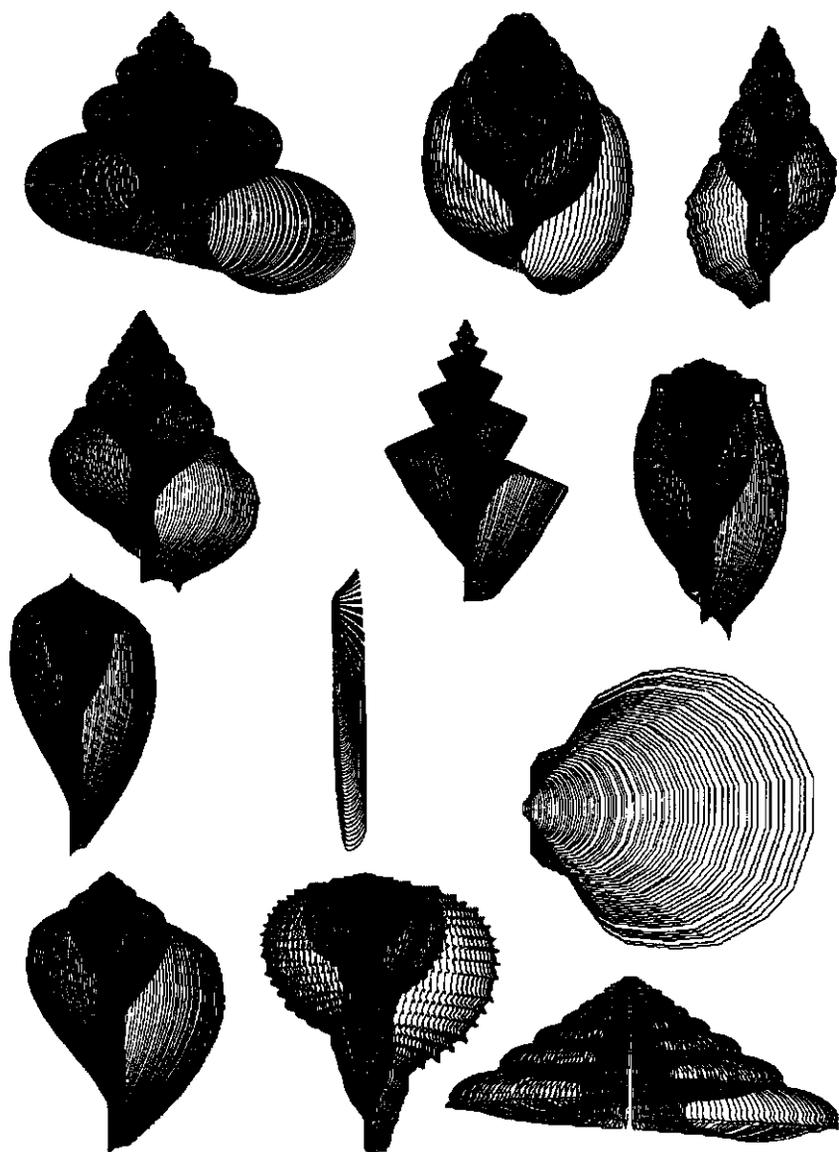


Figura 6.11. «Zoo» de conchas de distinta forma en sección transversal generadas por ordenador, creadas utilizando el programa «Caracolero ciego». Fueron creadas por selección artificial, al ser escogidas por su parecido a conchas reales familiares, entre ellas varios miembros de la gama que se ilustra en la figura 6.10.

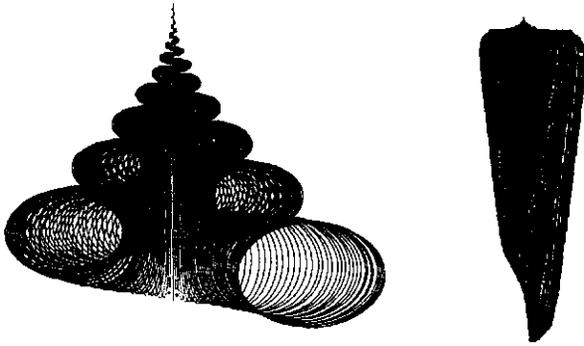


Figura 6.12. Una caracola (a) y un cono (b) generados por ordenador, con *espiras* puntiagudas producidas mediante un «gradiente» sobre el gen de *espira*.

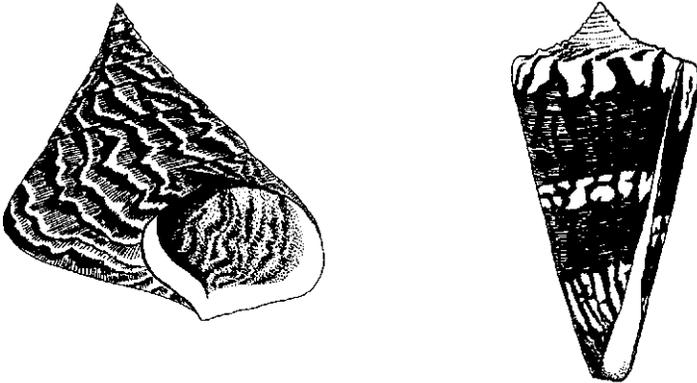


Figura 6.13. Conchas reales cuyo parecido con las conchas generadas por ordenador de la figura anterior sugiere que también ellas se desarrollan mediante gradientes de *espira*. A la izquierda, *Maurea tigris*; a la derecha, *Conus generalis*.

que van creciendo. Según Raup, hubo algunos amonites reales en los que los números característicos de su concha cambiaban conforme crecían. Se podría decir que, a medida que crecen, estas raras conchas se desplazan de una parte del museo a otra. Pero también se podría decir que, puesto que el cuerpo juvenil forma parte del adulto, no existe una vitrina única en el museo en la que pueda caber todo el cuerpo. Puede haber desacuerdo en cuanto a si los animales de la figura 6.13 debieran considerarse verdaderamente confinados a las tres dimensio-

nes de la caja. Geerat Vermeij, uno de los principales expertos actuales en la zoología de los animales con concha, cree que una tendencia al cambio de los números característicos a medida que el animal crece podría ser la norma y no la excepción. Vermeij cree, en otras palabras, que la mayoría de moluscos cambian de sitio en el museo matemático, aunque sea mínimamente, a medida que crecen.

Volvamos a la cuestión opuesta: ¿por qué grandes sectores del museo están vacíos de conchas reales? La figura 6.14 presenta una muestra de conchas generadas por ordenador correspondientes a lo más profundo de las regiones del museo en las que está «prohibido el paso». Algunas de ellas se verían bien en la cabeza de un antílope o un bisonte, pero como conchas de moluscos no han visto nunca la luz del día. La pregunta de por qué no hay conchas como éstas nos devuelve a la controversia del principio. ¿Está la evolución limitada por falta de variación disponible, o es que la selección natural ni siquiera «quiere» visitar determinadas áreas del museo? El mismo Raup interpretó las regiones vacías (las zonas no sombreadas de su cubo) en términos de selección. No existe presión de selección sobre los moluscos para que se desplacen a las áreas representadas por espacios vacíos. En otras palabras, las conchas con estas formas teóricamente posibles habrían sido, en la práctica, malas conchas para vivir en ellas: quizá frágiles y fácilmente aplastables, o vulnerables por cualquier otra razón, o antieconómicas en cuanto a la cantidad de material de la concha.

Otros biólogos piensan que, sencillamente, las mutaciones necesarias para desplazarse a estas áreas del museo no se han producido ni se producirán nunca. Otra manera de expresar esta opinión es que el bloque de conchas concebibles que hemos dibujado no es, en realidad, una verdadera representación del espacio de todas las conchas posibles. Según esta versión, grandes áreas del edificio no serían posibles aunque fueran deseables desde el punto de vista de la supervivencia. Mi propio instinto está a favor de la interpretación seleccionista de Raup, pero no quiero seguir adelante con el tema por el momento porque, en cualquier caso, sólo he presentado las conchas como ilustración de un espacio matemático de animales posibles.

No puedo dejar el tema de las zonas «prohibidas» sin detenerme brevemente en algunas rarezas que sí se han materializado en el mundo. *Spirula* es un pequeño molusco cefalópodo (el grupo que incluye cala-

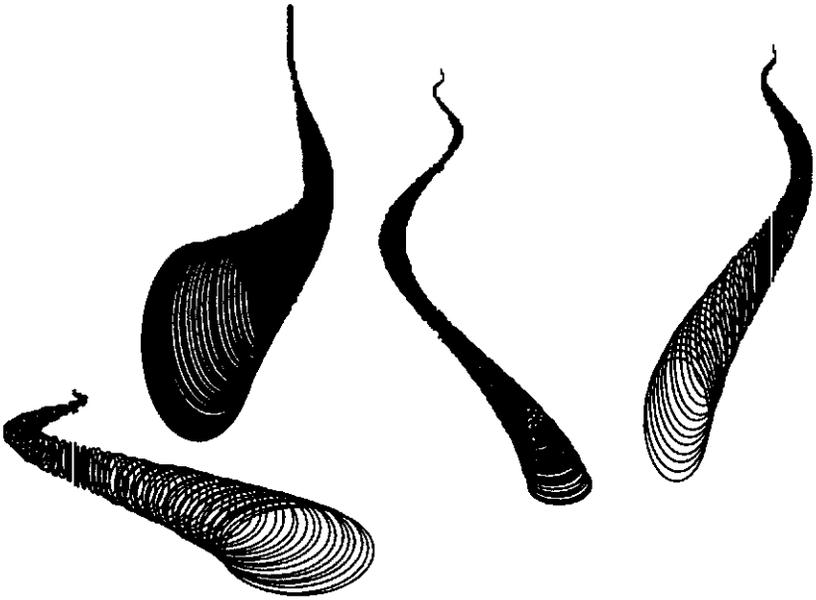


Figura 6.14. «Conchas» teóricas que no existen, excepto, quizás, como cuernos de antílope.

mares y amonites) nadador emparentado con *Nautilus*. La forma desplegada de la concha anuncia una *verma* alta (superior a *I/abocinamiento*), y ya hemos hecho referencia a este hecho en la figura 6.4. Si se acepta que esta clase de conchas con *verma* alta no suelen sobrevivir porque son estructuralmente débiles, *Spirula* se ajusta bastante bien a esta idea. El animal no vive en el interior de su concha, sino que la utiliza como órgano de flotación interno. Puesto que la concha no le sirve como protección, la naturaleza le permitió seguir una trayectoria evolutiva hacia lo que normalmente es una región de «prohibido el paso» en el Museo de Todas las Conchas Posibles. Todavía se encuentra claramente dentro del edificio del museo. Esto podría aplicarse también al caracol serpentino de las Antillas, dibujado en la figura 6.15, que ha adoptado el modo de vida (y la forma) de un gusano tubícola. Si nos dirigimos a la parte inferior derecha de la figura 6.8 nos encontraremos al menos en el sector general del museo que alberga el caracol serpentino de las Antillas. Sin embargo, algunos parientes cercanos de este animal (y también algunos amonites extinguidos) tienen una forma mucho más

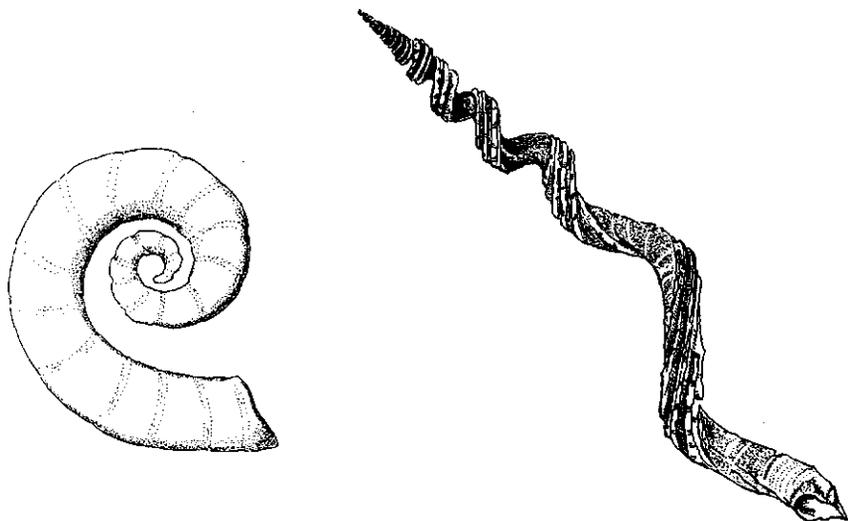
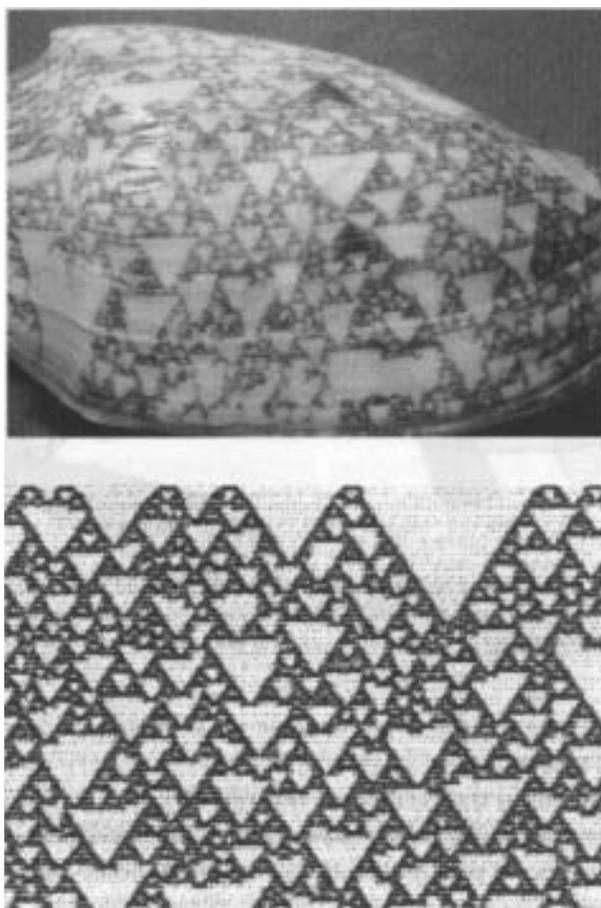


Figura 6.15. Conchas reales que se quedaron solas, en partes no frecuentadas del Museo de Todas las Conchas. Espírula común, *Spirula spirula*, y caracol serpentino de la Antillas, *Vermicularia spirata*.

extraña y menos regular, y ciertamente no pueden encajar en ninguna sección del museo.

Nuestro museo tridimensional no sólo ignora el hecho de que las secciones transversales de los tubos no son necesariamente circulares. Ignora asimismo el rico modelado de la superficie de las conchas: las rayas de tigre y las manchas de leopardo de la figura 6.10, la caligrafía en forma de V de la figura 6.4a y el repertorio completo de acanaladuras y crestas que pueden encontrarse esculpidas y pintadas en otras conchas. Algunos de estos dibujos podrían acomodarse en nuestro modelo instruyendo al ordenador así: a medida que efectúas el barrido, dibujando un círculo tras otro y construyendo el tubo en expansión como una serie de anillos, haz que cada nésimo anillo sea más grueso que los restantes. En función del valor de n , esta regla podría manifestarse en forma de bandas verticales con un espaciado determinado sobre la superficie de la concha. Reglas más complicadas pueden generar dibujos más elaborados. Un científico alemán, Hans Meinhardt, ha realizado un estudio especial de dichas reglas. La figura 6.16 muestra los dibujos de la superficie de dos conchas reales, una oliva y una voluta, a la iz-



quiera. A la derecha se reproducen los dibujos extrañamente similares generados por ordenador mediante el programa de Meinhardt. Puede verse que sus reglas producen resultados comparables a las del crecimiento de biomorfos arboriformes, pero Meinhardt no piensa en términos de ramitas que crecen, sino en ondas de activación e inhibición de secreción de pigmentos que se propagan sobre las células. Los detalles pueden encontrarse en su libro *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, pero debo dejar esta cuestión y retornar a mi tema principal del Museo de Todas las Conchas.

He propuesto la idea del museo porque se da el hecho singular de que (dejando aparte las complicaciones de la sección transversal del

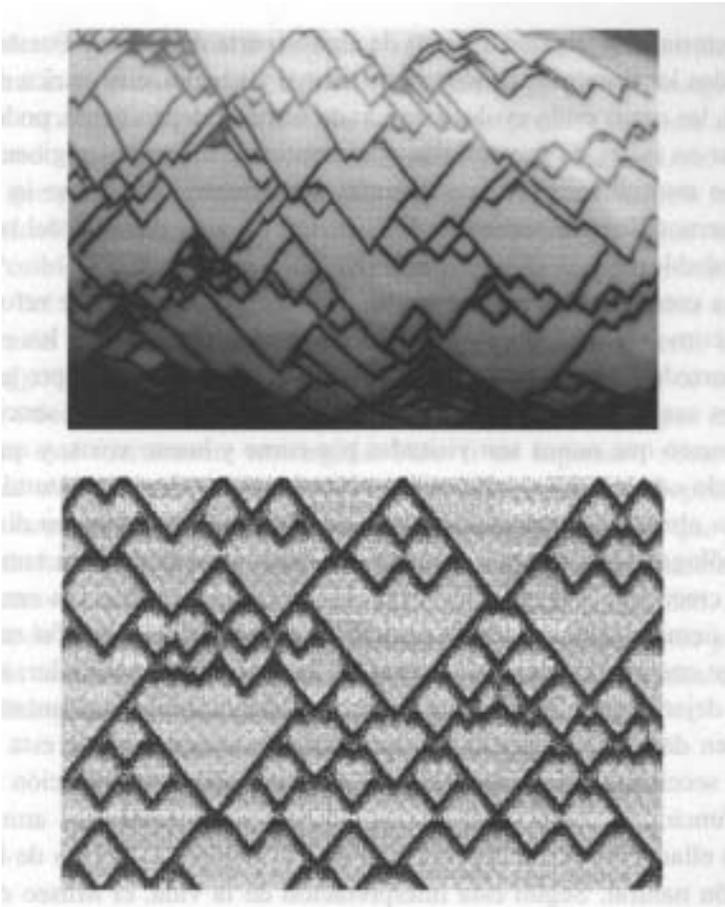


Figura 6.16. Muestras de dibujos en la superficie de conchas de gasterópodos y equivalentes generados mediante ordenador.

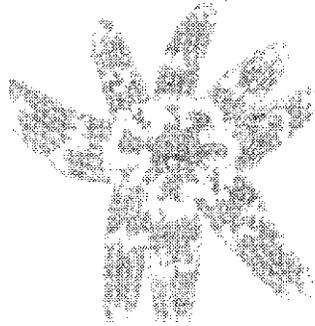
tubo, los adornos y las firmas variables) podemos caracterizar la mayoría de variantes conocidas de conchas utilizando únicamente tres números conectados a una regla de dibujo. Para acomodar formas animales que no sean conchas, por lo general tendremos que imaginar un museo con un número de dimensiones mayor del que podemos dibujar. Por difícil que sea visualizar el Museo de Todos los Animales Posibles, con su miríada de dimensiones, es fácil retener en la cabeza la idea simple de que los animales están situados cerca de los que más se les parecen, y que es posible moverse en cualquier dirección, no sólo en línea recta a lo largo de los corredores. Una historia evolutiva es una

trayectoria serpenteante a través de alguna parte del museo. Puesto que en todos los dominios de los reinos animal y vegetal, con su rica diversidad, las cosas están evolucionando de forma independiente, podemos pensar en miles de trayectorias que atraviesan diferentes regiones del museo multidimensional en distintas direcciones (advuértase lo lejos que hemos llegado partiendo de la metáfora, muy distinta, del monte Improbable).

La controversia con la que abríamos este capítulo puede reformularse como sigue. Algunos biólogos creen que, al pasear por los extensos corredores del museo, lo que encontraremos serán siempre gradaciones suaves en todas direcciones. De hecho, hay grandes secciones del museo que nunca son visitadas por carne y hueso vivos, y que, de acuerdo con esta idea, sólo serían visitadas si la selección natural «de-seara» abrirse camino lentamente a través de ellas. Un grupo distinto de biólogos (con los que simpatizo menos, aunque podrían tener razón) creen que hay grandes secciones del museo que están cerradas para siempre a la selección natural, que aunque la selección natural golpee con vehemencia las puertas de un determinado corredor, nunca se la dejará entrar, porque las mutaciones necesarias, simplemente, no pueden darse. De acuerdo con una variante imaginativa de esta idea, otras secciones del museo, lejos de estar cerradas a la selección natural, funcionan como imanes o sumideros, succionando los animales hacia ellas, casi con independencia de los mejores esfuerzos de la selección natural. Según esta interpretación de la vida, el Museo de las Formas Animales Posibles no es una mansión planeada de manera uniforme, con largas galerías y corredores majestuosos cuyas cualidades cambian de manera suave, sino una serie de imanes claramente separados, cada uno de ellos erizado de limaduras de hierro. Las limaduras de hierro representan animales, y los espacios vacíos entre los imanes representan formas intermedias que podrían o no sobrevivir caso de que llegaran a existir, pero que no pueden existir en primera instancia. Otra manera, quizá mejor, de expresar esta idea es decir que nuestra percepción de lo que constituye un espacio animal «intermedio» o «vecino» es errónea. Los verdaderos vecinos son aquellas formas a las que se puede llegar de un único salto mutacional. Puede que a nuestros ojos estas formas tengan la apariencia de vecinos, pero podría ser que no.

Mantengo una actitud abierta en relación a esta controversia, aunque me inclino en una dirección. Pero insisto en un punto: siempre que en la naturaleza haya una ilusión lo bastante potente de buen diseño orientado a algún fin, la selección natural es el único mecanismo conocido que puede dar cuenta de él. No insisto en que la selección natural tiene las llaves de todos los corredores del Museo de Todos los Animales Posibles, y desde luego no creo que se pueda acceder a cualquier parte del museo desde cualquier otra parte. Es muy probable que la selección natural no sea libre de vagar por donde quiera. Puede que algunos de mis colegas tengan razón, y que la libertad de acceso de la selección natural mientras serpentea, o incluso salta, por todo el museo esté fuertemente restringida. Pero si un ingeniero observa un animal o un órgano y ve que está bien diseñado para desempeñar alguna tarea, entonces me mantendré en mis trece y afirmaré que la selección natural es la responsable de la bondad del diseño aparente. Los «imanes» o los «atractores» en el «espacio animal» no pueden, sin la ayuda de la selección, conseguir un buen diseño funcional. Pero permítaseme ahora suavizar un poco mi postura e introducir la idea de las embriologías «calidoscópicas».

Embriones calidoscópicos



Los cuerpos son construidos a través de los procesos del desarrollo (que en su mayor parte tienen lugar en el embrión), de manera que si una mutación tiene que cambiar la forma de un cuerpo normalmente lo hará modificando los procesos del desarrollo embrionario. Por ejemplo, una mutación puede acelerar el crecimiento de una porción de tejido en la cabeza del embrión, lo que en último término producirá un adulto con una quijada larga y delgada. Los cambios tempranos en el desarrollo fetal pueden tener posteriormente unos efectos espectaculares: quizá dos cabezas, o un par de alas adicionales. Es improbable que la selección natural favorezca las mutaciones drásticas de este estilo, por las razones que hemos discutido en el capítulo 3. En este capítulo voy a plantear un tema distinto, la cuestión de si el *tipo* de mutaciones disponibles para que la selección natural opere sobre ellas dependerá del tipo de embriología que la especie posea. La embriología de los mamíferos es muy distinta de la de los insectos. Puede haber diferencias análogas, aunque menores, entre los tipos de embriología que adoptan los diferentes órdenes de mamíferos. El punto que quiero señalar es que algunos tipos de embriología quizá sean, en algún sentido, «mejores» a la hora de evolucionar que otros. Con esto no quiero decir que tengan una mayor frecuencia de mutación, que es algo completamente distinto. Lo que quiero decir es que las variaciones que producen algunos tipos de embriología pueden ser más prometedoras desde el punto de vista evolutivo que las variaciones arrojadas por otros tipos de embriología. Además, una forma de selección de nivel superior (lo que antes he llamado «la evolución de la evolucionabilidad») podría conducir a que el mundo se pueble de tipos de organismos cuyas embriologías los hagan más aptos a la hora de evolucionar.

Viniendo de un darwinista acérrimo como yo, esto puede sonar

como la mayor de las herejías. En los círculos neodarwinistas ortodoxos se supone que la selección natural no elige entre grupos grandes. ¿Acaso no convenimos, en el capítulo 3, que la selección natural favorece una tasa de mutación nula (que, por fortuna para el futuro de la vida, nunca se alcanza)? ¿Cómo podemos afirmar ahora que un determinado tipo de embriología puede ser «bueno» en lo que a mutar se refiere? Bueno, tal vez en el siguiente sentido: determinados tipos de embriología podrían tender a variar en ciertas direcciones, otros tenderían a variar de otras maneras y, de una forma o de otra, algunas de estas vías podrían ser más fructíferas desde el punto de vista evolutivo que otras (quizá más proclives a producir una gran radiación de formas nuevas, como ocurrió con los mamíferos tras la extinción de los dinosaurios). Es eso lo que quería decir al hacer la sugerencia, un tanto estrafalaria, de que algunas embriologías eran «mejores a la hora de evolucionar» que otras.

Una buena analogía es el calidoscopio, solo que los calidoscopios tienen que ver con la belleza visual y no con el diseño utilitario. Los fragmentos coloreados de un calidoscopio se disponen en un montón aleatorio, pero, en virtud de los espejos colocados en ángulos determinados dentro del instrumento, lo que vemos a través del ocular es una forma galanamente simétrica, como un copo de nieve. Golpecitos aleatorios («mutaciones») en el tubo provocan ligeros movimientos del montón de ripios. Pero nosotros, que observamos a través del ocular, los vemos como cambios que se repiten de manera simétrica en todos los puntos del copo de nieve. Golpeamos el tubo una y otra vez, y parece como si deambuláramos a través de una pequeña cueva de Aladino de formas engalanadas.

La esencia del calidoscopio es la repetición espacial. Los cambios aleatorios se repiten en los cuatro sectores de un círculo (o cualquier otro número de sectores, en función del número de espejos). También las mutaciones, aunque en sí mismas constituyan cambios simples, pueden tener efectos repetitivos en distintas partes del cuerpo. Podemos contemplar este hecho como otra fuente de no aleatoriedad, que podemos añadir a las ya consideradas en el capítulo 3. El número de repeticiones depende del tipo de embriología. Distinguiré varios tipos de embriología calidoscópica. Fue la experiencia con los biomorfos (más concretamente, la colocación de «espejos» informáticos —véase

más adelante— en el Relojero Ciego) lo que me llevó a aceptar la importancia de la embriología calidoscópica. No es accidental, pues, que las ilustraciones de este capítulo se basen extensamente en los biomorfos y otros animales informáticos.

Primero trataremos la simetría, empezando por su ausencia. Nuestros propios cuerpos son altamente simétricos (aunque no absolutamente), igual que los de la mayoría de animales que vemos, de manera que tendemos a olvidar que la simetría no es una cualidad obvia que toda criatura debe poseer. Algunos grupos de protozoos (animales unicelulares) son asimétricos: se pueden dividir en dos como uno quiera, y las dos mitades nunca serán ni idénticas ni imágenes especulares una de otra. ¿Cuál será el impacto de la mutación en un animal puramente asimétrico? Para explicar esto es mejor echar mano de los biomorfos.

Los cuatro biomorfos de la figura 7.1a son variantes mutantes de una misma forma, y todos son producidos por una embriología que no tiene restricciones de simetría. Las formas simétricas no están prohibidas, pero no hay un afán especial por producirlas. Las mutaciones simplemente modifican la forma, y esto es todo lo que hay: no son evidentes efectos «calidoscópicos» ni «espejos». Pero observemos los biomorfos de la figura 7.1b. De nuevo son variantes mutantes de una misma forma, pero con una regla de simetría incorporada a su embriología: el programa se ha modificado para incluir un «espejo informático» a lo largo de la línea media. Las mutaciones pueden alterar todo tipo de cosas, del mismo modo que podían hacerlo en los biomorfos asimétricos, pero cualquier cambio aleatorio en el lado izquierdo tendrá asimismo su imagen especular en el lado derecho. Estas formas parecen más «biológicas» que las de la ilustración anterior.

En embriología, una regla de simetría puede contemplarse como una restricción o «limitación», en el sentido estricto de que la embriología no restringida es capaz en teoría de producir tanto formas simétricas como asimétricas, y por lo tanto es más prolífica. Pero en este capítulo veremos que una regla de simetría puede significar de hecho un enriquecimiento, todo lo contrario de una restricción. El problema de la embriología no restringida es que hay que pasar por una miríada de formas antes de que por casualidad aparezca una forma simétrica. Aun entonces, la tan esperada simetría se verá constantemente amenazada por generaciones futuras de mutación. Si la simetría va a

resultar casi siempre deseable, con independencia de otras consideraciones, la embriología restringida será mucho más «productiva», además de resultar más bella a nuestros ojos. A diferencia de la embriología no restringida, una embriología restringida no perderá tiempo en desechar las formas asimétricas que, de cualquier modo, habría que eliminar.

En realidad, la gran mayoría de animales, nosotros incluidos, somos en gran medida (aunque no completamente) simétricos en el plano izquierda-derecha. La belleza en sí misma no es importante, de modo que podemos preguntarnos por qué la simetría izquierda-derecha es un rasgo deseable en un sentido utilitario. Algunos zoólogos se adhieren a una hipótesis del siglo XVIII que, con respecto a los rasgos principales de la construcción de los organismos —y la simetría es uno de ellos— afirma que los animales son como son en virtud de una cierta lealtad casi mística a un «plan corporal fundamental», o *Bauplan*. (*Bauplan* no es más que «proyecto arquitectónico» en alemán; es típico cambiar de idioma para indicar profundidad —«estas notas de tuba procedentes de la profundidad del Rin», como señalaba sarcásticamente Sir Peter Medawar—, pero en realidad, y si se me permite un comentario jocoso, hay una cierta ironía en el empleo del término «proyecto», porque sugiere una relación «reduccionista», unívoca, entre plano y construcción que, en un contexto genético, ofendería las sensibilidades ideológicas de las mismas personas que adoran la palabra *Bauplan*.) Prefiero la simplicidad anglosajona de mi colega el doctor Henry Bennet-Clark, con quien he hablado de estos temas: «Todas las preguntas sobre la vida tienen la misma respuesta (aunque puede que no siempre sea una respuesta útil): la selección natural». Sin duda los beneficios concretos de la simetría izquierda-derecha varían en los diferentes tipos animales, pero Bennet-Clark ha sugerido algunas generalizaciones.

La mayoría de animales o bien son vermiformes o bien descienden de antepasados vermiformes. Si se piensa en lo que representa ser un gusano, tiene sentido tener la boca en un extremo (el extremo que entra primero en contacto con el alimento) y el ano en el otro, de manera que se puedan dejar los productos de desecho detrás en lugar de comerse los sin querer. Esto define un extremo anterior y otro posterior. Después, el mundo suele imponer una diferencia significativa entre arriba y abajo. La razón mínima para ello es la gravedad. En particular, mu-



a. Biomorfos asimétricos



b. Biomorfos simétricos



c. Biomorfos simétricos norte-sur



d. Biomorfos simétricos radialmente



e. Biomorfos simétricos Isla de Man

Figura 7.1. Biomorfos limitados por números diferentes de «espejos calidoscópicos», y que por lo tanto presentan distintos tipos de simetría.

chos animales se desplazan sobre una superficie, tal como el suelo o el fondo del mar. Es razonable que, por toda una serie de motivos, el lado del animal más cercano al suelo sea diferente del lado más cercano al cielo. Esto define un lado dorsal (espalda) y uno ventral (vientre) y, dado que ya tenemos un extremo anterior y uno posterior, ahora nos queda un lado derecho y un lado izquierdo. Ahora bien, ¿por qué razón los lados derecho e izquierdo tendrían que ser imágenes especulares uno del otro? La respuesta más rápida es: ¿por qué no? A diferencia de la asimetría anteroposterior y de la asimetría dorsoventral, que están bien justificadas, no hay un motivo general para suponer que la forma óptima para un lado izquierdo deba ser distinta de la forma óptima para un lado derecho. En realidad, si existe una forma óptima para un lado izquierdo, es razonable suponer que el mejor lado derecho compartirá las mismas cualidades. Más específicamente, cualquier desviación importante de la simetría especular izquierda/derecha podría traducirse en que el animal se desplazara en círculos cuando debiera seguir la distancia más corta entre dos puntos.

Dado que, por la razón que sea, es deseable que los lados izquierdos y los lados derechos evolucionen juntos como imágenes especulares adosadas, las embriologías «calidoscópicas» con un único «espejo» a lo largo de la línea media tendrán ventaja. Las mutaciones nuevas que tengan algo de bueno se reflejarán automáticamente en ambos lados. ¿Cuál es la alternativa no calidoscópica? Un linaje en evolución podría experimentar primero una modificación beneficiosa en, por ejemplo, el lado izquierdo del cuerpo, y después tendría que esperar que pasaran muchas generaciones de asimetría hasta que apareciera una mutación equivalente en el lado derecho. Es fácil ver que una embriología calidoscópica bien puede representar una ventaja. Quizá, por lo tanto, exista un tipo de selección natural en favor de embriologías calidoscópicas de carácter cada vez más restrictivo, y al mismo tiempo productivo.

Esto no quiere decir que nunca puedan evolucionar asimetrías izquierda-derecha. Ocasionalmente aparecen mutaciones que afectan más a un lado que al otro. A veces hay razones especiales que hacen deseable una mutación asimétrica (como, por ejemplo, para que el abdomen de los cangrejos ermitaños encaje en conchas arrolladas) y entonces la selección natural la favorece. Ya hemos visto en el capítulo 4

los peces planos del tipo de la platija, el lenguado y el rodaballo (véase la figura 4.7). Las platijas se han asentado sobre el que originariamente era su lado izquierdo, y el ojo izquierdo ha migrado hasta el lado derecho ancestral, que ahora es el superior. Los lenguados han hecho lo mismo, con la diferencia de que se posan sobre su antiguo lado derecho, lo que podría indicar, aunque no necesariamente, que evolucionaron de forma independiente. Desde el punto de vista funcional, la cara izquierda se ha convertido en las platijas en la cara ventral que, apropiadamente, se ha vuelto plana y plateada, y la cara derecha se ha convertido en la cara dorsal, la que mira al cielo, y en correspondencia ha adquirido una cierta curvatura y un color críptico. Los lados dorsal y ventral ancestrales se han convertido en los lados izquierdo y derecho; sus aletas respectivas, la dorsal y la ventral, normalmente bien distintas, se han convertido en imágenes especulares casi exactas. La simetría izquierda-derecha redescubierta por platijas y lenguados constituye, de hecho, una buena demostración del poder de la selección natural en contraposición a los planes corporales fundamentales del continente. Sería interesante (y factible) descubrir si las mutaciones en las platijas quedan automáticamente reflejadas en los (nuevos) lados izquierdo y derecho (es decir, los antiguos lados dorsal y ventral) o bien, siguiendo el modelo ancestral, se reflejan automáticamente en los (antiguos) lados izquierdo y derecho (que ahora son el inferior y el superior). La diferencia entre el lado plateado y el críptico de una platija, ¿se ha ganado en lucha contra una antigua embriología calidoscópica hostil, o con la ayuda de una nueva embriología calidoscópica amistosa? Sea cual sea la respuesta a estas preguntas, sirve para ilustrar el hecho de que «hostil» y «amistoso» (para la evolución) son términos aplicables a una embriología. Una vez más, ¿podemos atrevernos a sugerir que una especie de selección natural de orden superior podría actuar para mejorar la «amigabilidad» de las embriologías hacia determinados tipos de evolución?

Desde la perspectiva de este capítulo, lo importante acerca de la simetría izquierda-derecha es que una única mutación ejerce sus efectos simultáneamente en dos lugares del animal en vez de uno solo. Esto es lo que quiero decir con embriología calidoscópica: es como si las mutaciones se reflejaran. Pero la simetría izquierda-derecha no es la única posible. Hay otros planos en los que podrían situarse espejos mutacio-

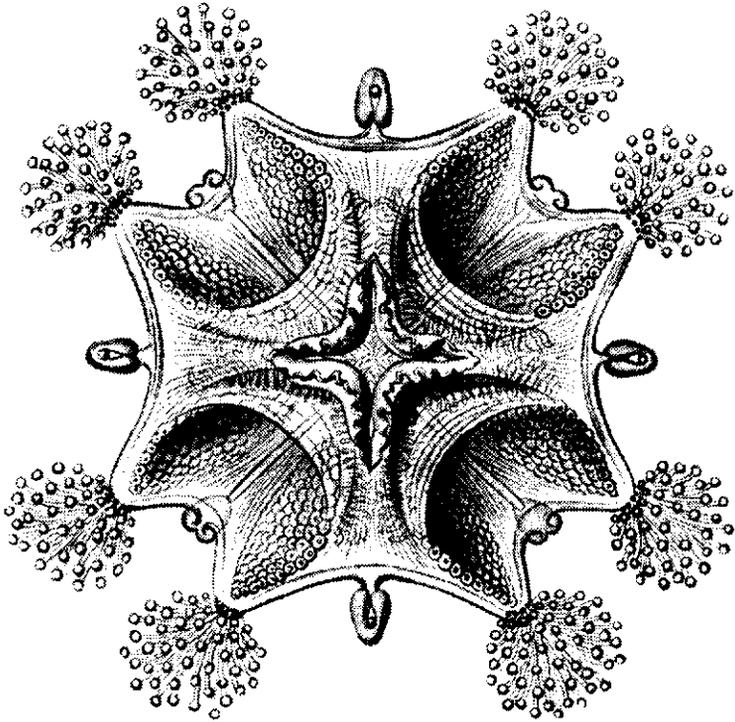


Figura 7.2. Un animal simétrico tetrarradiado: una medusa pedunculada. Adviértase que cada uno de los cuatro ejes es asimismo simétrico izquierda-derecha con respecto a sí mismo, de manera que la mayor parte de la variación está reflejada en realidad ocho veces.

nales. Los biomorfos de la figura 7.1c son simétricos no sólo en el plano izquierda-derecha, sino también en el plano anteroposterior. Es como si hubiera dos espejos situados en ángulo recto. Es más difícil encontrar animales reales con esta «embriología biespecular» que animales con simetría izquierda-derecha. El cinturón de Venus [*Cestus veneris*], un nadador planctónico de forma acintada perteneciente al poco conocido tipo de los ctenóforos, es un ejemplo fantasmalmente bello. Más corrientes son las embriologías calidoscópicas que se ajustan a la simetría tetrarradiada, como los biomorfos de la figura 7.1d. Muchas medusas exhiben este modelo de simetría. Los miembros de su tipo o bien nadan en el mar (como las propias medusas) o bien se anclan en el fondo (como las anémonas de mar), de manera que no están sujetos a las presiones de tipo anteroposterior comentadas a propósito de anima-

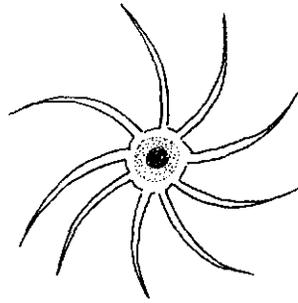


Figura 7.3. «Simetría Isla de Man»: el espermatozoide de un cangrejo de río.

les reptantes como los gusanos. Tienen buenos motivos para poseer un lado superior y otro inferior, pero no para tener extremos anterior y posterior, o lados izquierdo y derecho. Por lo tanto, si se los observa desde arriba, no hay ninguna razón especial para privilegiar un eje frente a otro y, de hecho, son «radialmente simétricos». La medusa de la figura 7.2 tiene una simetría tetrarradiada, pero, como veremos, también son comunes otros números de radios. Esta figura, como otras muchas de este capítulo, fue dibujada por Ernst Haeckel, el célebre zoólogo alemán decimonónico, conocido también por ser un brillante ilustrador.

Los animales con este tipo de simetría adoptan una enorme variedad de formas, pero con una restricción que, lo estoy sugiriendo de nuevo, puede resultar no tanto una limitación como una mejora «calidoscópica». Los cambios aleatorios afectan simultáneamente los cuatro lados. Puesto que, al mismo tiempo, las unidades que están repetidas cuatro veces suelen tener asimismo una imagen especular, cada mutación se repite en realidad ocho veces. Esto resulta muy evidente en la medusa pedunculada de la figura 7.2, que posee ocho penachos, dos en cada esquina. Presumiblemente, una mutación en la forma del penacho se manifestaría ocho veces. Para ver qué aspecto tendría la simetría radial en ausencia de esta duplicación adicional, obsérvense los biomorfos de la figura 7.1e. Es muy difícil encontrar animales reales con este tipo de simetría en «esvástica» o «isla de Man»,* pero la figura 7.3 muestra el tipo de estructura que estamos buscando. Se trata del espermatozoide de un cangrejo de río.

* En referencia a la bandera de esta isla de soberanía inglesa, que luce tres piernas semidobladas que surgen de un origen común en el centro de la bandera. (*N. del T.*)

Sin embargo, la mayoría de animales con simetría radial añade a cada radio una simetría especular izquierda-derecha. Así pues, en lo que respecta a contabilizar el número de veces que una mutación se «reflejará», hay que contar el número de radios y después doblarlo. Los cinco brazos de una estrella de mar típica son simétricos en sentido izquierda-derecha, por lo que podemos decir que cada mutación se «refleja» diez veces.

Haeckel se complacía especialmente en dibujar organismos unicelulares tales como las diatomeas de la figura 7.4. Aquí vemos simetrías calidoscópicas con dos, tres, cuatro, cinco y más «espejos», además del espejo izquierda-derecha de cada brazo. Para cada tipo de simetría, la embriología es tal que las mutaciones actúan no en un lugar, sino en un número fijo de lugares. Por ejemplo, la estrella de cinco puntas situada cerca de la parte superior de la figura 7.4 podría mutar para producir puntas más aguzadas. En tal caso, las cinco puntas se aguzarían simultáneamente. No tendríamos que esperar a que se produjesen cinco mutaciones separadas. Presumiblemente, los diferentes números de espejos son ellos mismos mutaciones (mucho más raras) de unos en otros. Quizá una estrella de tres puntas, por ejemplo, pueda mutar ocasionalmente en una estrella de cinco puntas.

Entre los calidoscopios microscópicos, para mí los campeones son los radiolarios, otro grupo planctónico al que Haeckel prestó una atención especial (figura 7.5). También ellos ilustran hermosas simetrías de varios órdenes, equivalentes a calidoscopios con dos, tres, cuatro, cinco, seis y más espejos. Poseen minúsculos esqueletos de yeso, con una belleza y una elegancia que llevan la embriología calidoscópica escrita por todas partes.

La obra maestra calidoscópica de la figura 7.6 podría haber sido diseñada por el arquitecto visionario Buckminster Fuller (a quien una vez tuve el privilegio de escuchar, a sus noventa años, impartiendo sin respiro una conferencia que duró tres hipnóticas horas). Al igual que los domos geodésicos de Fuller, el esqueleto de la figura se basa para su resistencia en la forma estructuralmente robusta del triángulo. Es, claramente, el producto de una embriología calidoscópica de un orden elevado. Cualquier mutación dada se reflejará muchas veces. A partir de esta ilustración no puede determinarse el número exacto de radios. Otros radiolarios dibujados por Haeckel han sido utilizados por crista-

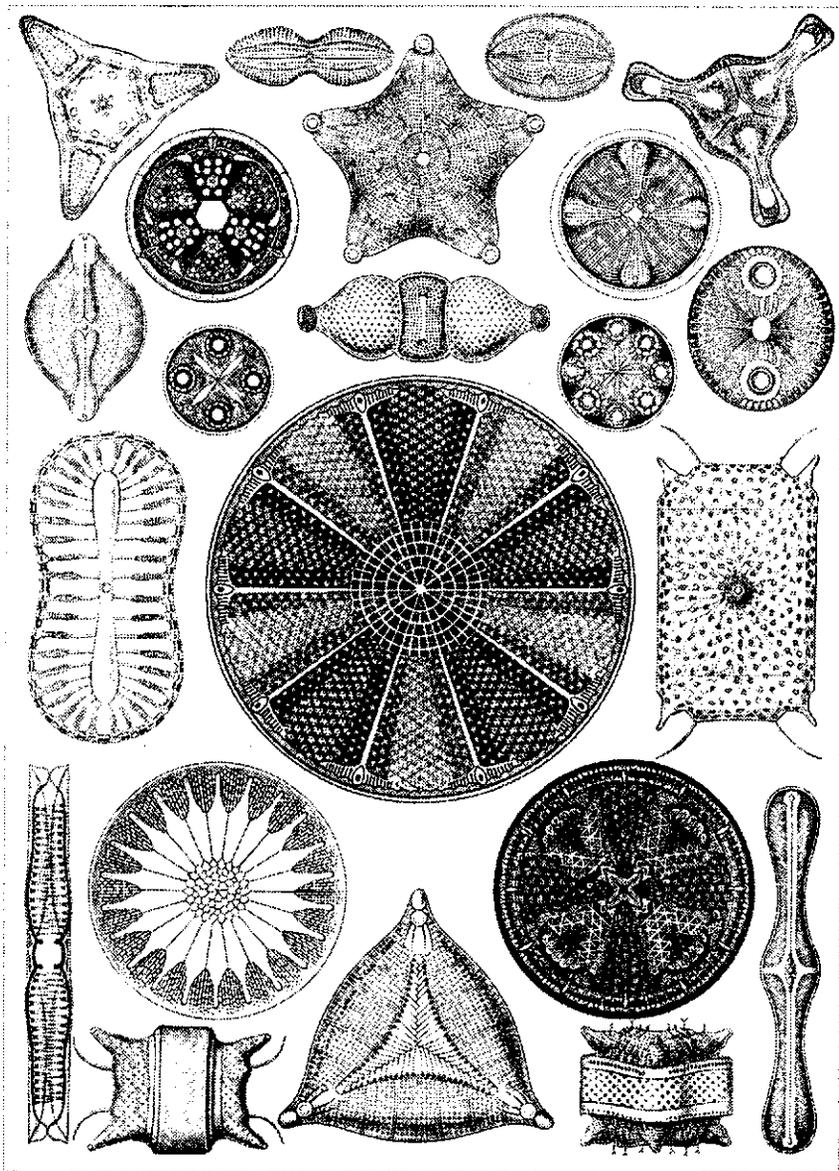


Figura 7.4. Diatomeas (plantas unicelulares microscópicas) que ilustran diferentes números de espejos calidoscópicos «n el seno de un grupo de organismos.

lógrafos químicos como ilustración de los sólidos regulares conocidos desde la antigüedad como octaedro (ocho facetas triangulares), dodecaedro (doce facetas pentagonales) e icosaedro (veinte facetas triangulares). De hecho, D'Arcy Thompson, al que conocimos en relación con las conchas de caracoles, habría comentado que las embriologías de estos exquisitos radiolarios tienen más en común con el crecimiento de los cristales que con el desarrollo embrionario en el sentido habitual.

En cualquier caso, los organismos unicelulares como las diatomeas y los radiolarios tienen necesariamente un tipo de embriología muy distinto del de los animales pluricelulares, y cualquier semejanza entre sus calidoscopios será probablemente una coincidencia. Ya hemos visto un animal pluricelular cuatro veces simétrico, una medusa. El número cuatro, o un múltiplo de éste, es común entre tales medusas, y presumiblemente es fácil de obtener mediante la simple duplicación de algún proceso durante la embriología temprana. También hay medusas seis veces simétricas, como las pertenecientes al grupo de hidroideos conocido como traquimedusas (figura 7.7).

Los exponentes más famosos de la simetría pentarradiada son los equinodermos, ese gran tipo de animales marinos espinosos que incluye estrellas de mar, erizos de mar, ofiuras, holoturias o cohombros de mar, y comátulas o lirios de mar (figura 7.8). Se ha sugerido que los equinodermos de simetría pentarradiada proceden de antepasados remotos trirradiados, pero estos animales existen desde hace más de quinientos millones de años, y es tentador considerar que la simetría pentarradiada es un elemento fundamental de uno de esos *Baupláne* persistentes que tanto encantan a los zoólogos de inspiración continental. Por desgracia para esta hipótesis idealista, no sólo existe una minoría notable de especies de estrellas de mar con un número de brazos diferente de cinco, sino que incluso dentro de especies ortodoxamente pentarradiadas suelen aparecer de vez en cuando *individuos* mutantes de simetría tri-, tetra- o hexarradiada.

Por otro lado, y en contra de lo que cabía esperar a partir de nuestro análisis simple de lo que supone ser un animal que se desplaza sobre el fondo, incluso los equinodermos reptantes suelen tener simetría radiada; y parecen obrar en consecuencia, en el sentido de que no les importa en qué dirección caminan: no hay un brazo privilegiado. En un momento dado una estrella de mar tendrá un «brazo conductor», pero

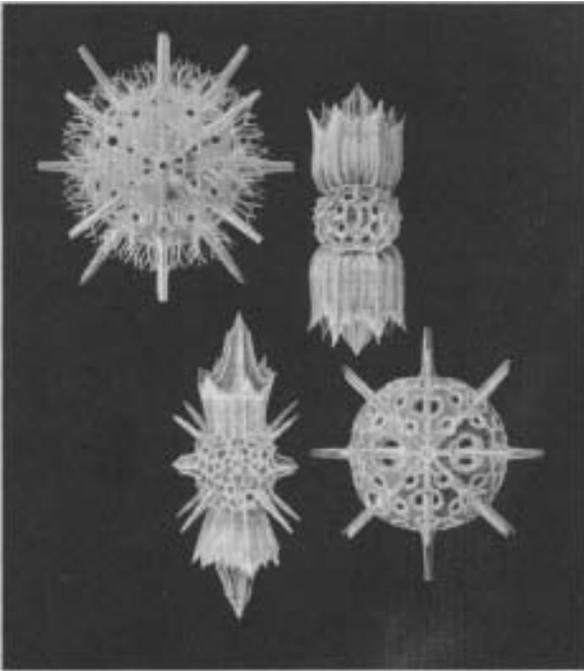
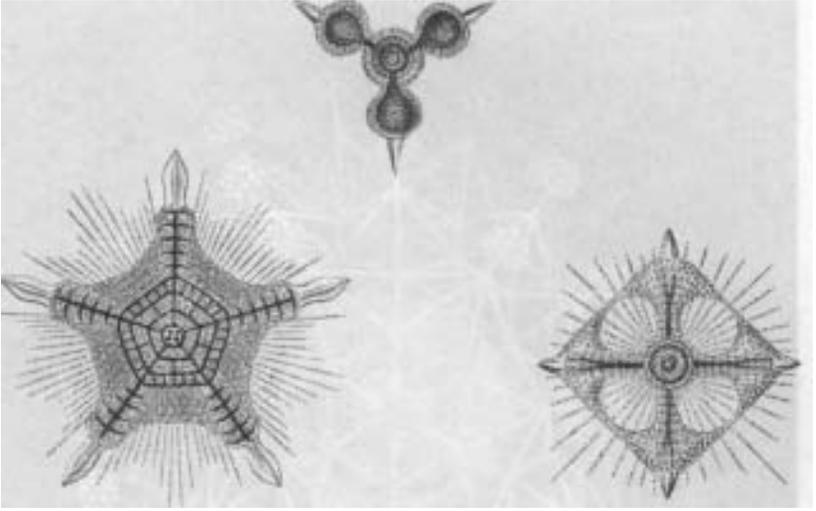


Figura 7.5. Radiolarios. Más ejemplos de números diferentes de espejos calidoscópicos de simetría en un grupo de organismos unicelulares microscópicos.



Figura 7.6. Esqueleto de un radiolario grande y espectacular.

de vez en cuando cambia a otro brazo conductor. A lo largo del tiempo evolutivo, algunos equinodermos han redescubierto la simetría izquierda-derecha. Los erizos acorazonados y los dólares de la arena, ambos excavadores, y a los que la arena ha debido someter a una presión extrema para ahusar el cuerpo, han redescubierto la asimetría anteroposterior y han sobreimpuesto una asimetría superficial izquierda-derecha a su forma, que se basa reconociblemente en la de un erizo de mar pentarradiado.

Los equinodermos son criaturas tan exquisitas que, cuando intentaba generar biomorfos realistas con el Relojero Ciego, aspiraba naturalmente a conseguir algo que se les pareciera. Todos mis intentos de generar una simetría pentarradiada fracasaron. La embriología del re-

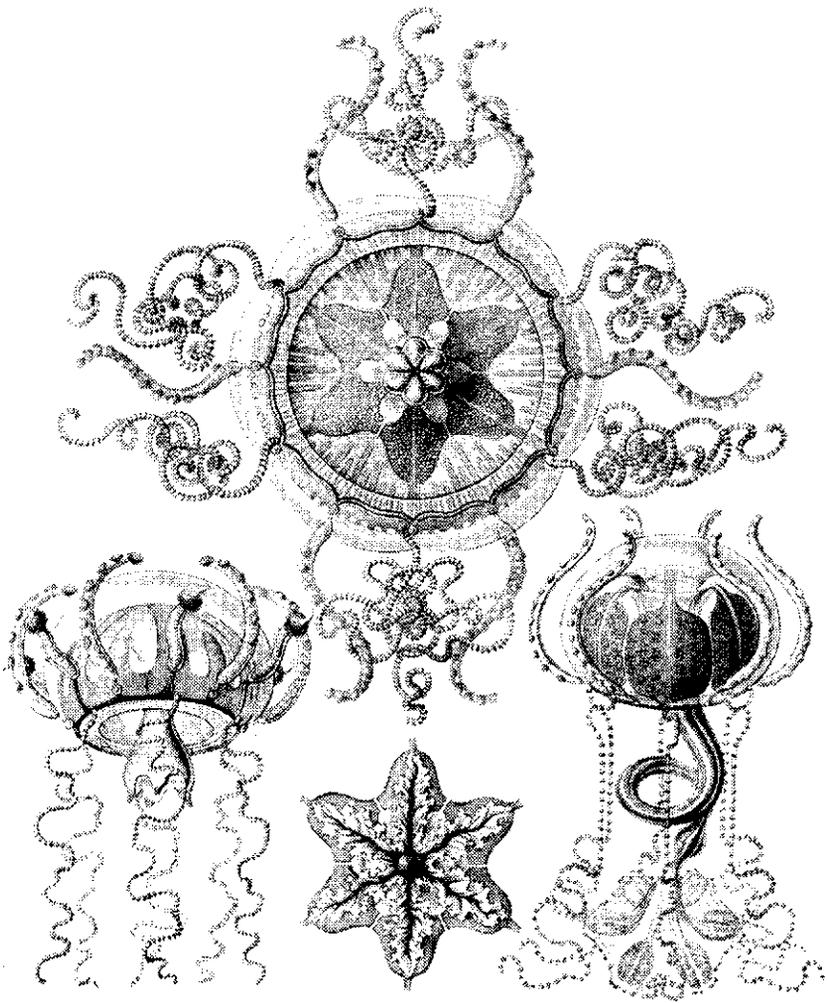


Figura 7.7. Medusas simétricas hexarradiadas.

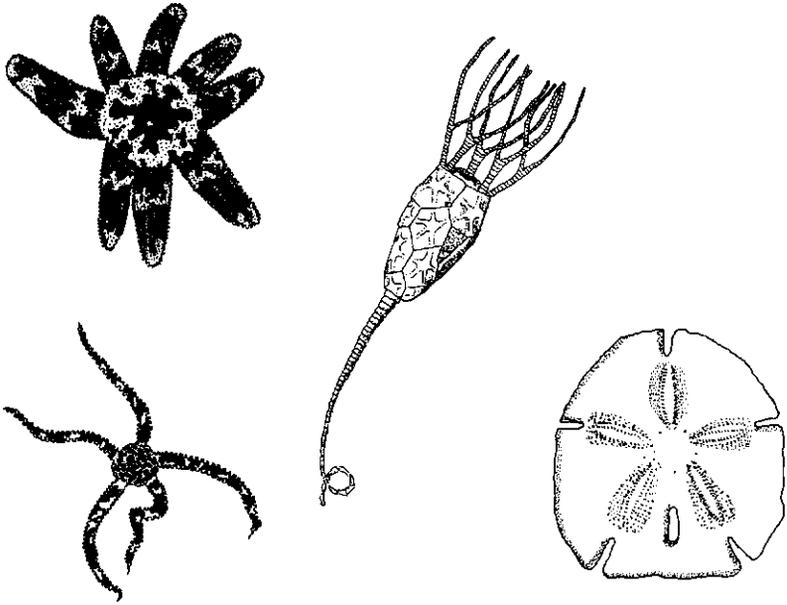


Figura 7.8. Equinodermos de varios grupos: (de izquierda a derecha) ofiura, estrella de mar de múltiples brazos (que probablemente ha sufrido la pérdida y regeneración de algún brazo, lo que explica sus brazos desiguales), un lirio de mar y un dólar de la arena.

lojero ciego no era adecuadamente calidoscópica. Carecía del número necesario de «espejos». De hecho, como hemos visto, algunos equinodermos monstruosos se apartan de la simetría pentarradiada, de manera que «hice trampa» simulando estrellas de mar, ofiuras y erizos de mar con un número par de radios (figura 7.9).

Pero no hay manera de librarse del hecho (en realidad, ello ilustra el punto fundamental de este capítulo) de que la versión actual del programa Relojero Ciego es incapaz de parir un biomorfo simétrico de cinco caras. Para poder rectificar esto tendría que modificar el propio programa (hace falta un nuevo «espejo», no sólo una mutación cuantitativa de un gen existente) de manera que permitiese una nueva clase de mutaciones calidoscópicas. Si se hiciera esto estoy seguro de que los procesos ordinarios de mutación y selección aleatorias, que toman mucho tiempo, producirían semejanzas mucho mejores de la mayoría de grupos principales de equinodermos. La versión original del programa, tal como se describe en *El relojero ciego*, era capaz de producir

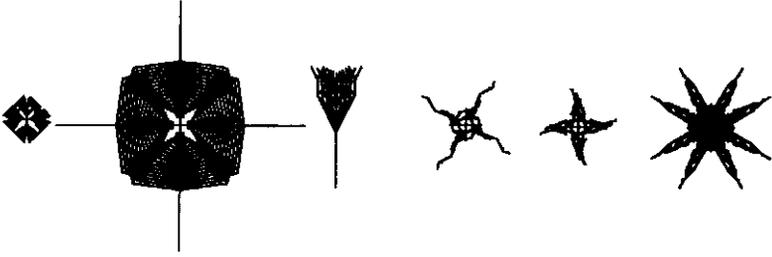


Figura 7.9. Los biomorfos generados por ordenador pueden parecerse superficialmente a equinodermos, pero nunca consiguen la esquiva simetría pentarradiada. Habría que reescribir el programa para que ello fuera posible.

sólo mutaciones con simetría izquierda-derecha. La capacidad del programa actual (disponible comercialmente) de producir biomorfos de simetría tetrarradiada, así como biomorfos tipo «Isla de Man» o «esvástica», es fruto de una decisión por mi parte de reescribirlo de manera que se pudiera colocar un repertorio de «espejos informáticos» bajo control genético.

He estado hablando de varios tipos de simetría como ejemplos de embriologías calidoscópicas. Menos espectacular desde el punto de vista geométrico, pero igualmente importante en el mundo de los animales reales, es el fenómeno de la segmentación. Segmentación significa repetición serial a lo largo del eje anteroposterior del cuerpo, por lo general en un animal que de ordinario es alargado y con simetría izquierda-derecha. Los ejemplos más evidentes de animales segmentados son los anélidos (lombrices de tierra, sanguijuelas, gusanos y gusanos tabicólas) y los artrópodos (insectos, crustáceos, milpiés, trilobites, etc.), pero también nosotros, los vertebrados, estamos segmentados, aunque de forma bastante distinta. Del mismo modo que un tren es una serie de vagones o furgones, cada uno básicamente igual que los demás pero con alguna diferencia de detalle, un artrópodo es una serie de segmentos que pueden diferir entre sí en algún detalle. Un ciempiés es como un tren de mercancías, con todos sus furgones muy parecidos entre sí. Se podría pensar que los demás artrópodos son ciempiés con pretensiones: trenes con furgones y vagones diversos y con finalidades especiales (figura 7.10).

El estilo ciempiés de organizar un cuerpo es repetitivo de manera simple. Hay una repetición espacial a todo lo largo del tren y también

simetría especular izquierda-derecha en cada segmento. Pero, si nos alejamos de los ciempiés y afines, en la evolución se observa una tendencia persistente a una diferenciación progresiva de los segmentos: no todas las mutaciones se repiten simplemente en cada segmento. Los insectos son como ciempiés que han perdido las patas en todos los segmentos excepto tres: los segmentos siete, ocho y nueve, contados desde el extremo anterior. Las arañas conservan patas en cuatro segmentos. En realidad, tanto arañas como insectos conservan más «extremidades» primitivas que las mencionadas. Lo que ocurre es que las han reconvertido en antenas o mandíbulas. Las langostas, y más aún los cangrejos, han llevado incluso más lejos la diferenciación no calidoscópica de los segmentos.

Las orugas tienen las tres «patas de insecto» usuales cerca de la parte anterior, pero también han reinventado las patas posteriores. Estas patas reinventadas son más blandas y bastante distintas en otros aspectos de las típicas patas articuladas y acorazadas que surgen de los tres segmentos torácicos. Los insectos típicos también poseen alas en los segmentos siete y ocho. Algunos insectos carecen de alas, y sus antepasados nunca las tuvieron. Otros insectos, como las pulgas y las hormigas obreras, han perdido las alas que antaño tuvieron sus antepasados. Las hormigas obreras poseen la dotación genética para desarrollar alas: cada obrera podría haber sido una reina de haber sido criada de otra manera, y las reinas poseen alas. Curiosamente, una reina suele perder sus alas en el curso de su vida, a veces porque ella misma se las arranca cuando ha completado su vuelo nupcial y está preparada para instalarse bajo tierra. Para vivir bajo tierra las alas estorban, igual que para vivir en la espesa maleza formada por el pelaje o plumaje del huésped de una pulga.

Mientras que las pulgas han perdido ambos pares de alas, las moscas (miembros del amplísimo orden de los dípteros, que incluye también los mosquitos) han perdido un par y conservado el otro. El segundo par de alas sobrevive en una forma muy reducida, los «halterios», minúsculos palillos que surgen inmediatamente detrás de las alas funcionales (figura 7.11). No hace falta ser un ingeniero para ver que los halterios no funcionarían como alas. Hace falta ser un ingeniero muy competente para ver cuál es su verdadera función. Por lo visto son minúsculos estabilizadores, que cumplen una misión semejante a la de

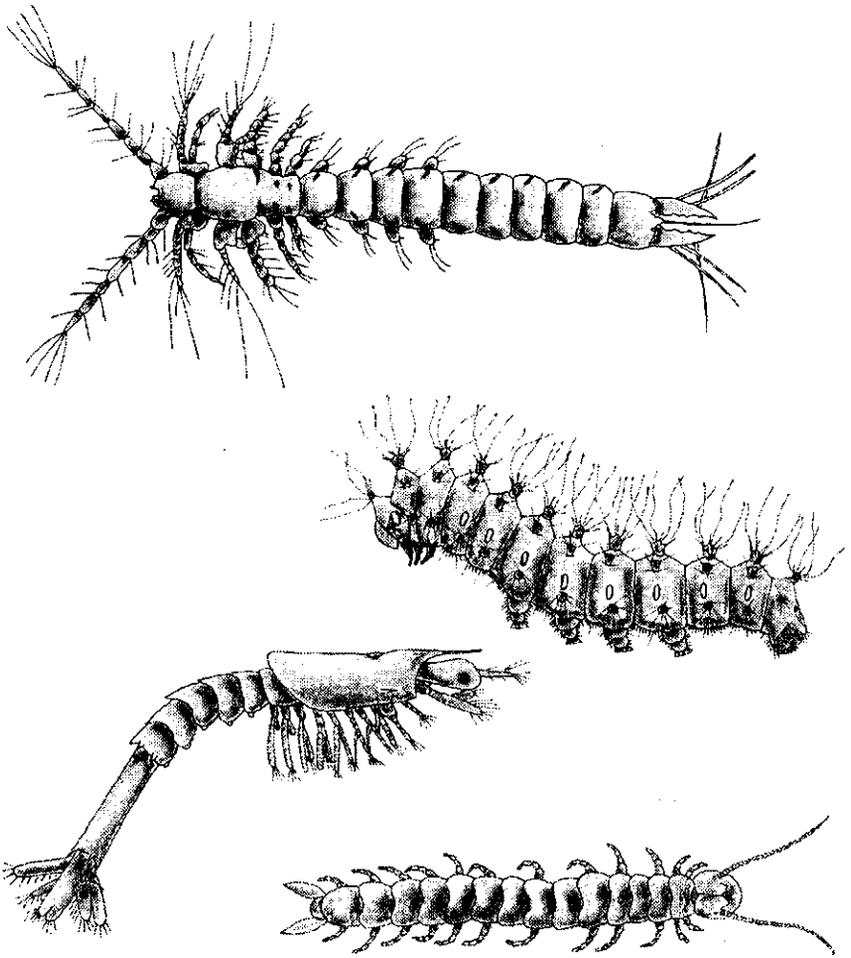


Figura 7.10. Los artrópodos están formados a partir de la repetición de segmentos, frecuentemente con variaciones, desde la parte anterior a la posterior: (desde arriba) crustáceo mistacocárido, *Derocheilocaris*; oruga de gran pavón nocturno, *Saturnia pyri*; gamba dendrobranquiada, *Penaeus*-, sínfilo (semejante a los ciempiés), *Scutigera*.

los giroscopios de aviones y cohetes. Los halterios vibran a la frecuencia de batido de las alas. Minúsculos sensores en la base de cada halterio detectan fuerzas en las tres direcciones que los pilotos denominan cabezada, balanceo y guiñada. Es típico de la evolución ser oportunista y echar mano de lo que se tiene. Un ingeniero que diseñara un avión se

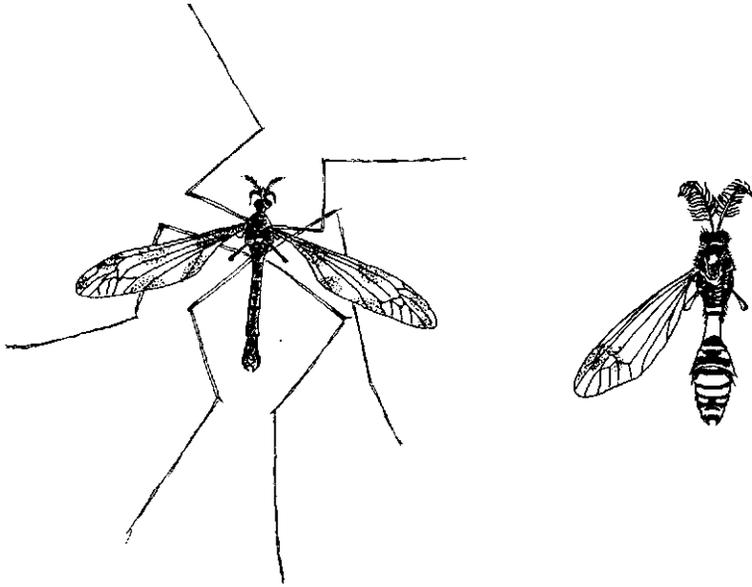


Figura 7.11. Todos los miembros del orden de las moscas (Dípteros) poseen halterios en lugar del segundo par de alas. Las moscas grandes, como estas t́pulas, los muestran de manera particularmente clara: (izquierda) *Tipula maxima*; (derecha) *Ctenophora ornata* (de la que no se muestran las patas ni el ala derecha).

sentaría ante la mesa de dibujo y diseñaría un estabilizador partiendo de cero. La evolución consigue el mismo resultado modificando lo que ya está presente, en este caso un ala.

El que los segmentos evolucionen para diferenciarse entre sí no es calidoscópico; más bien todo lo contrario. Pero existen otras transformaciones que podemos considerar calidoscópicas, en un sentido más sutil del que hasta ahora hemos encontrado. Con frecuencia, el cuerpo de los artrópodos tiene una estructura bastante parecida a una frase con paréntesis rematados. (Si se abren paréntesis en una frase [los paréntesis interiores como éste] deben anidarse adecuadamente] los paréntesis deben cerrarse de nuevo.) La frase entre paréntesis puede alargarse o acortarse, pero, con independencia de lo larga que sea, cada «(» debe rematarse con un «)». El mismo «anidamiento adecuado» se aplica a las comillas; y también, lo que resulta más interesante, a la introducción de oraciones subordinadas en frases. «El hombre que se sentó sobre una aguja...» es como un paréntesis abierto, que exige retornar al

verbo principal. Se puede decir «El hombre saltó», y se puede decir «El hombre que se sentó sobre una aguja saltó», pero no podemos quedarnos en «El hombre que se sentó sobre una aguja», excepto como respuesta a una pregunta o como pie de una figura, en cuyo caso la terminación de la frase está implícita. Los enunciados gramaticales exigen un anidamiento adecuado. De manera similar, gambas, camarones, langostas y cangrejos de río poseen seis segmentos cefálicos, todos ellos fusionados en el extremo anterior, y un segmento especial denominado telson en el posterior. Lo que ocurre en medio es más variable.

Hemos visto un tipo de mutación calidoscópica, la mutación especular reflejada en varios planos de simetría. Las mutaciones «gramaticales» serían calidoscópicas en otro sentido. De nuevo, la mutación permitida está restringida, pero en este caso no por la simetría, sino por reglas tales como: «Con independencia de cuánta variación en el número de artejos se permita en la parte media de la pata, ésta debe terminar en una garra». Ted Kaehler, de la empresa Apple, y yo colaboramos para escribir un programa de ordenador que contuviera reglas de este tipo. Se parece al Relojero Ciego, pero los «animales» que produce se denominan artromorfos, y su embriología incluye reglas ausentes en la embriología de los biomorfos. Los artromorfos son un tren de cuerpos segmentados como los artrópodos reales. Cada segmento consiste en un elemento redondeado, cuya forma y tamaño exactos son controlados por «genes» como los de los biomorfos. Cada segmento puede tener o no una pata articulada a cada lado. También esto es controlado por genes, y lo mismo ocurre con el grosor de la pata, el número de artejos y la longitud y el ángulo de cada artejo. Al final de una pata puede haber o no una garra, y también esto, junto con su forma, está controlado genéticamente.

Si los artromorfos tuvieran la misma clase de embriología que los biomorfos, existiría un gen denominado *Nseg* que determinaría el número de segmentos. *Nseg* tendría simplemente un valor, que podría mutar. Si *Nseg* valiese once, el animal tendría once segmentos. Existiría otro gen denominado *Nart* que determinaría el número de artejos de cada pata. A pesar de lo variables que puedan parecer (y su variedad es mi orgullo y mi alegría), todos los biomorfos del «parque safari» de la figura 1.16 tienen exactamente el mismo número de genes, diez; $j^{\wedge} \setminus J?$ Los biomorfos originales de *El relojero ciego* tenían sólo nueve; $g\acute{u}\acute{u}\acute{a}; \setminus$

➤•• 1)

Los biomorfos coloreados tienen más genes (treinta y seis), y el programa tuvo que reescribirse por entero para acomodarlos. Se trata de tres programas distintos. Los artromorfos no funcionan así. No poseen un repertorio fijo de genes, sino un sistema genético más flexible (los aficionados a la programación son los únicos lectores que desearán saber que los genes de un artromorfo se almacenan en forma de lista enlazada mediante punteros, mientras que los de un biomorfo se almacenan en forma de registro de Pascal fijo). En la evolución de los artromorfos pueden surgir nuevos genes de forma espontánea a partir de la duplicación de genes antiguos. A veces los genes se duplican individualmente, y a veces en grupos estructurados jerárquicamente. Esto significa que, en teoría, un hijo mutante puede poseer el doble de genes que su progenitor. Cuando aparece un nuevo gen, o conjunto de genes, por duplicación los nuevos genes parten con los mismos valores que tenían aquellos a partir de los cuales se duplicaron. La supresión es un tipo posible de mutación, al igual que la duplicación, de modo que el número de genes puede reducirse además de aumentar. Las duplicaciones y las supresiones se manifiestan como cambios en la forma del cuerpo, y por lo tanto se hallan expuestas a la selección (selección artificial a ojo, como en los biomorfos). Con frecuencia, un cambio en el número de genes se manifiesta como un cambio en el número de segmentos (figura 7.12). También puede manifestarse como un cambio en el número de artejos de una pata. En ambos casos, lo que surge es una tendencia «gramatical»: el tren gana o pierde vagones intermedios, pero los vagones anteriores y posteriores permanecen intactos.

La duplicación o supresión de segmentos puede tener lugar en la parte central de un animal, y no únicamente en su extremo; y la duplicación o supresión de artejos puede tener lugar en la parte central de una pata, y no únicamente en su extremo. Esto es lo que confiere a la embriología de los artromorfos su calidad «gramatical»: su capacidad de suprimir, o incorporar, el equivalente de una oración relativa completa, o una oración preposicional, en medio de un «enunciado» mayor. Además de su propiedad de anidamiento «gramatical», los artromorfos poseen un regusto adicional de embriología calidoscópica. Cada detalle cuantitativo del cuerpo de un artromorfo (como el ángulo de una garra determinada, o la anchura del tronco de un segmento dado) está influido por tres genes cuyos valores numéricos se multipli-

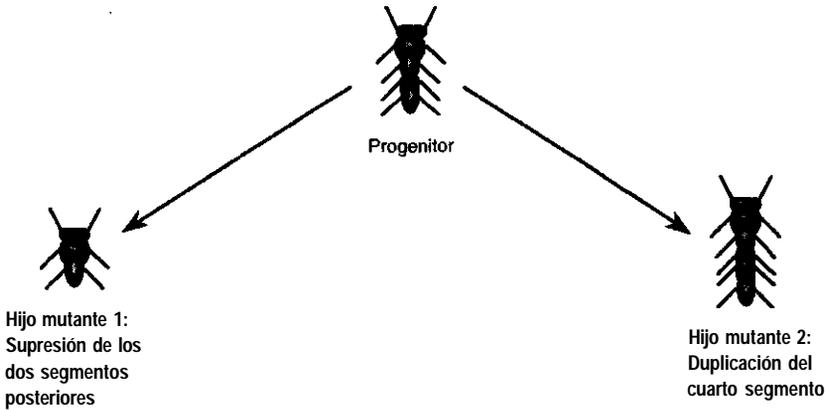


Figura 7.12. Artromorfos que difieren en el número de segmentos. El progenitor (arriba) tiene dos descendientes mutantes.

can de la manera que explicaré a continuación. Existe un gen específico del segmento considerado, un gen que se aplica al animal completo y un gen que se aplica a una subsecuencia de segmentos denominada *tagma*. Tagma es un término biológico. Ejemplos de tagmas en animales reales son el tórax y el abdomen de los insectos.

Para cualquier detalle concreto, como el ángulo de la garra, hay tres genes que lo afectan de manera combinada. En primer lugar está el gen propio del segmento individual. Dicho gen no es calidoscópico en absoluto, porque cuando muta afecta únicamente al segmento en cuestión. La figura 7.13a muestra un artromorfo en el que cada segmento tiene un valor diferente del gen segmentario para el ángulo de la garra. El resultado es que cada segmento tiene un ángulo de garra distinto. Hay que decir también que en todos los artromorfos hay una simetría simple izquierda-derecha.

El segundo de los tres genes que afectaría al ángulo de la garra es el que influye sobre todos los segmentos del animal entero. Cuando muta, las garras de todos los segmentos cambian simultáneamente en toda la longitud del animal. La figura 7.13b muestra un artromorfo que es el mismo que el de la figura 7.13a, excepto en que las garras se han acortado algo. El gen que afecta al tamaño de las garras del animal entero ha mutado a un valor menor. El resultado es que cada una de las garras se reduce, al tiempo que conserva sus peculiaridades segmenta-

rías. Matemáticamente, como dije, este efecto se consigue multiplicando el valor numérico de cada gen individual para el ángulo de la garra al nivel del segmento por el valor numérico del gen para el ángulo de la garra al nivel del cuerpo entero. Obviamente, el ángulo de la garra es sólo uno de los muchos detalles cuantitativos determinados simultáneamente por sumas multiplicativas similares a todo lo largo del «tren». Hay genes de todo el cuerpo que afectan, por ejemplo, a la longitud de la pata, y los valores de éstos se multiplican por los de los genes para la longitud de la pata al nivel del segmento. Las figuras 7.13c y 7.13d muestran artromorfos sin variación entre segmentos, pero que difieren entre sí en el gen para el ángulo de la garra al nivel de todo el organismo.

La tercera clase de genes afecta a una región discreta del cuerpo, un tagma tal como el tórax de un insecto. Mientras que los insectos poseen tres tagmas, los artromorfos evolucionan adquiriendo un número cualquiera de ellos, y cada tagma puede poseer un número cualquiera de segmentos; los cambios tanto en el número de segmentos como en el de tagmas están a su vez sujetos a mutación, al modo «gramatical» que ya hemos comentado. Cada tagma posee un conjunto de genes que afectan a la forma de los segmentos, las patas y las garras dentro del tagma. Por ejemplo, cada tagma tiene un gen que afecta al ángulo de todas las garras en ese tagma. La figura 7.13f muestra un artromorfo con tres tagmas. La mayoría de cosas varía más entre tagmas que dentro de un tagma dado. El efecto se consigue mediante la multiplicación de los valores de los genes, como ya hemos visto para los genes de todo el cuerpo.

Resumiendo, se llega al tamaño final de cada atributo, en este caso el ángulo de la garra, multiplicando los valores numéricos de los tres genes: el gen del segmento para el ángulo de la garra, el gen del tagma para el ángulo de la garra y el gen de todo el organismo para el ángulo de la garra. Puesto que la multiplicación por cero da cero, si el valor de un gen para, digamos, el tamaño de la pata en un tagma dado fuera cero, los segmentos de dicho tagma carecerían de patas (como los segmentos abdominales de una avispa) con independencia de los valores de los genes a los otros dos niveles. La figura 7.13g muestra un hijo del artromorfo de la figura 7.13f, en el que ha mutado un gen para el tamaño de las patas al nivel del tercer tagma. La figura 7.13h es otro hijo

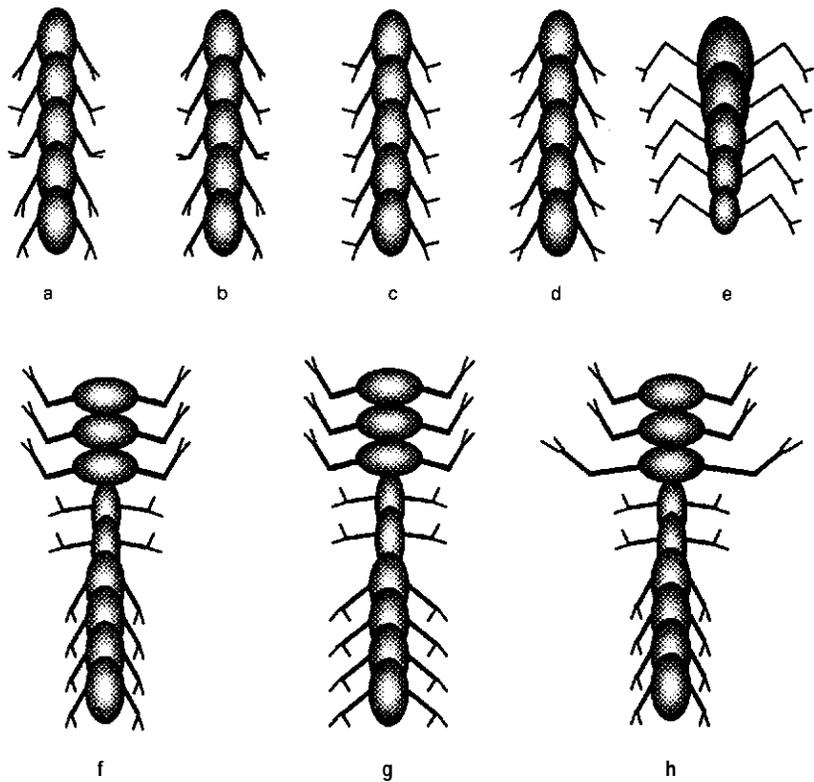


Figura 7.13. Artromorfos elegidos para ilustrar varios tipos de efecto genético:
a) artromorfo con un gen para el ángulo de las garras distinto para cada segmento;
b) mutación del gen para el ángulo de las garras a nivel de todo el cuerpo;
c) artromorfo sin variación entre segmentos;
d) igual que *c)*, pero con una única mutación que afecta al gen para el ángulo de las garras a nivel de todo el cuerpo;
e) gradiente de tamaños de los segmentos, que no afecta a las patas;
f) artromorfo con tres tagmas, que difieren en varias características pero uniformes dentro de cada tagma;
g) igual que *f)*, pero con una mutación que afecta a las patas al nivel del (tercer) tagma;
h) mutación *de/* que afecta a las patas de un único segmento.

del artromorfo de la figura 7.13f, pero en este caso sólo ha mutado un gen segmentario.

Así pues, los artromorfos poseen una especie de embriología calidoscópica a tres niveles. Pueden mutar dentro de un segmento, en cuyo

caso el cambio se refleja sólo una vez, en el lado opuesto del cuerpo. También son calidoscópicos al nivel del «ciempiés», es decir, del organismo entero: una mutación a este nivel se repite espacialmente a lo largo de los segmentos del cuerpo (junto con su imagen especular izquierda-derecha). Y también son calidoscópicos al nivel intermedio, de «insecto» o tagma: una mutación a este nivel afecta a todos los segmentos de un grupo local, pero no a los del resto del cuerpo. Sospecho que, si los artromorfos tuvieran que ganarse la vida en el mundo real, sus mutaciones calidoscópicas a tres niveles podrían ser beneficiosas, por el mismo tipo de razones de economía evolutiva, como ya hemos comentado en el caso de los espejos de simetría. Si, pongamos por caso, las extremidades del tagma central del cuerpo funcionan como patas marchadoras, mientras que las extremidades del tagma posterior funcionan como branquias, tiene sentido que las mejoras evolutivas deban repetirse serialmente a lo largo de los segmentos de un tagma pero no del otro: es poco probable que las mejoras en los apéndices marchadores sean beneficiosas para los apéndices respiratorios. De ahí que pueda ser ventajoso poseer una clase de mutaciones que, cuando aparecen por primera vez, se reflejan ya en todos los segmentos de un tagma. Por otra parte, pueden obtenerse beneficios concretos efectuando ajustes detallados, especializaciones, en las extremidades de segmentos concretos, en cuyo caso se verían favorecidas las embriologías que tengan una tendencia adicional a producir mutaciones que únicamente sean imágenes especulares izquierda-derecha. Finalmente, a veces puede ser beneficioso que una mutación se extienda simultáneamente a todos los segmentos del cuerpo, sin anular completamente la variación existente entre segmentos y entre tagmas, pero reforzándola, por ejemplo, mediante multiplicación.

Como una idea posterior inspirada en la biología, Ted Kaehler y yo introdujimos genes de «gradiente» en nuestro programa de artromorfos. Un gen de gradiente hace que una determinada cualidad de un artromorfo, tal como el ángulo de la garra, no esté fijada cuando nos desplazamos de la parte anterior a la posterior del animal, sino que aumente (o disminuya) progresivamente. La figura 7.13e muestra un artromorfo sin variación entre segmentos, aparte de un gradiente (negativo) del tamaño de los segmentos. El cuerpo se estrecha a lo largo del eje anteroposterior.

Los artromorfos se reproducen y evolucionan mediante selección artificial, de la misma manera general que los biomorfos. Un artromorfo progenitor se sitúa en el centro de la pantalla, rodeado por sus descendientes mutados aleatoriamente. Como en el caso de los biomorfos, el selector humano no ve los genes, sólo sus consecuencias (formas corporales), y elige aquellos que se reproducirán (una vez más, sin sexo). El artromorfo elegido se traslada al centro de la pantalla y se rodea de su progenie mutante. A medida que pasan las generaciones tienen lugar entre bastidores cambios en el número de genes y cambios en los valores de los mismos mediante mutación al azar. Todo lo que ve el seleccionador humano es una secuencia de artromorfos que evoluciona gradualmente. Así como puede decirse que todos los biomorfos se han generado a partir de , se puede decir que todos los artromorfos se han generado a partir de . El lindo sombreado de los segmentos corporales para darles relieve es un toque estético que no varía en el programa existente, aunque fácilmente se podría poner bajo control genético (en los tres niveles indicados) en futuras versiones. La figura 7.14 es un zoo de artromorfos, comparable al parque safari de biomorfos de la figura 1.16, que he criado a ratos mediante selección artificial, por lo general favoreciendo algún tipo de realismo biológico.

Este zoo incluye formas que varían a todos los niveles de la embriología calidoscópica. Es posible reconocer criaturas de cuerpo ahusado, que tienen al menos un gen de gradiente. Se pueden reconocer divisiones tajantes entre tagmas: grupos de segmentos vecinos se parecen entre sí más que al resto de segmentos. Pero todavía es posible reconocer alguna variación en la forma incluso entre los segmentos de un tagma. Los insectos, los crustáceos y las arañas reales varían de manera calidoscópica similar, a distintos niveles. Son especialmente reveladoras las denominadas mutaciones homeóticas de los artrópodos reales, mutaciones que hacen que un segmento cambie de modo que siga la pauta de desarrollo normal para un segmento diferente.

La figura 7.15 muestra ejemplos de mutaciones homeóticas en la mosca del vinagre *Drosophila* y en el gusano de seda. La *Drosophila* normal, como todas las moscas, tiene un solo par de alas. El segundo par está sustituido por halterios, como se explicó anteriormente. La ilustración muestra una *Drosophila* mutante en la que no sólo hay un

segundo par de alas en lugar de halterios, sino que el tercer segmento torácico al completo está sustituido por un segundo segmento torácico reduplicado. En los artromorfos, este efecto se conseguiría mediante una duplicación «gramatical» seguida de supresión. La figura 7.15b muestra un gusano de seda mutante. Las orugas normales poseen tres patas articuladas «distintivas», como cualquier otro insecto, aunque, como dije, sus segmentos posteriores presentan patas más blandas, «reinventadas». Pero la oruga mutante de la parte inferior de la figura 7.15b tiene nueve pares de patas articuladas «distintivas». Lo que ha ocurrido es que los segmentos del tagma torácico se han duplicado (como en el artromorfo de la derecha de la figura 7.12). La más famosa mutación homeótica es *antennapedia*, de *Drosophila*. Las moscas con esta mutación poseen una pata de aspecto normal que surge de la cuenca en que debiera haber una antena. La maquinaria productora de patas se ha puesto en marcha en el segmento equivocado.

Tales mutantes son absolutamente monstruosos y es muy poco probable que sobrevivan en la naturaleza, lo cual es otra manera de decir que es poco probable que la evolución incorpore mutaciones homeóticas. Por ello reaccioné tardíamente cuando pasé (bastante deprisa, porque soy muy remilgado para la comida) junto a una mesa abarrotada de mariscos patilargos en un banquete en Australia. El animal que atrajo mi atención es conocido por los *gourmets* australianos como «chinche de aguas profundas». Es una especie de langosta, miembro de un grupo que recibe nombres variados: zapatillas, langostas españolas, cigarras de mar o santiaguíños. La figura 7.16 muestra un ejemplar típico, tomado del Museo de Oxford, perteneciente al género *Scyllarus*. Lo que me sorprende de estos animales es que parecen tener dos extremos posteriores. La ilusión procede del hecho de que las antenas de la parte anterior (estrictamente, el segundo par de antenas) tienen el mismo aspecto que los apéndices denominados urópodos, que son el rasgo más prominente del extremo posterior de cualquier langosta. No sé por qué razón las antenas tienen esta forma. Puede que sean utilizadas como palas, o puede que los depredadores resulten engañados por la misma ilusión que me sorprendió a mí. Las langostas tienen un reflejo de huida rapidísimo, que hace uso de una neurona gigante al efecto. Cuando se ven amenazadas, salen disparadas hacia atrás con una velocidad asombrosa. Un depredador podría anticipar este reflejo apuntando detrás de la posición

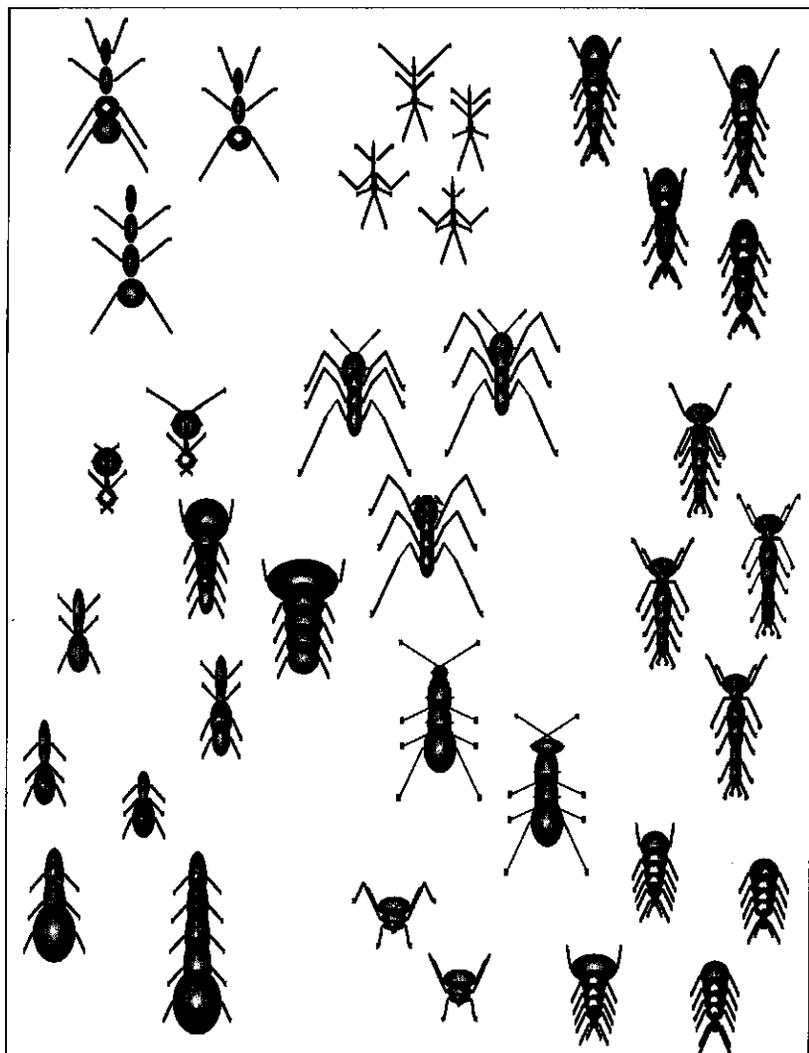
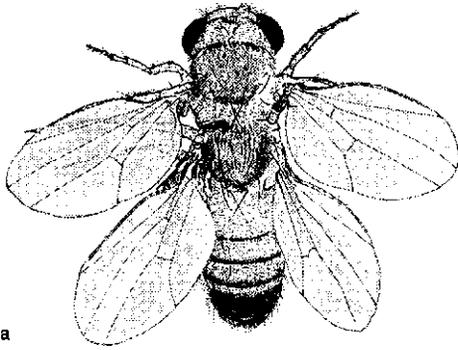
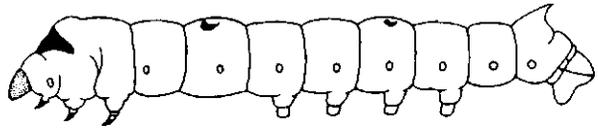


Figura 7.14. Zoo de artromorfos. Colección de artromorfos generados mediante selección artificial sobre la base de su parecido, por vago que fuera, con artrópodos reales.



a



b

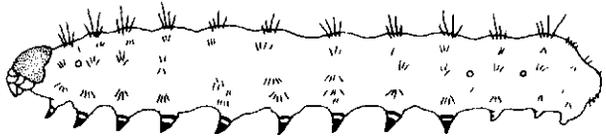


Figura 7.15. Mutaciones homeóticas: a) *Drosophila* con cuatro alas. En las *Drosophila* normales el segundo par de alas está sustituido por halterios, como en la Figura 7.11; b) gusano de seda normal (arriba) y mutante (abajo). Normalmente sólo hay patas típicas de insecto en los tres segmentos torácicos. El mutante tiene nueve segmentos «torácicos».

actual de la langosta. Esto funcionaría con una langosta ordinaria, pero con *Scyllarus* el «detrás» aparente resultaría ser la parte delantera, de manera que el depredador que se pasara de listo saltaría precisamente hacia el sitio equivocado. Está o no justificada esta especulación,* estas langostas obtienen presumiblemente algún beneficio de sus antenas extrañamente conformadas. Sea cual sea dicho beneficio, aprovecharé estos animales para una especulación todavía más aventurada. Mi sugere-

* No debe olvidarse que estos animales, que viven sobre paredes rocosas del litoral marino, son difíciles de advertir por el color oscuro del caparazón y por el hecho de que sus bordes se aplican sobre el sustrato. Si en otros decápodos las antenas enhiestas y alargadas delatan su presencia, *Scyllarus* y otros géneros afines han eliminado estos órganos vistosos y comprometedores y tienen una estructura plana que disimula la silueta típica de una cabeza de langosta. Por otro lado, la especie es un manjar exquisito cuya explotación para el consumo la ha puesto en peligro en muchos mares del mundo. (*N. del T.*)

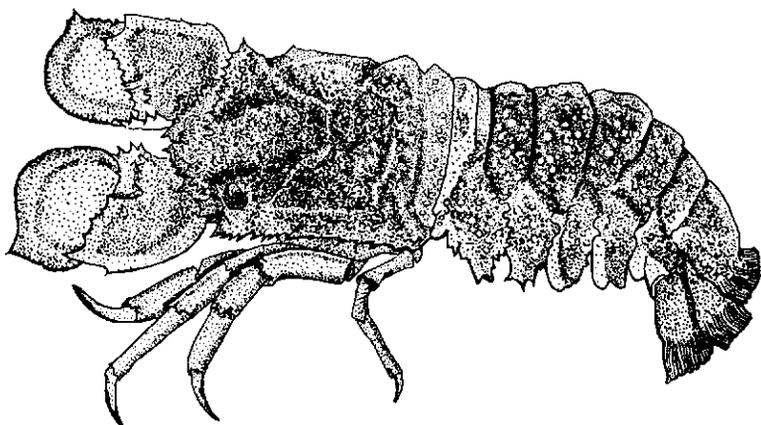


Figura 7.16. ¿Podría este animal representar un mutante homeótico que ha tenido éxito evolutivo en la naturaleza? *Scyllarus*, la cigarra de mar o santiaguíño.

rencia es que *Scyllarus* podría muy bien ser un caso natural de mutación homeótica. A diferencia de *antennapedia*, que es una mutación de laboratorio, esta mutación se ha incorporado a un cambio evolutivo real en la naturaleza. Mi conjetura es que un escilárido ancestral mutó homeóticamente, trasladando la subrutina de desarrollo apropiada para un urópodo a un segmento en el que debiera haber una antena, y que el cambio supuso un cierto beneficio. Si estoy en lo cierto, ello constituiría un raro ejemplo de macromutación favorecida por la selección natural, una rara vindicación de la llamada teoría del «monstruo prometedor» que vimos en el capítulo 3.

Todo esto es muy especulativo. Es indudable que las mutaciones homeóticas tienen lugar en el laboratorio, y los embriólogos recurren a su inspiración para formarse una imagen detallada de los procesos de desarrollo del plan corporal segmentado de los artrópodos. Por fascinantes que sean estos detalles, se encuentran fuera del dominio de este capítulo. Concluiré invitando al lector a contemplar algunos artrópodos reales a la luz de los artromorfos y de sus mutaciones calidoscópicas a tres niveles.

Observemos los artrópodos reales de la figura 7.17 e imaginemos de qué modo pudo haber evolucionado su forma a través de genes calidoscópicos de tipo artromorfo. ¿Tiene alguno de ellos, por ejemplo, la

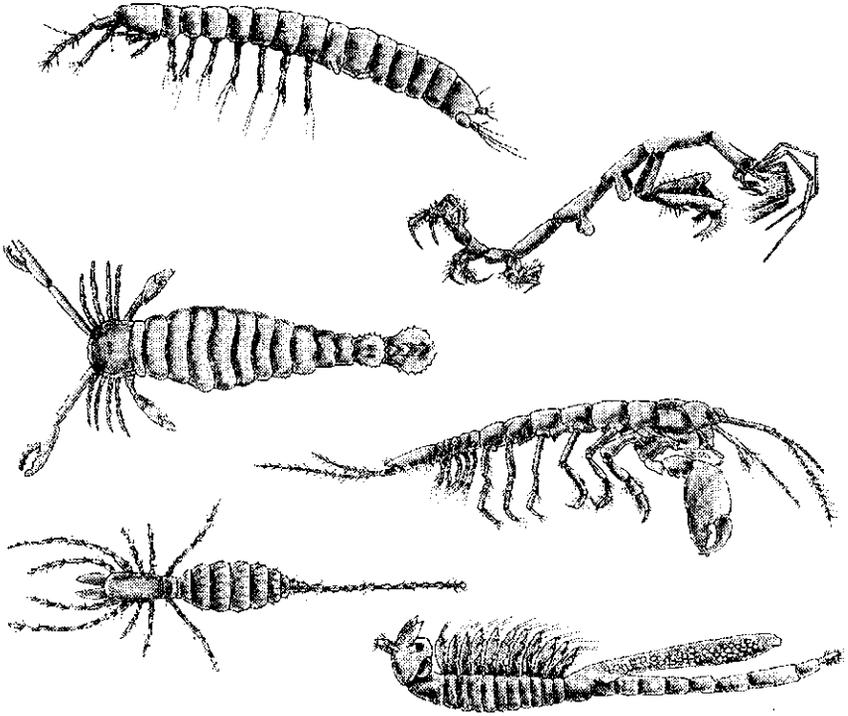


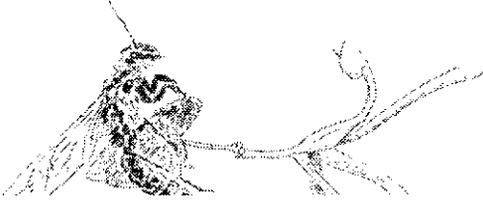
Figura 7.17. Lo que puede hacerse con los segmentos: una muestra de artrópodos. En el sentido de las agujas del reloj, desde la parte superior izquierda: cuatro crustáceos, un palmyrido (pariente lejano de arañas y escorpiones) y un euriptérico («escorpión marino» gigante, extinguido, que podía alcanzar fácilmente cerca de tres metros de longitud).

forma ahusada que vimos en la figura 7.13e? Ahora, observando otra vez los artrópodos reales, imaginemos una mutación que cambia algún pequeño detalle de los extremos de las patas, o algún detalle de la forma de la región troncal de los segmentos. Supongamos primero que la mutación imaginada se aplica a un único segmento. Adivino que, de forma automática, el lector la ha imaginado reflejada a la vez en los lados derecho e izquierdo, pero esto no es obligatorio. Es, en sí mismo, un ejemplo de embriología calidoscópica. Pensemos ahora en una mutación que afecte los extremos de las patas, pero esta vez a las patas de una secuencia de segmentos adyacentes. Los animales de la figura 7.17 muestran varios ejemplos de secuencias de segmentos adyacentes que se parecen entre sí. En tercer lugar, pensemos en una mutación similar

pero que afecte a los extremos de las patas de todos los segmentos del cuerpo (es decir, de todos los segmentos que tienen patas). Advierto que la experiencia de pensar en los artromorfos y en su embriología calidoscópica a tres niveles me hace contemplar los artrópodos reales con otros ojos. Además, como en el caso de los espejos de simetría, es fácil imaginar que las embriologías con «restricciones» calidoscópicas del tipo de los artromorfos pueden resultar, paradójicamente, más ricas en potencial evolutivo que embriologías más laxas y no restringidas. Me parece que las formas de la figura 7.17 y las de incontables artrópodos no ilustrados aquí tienen un sentido especial a la luz de esta forma de razonamiento.

El mensaje central de este capítulo es que las embriologías calidoscópicas, ya operen a través de segmentos y grupos de segmentos a lo largo del eje anteroposterior como en un insecto, ya a través de «espejos» de simetría como en una medusa, son a la vez, y paradójicamente, restrictivas e intensificadoras. Restringen la evolución en el sentido de que limitan la gama de variaciones disponibles sobre las que opera la selección. La intensifican en el sentido de que (para expresarlo en un lenguaje que personifique la selección de forma perdonable) le ahorran a la selección natural la pérdida de tiempo que supondría explorar vastas regiones del espacio de posibilidades que, de todas maneras, no iban a reportar nada. El mundo está poblado por grupos principales de animales (artrópodos, moluscos, equinodermos, vertebrados) cada uno de los cuales tiene una embriología restringida calidoscópicamente que ha resultado ser fructífera en términos evolutivos. Las embriologías calidoscópicas tienen lo que se necesita para heredar la Tierra. Siempre que un cambio importante en el modo o «espejo» calidoscópico genere una radiación evolutiva próspera, este nuevo modo será heredado por todos los linajes de esa radiación. Esto no es selección darwiniana ordinaria, sino que es una especie de analogía de alto nivel de la selección darwiniana. No es excesivamente fantástico sugerir que, como consecuencia, ha habido una evolución de evolucionabilidad mejorada.

Granos de polen y balas mágicas



Viajaba yo en automóvil por la caihiña inglesa con mi hija Juliet, que entonces tenía seis años, y me señaló algunas flores al borde de la carretera. Le pregunté para qué pensaba ella que eran las flores silvestres. Me dio una respuesta bastante meditada. «Para dos cosas», me dijo. «Para hacer el mundo bonito y para ayudar a las abejas a que hagan miel para nosotros.» Esto me emocionó, y lamenté tener que decirle que no era cierto.

La respuesta de mi hijita no era demasiado distinta a la que hubiera dado la mayoría de adultos a lo largo de la historia. La creencia de que la creación natural está aquí para nuestro beneficio es muy antigua. El primer capítulo del Génesis la expresa explícitamente. El hombre «dominará» sobre todos los seres vivos, y animales y plantas están aquí para deleite y uso nuestro. Como documenta el historiador Sir Keith Thomas en su *Man and the Natural World* (El hombre y el mundo natural), esta actitud impregnó la Cristiandad medieval y ha persistido hasta nuestros días. En el siglo xix, el reverendo William Kirby pensaba que el piojo era un incentivo indispensable para la limpieza. Las bestias salvajes, según el obispo isabelino James Pilkington, alentaban la valentía de los hombres y proporcionaban un entrenamiento útil para la guerra. Los tábanos, según un escritor del siglo xviii, fueron creados «con el fin de que los hombres ejerciten su ingenio e industria para librarse de ellos». Las langostas estaban dotadas de un duro caparazón para que, antes de comerlas, pudiéramos beneficiarnos del ejercicio de romper sus pinzas. Otro piadoso escritor medieval pensaba que las malas hierbas estaban aquí para nuestro provecho: es bueno para nuestro espíritu tener que trabajar duro para arrancarlas.

De los animales se ha pensado que tenían el privilegio de compartir nuestro castigo por el pecado de Adán. Keith Thomas cita al respecto a un obispo del siglo xviii: «Cualquier cambio a peor que les haya afee-

tado no ha sido castigo suyo, sino una parte del nuestro». Uno siente que esto debiera ser un gran consuelo para ellos. En 1653, Henry More creía que vacas y ovejas habían recibido la vida, sólo y ante todo, para que su carne estuviera fresca «hasta que tengamos necesidad de comerla». La conclusión lógica de esta línea de pensamiento es que, en realidad, los animales anhelan ser comidos.

El faisán, la perdiz y la alondra
Volaron a tu casa, como si fuera el Arca.
El buey voluntarioso vino por sí mismo
A casa para el sacrificio, con el cordero;
Y todas las bestias de más allá vinieron
A ofrecerse como presente.*

En *The Restaurant at the End of the Universe* (El restaurante del fin del universo) —parte de la brillante saga *Hitchhiker's Guide to the Galaxy* (Guía de la galaxia para autostopistas)—, Douglas Adams elaboró una conclusión futurista y grotesca a partir de esta presunción. Cuando el héroe y sus amigos se sientan en el restaurante, un gran cuadrúpedo se les acerca obsequioso a la mesa y en tonos agradables y cultivados se ofrece como plato del día. Explica que su raza ha sido criada para desear ser comida, junto con la capacidad de expresar ese anhelo de manera inequívoca: «¿Quizá algo del lomo... braseado en una salsa de vino blanco?... O la cadera, que está muy buena... La he estado ejercitando y he comido mucho grano, de modo que hay cantidad de buena carne aquí». Arthur Dent, el menos galácticamente refinado de los comensales, se siente horrorizado, pero los restantes miembros del grupo piden grandes filetes para todos y, agradecido, el manso animal se va trotando a la cocina para matarse (humanitariamente, añade, con un guiño tranquilizador hacia Arthur).

El relato de Douglas Adams es una comedia manifiesta, pero estoy sinceramente convencido de que la siguiente argumentación sobre el plátano, citada literalmente de un opúsculo actual amablemente remitido por uno de mis muchos corresponsales creacionistas, va en serio.

* *The pheasant, partridge and the lark / Flew to thy house, as to the Ark. / The willing ox of himself carne / Home to the slaughter, with the lamb; And every beast did thither bring / Himselfto be an offering.*

Adviértase que el plátano:

- 1. Tiene la forma adecuada para la mano humana**
- 2. Tiene una superficie antideslizante**
- 3. Posee indicadores externos de los contenidos internos: verde, demasiado pronto; amarillo, al punto; negro, demasiado tarde**
- 4. Tiene una lengüeta para quitar el envoltorio**
- 5. Está picado en el envoltorio**
- 6. Tiene un envoltorio biodegradable**
- 7. Tiene la forma adecuada para la boca**
- 8. Tiene una punta en la parte superior para facilitar la entrada**
- 9. Resulta agradable a las papilas gustativas**
- 10. Está curvado hacia la cara para facilitar el proceso de comerlo.**

La actitud de que los seres vivos han sido colocados aquí para nuestro provecho domina todavía nuestra cultura, aun cuando sus fundamentos hayan desaparecido. A efectos científicos, necesitamos una concepción menos antropocéntrica del mundo natural. Si puede decirse que los animales salvajes y las plantas silvestres han sido colocados en el mundo con algún propósito (y se puede, en virtud de una respetable figura retórica), seguramente no es para provecho de los seres humanos. Tenemos que aprender a ver las cosas con ojos no humanos. En el caso de las flores con las que hemos comenzado nuestra exposición, es más sensato, al menos marginalmente, contemplarlas con los ojos de las abejas y demás animales que las polinizan.

Toda la vida de las abejas gira alrededor del mundo lleno de colorido, aromático y rezumante de néctar de las flores. No estoy hablando únicamente de las abejas melíferas, porque hay miles de especies distintas de abejas, y todas ellas dependen absolutamente de las flores. Sus larvas son alimentadas con polen, mientras que el combustible exclusivo para los motores de vuelo de los adultos es el néctar, que también les es proporcionado enteramente por las flores. He escrito «les es proporcionado» no sin cierta intención. Estrictamente hablando, no se puede decir que las flores proporcionen polen a las abejas, porque la planta lo fabrica principalmente para sus propios fines. A las abejas se les permite comer algo de polen porque ofrecen un servicio muy valioso al trasladarlo de una flor a otra. Pero el néctar es un caso más extremo. No tiene ninguna otra *raison d'être* que alimentar a las abejas.

El néctar se fabrica, en grandes cantidades, sólo para sobornar a las abejas y otros polinizadores. Las abejas trabajan duro para obtener su recompensa de néctar. Para producir un kilogramo de miel de trébol, las abejas deben visitar alrededor de veinticinco millones de flores.

«Las flores», podrían decir las abejas, «están aquí para proporcionarnos polen y néctar.» También las abejas se equivocarían en eso, pero estarían mucho más en lo cierto que nosotros. Hasta podríamos decir que las flores, al menos las más hermosas y vistosas, son hermosas y vistosas porque han sido «cultivadas» por abejas, mariposas, colibríes y otros polinizadores. La conferencia en la que se basa este capítulo llevaba originalmente por título «El jardín ultravioleta». Se trata de una parábola. La radiación ultravioleta es un tipo de luz que no podemos ver. Las abejas sí pueden, y la ven como un color distinto, a veces llamado púrpura de abeja. Es seguro que a los ojos de las abejas las flores tienen un aspecto muy distinto (figura 8.1). Del mismo modo, es mejor examinar la pregunta «¿Para qué sirven las flores?» a través de los ojos de las abejas y no de los nuestros.

«El jardín ultravioleta» utiliza la peculiar visión de las abejas sólo a modo de parábola para cambiar nuestro punto de vista acerca de para quién o para qué «sirven» las flores (y todos los demás seres vivos). Si las flores tuvieran ojos, su visión del mundo sería para nosotros todavía más extraña que la extraña visión ultravioleta de las abejas. ¿Qué aspecto tendrían las abejas a los ojos de las plantas? ¿Para qué sirven las *abejas*, desde el punto de vista de las flores? Son misiles dirigidos para lanzar polen de una flor a otra. El trasfondo de todo esto necesita una explicación.

En primer lugar, y por regla general, hay buenas razones genéticas para preferir la fecundación cruzada mediante polen procedente de una planta distinta. La autofecundación incestuosa haría que se perdiesen las ventajas de la reproducción sexual (sean cuales fueren, lo que en sí mismo es una cuestión interesante). Un árbol que polinizara sus flores femeninas con polen de sus propias flores masculinas casi no tendría que preocuparse de polinizar en absoluto. Le resultaría más eficaz producir un clon vegetativo de sí mismo. Muchas plantas hacen justamente esto, y este comportamiento tiene algunos puntos a su favor. Pero, como hemos visto, hay también condiciones en las que barajar los propios genes con los de otro individuo tiene aún más puntos a fa-

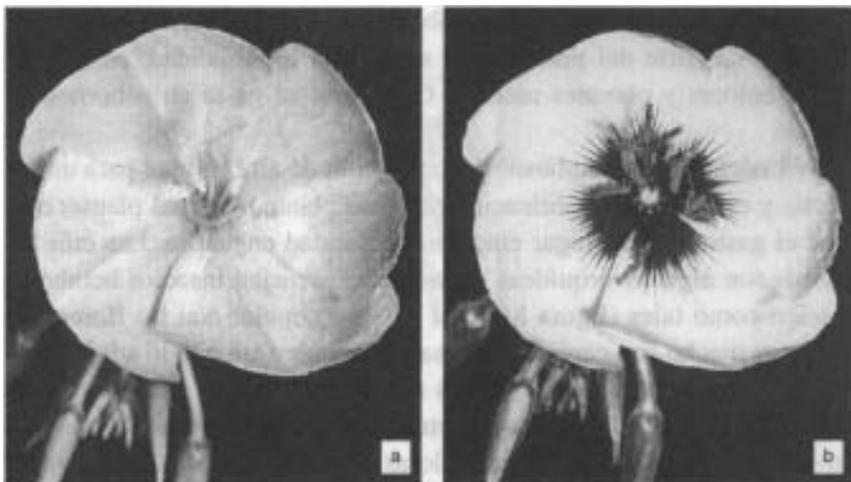


Figura 8.1. a) Flor de hierba del asno, *Oenothera*, fotografiada utilizando luz visible (por los seres humanos); b) la misma, fotografiada mediante luz ultravioleta (que los insectos pueden ver pero nosotros no), para mostrar el diseño estrellado del centro. Presumiblemente este diseño ayuda a guiar a los insectos hacia el néctar y el polen.

vor. Haría falta una larga digresión para explicar esto en detalle, pero para jugar a la ruleta sexual tiene que haber beneficios sustanciales, de otro modo la selección natural no habría permitido que ésta fuese un anhelo tan obsesivo en casi toda la vida animal y vegetal. Sean cuales fueren estos beneficios, desaparecerían en su mayor parte si, en lugar de barajar los genes propios con los de otro individuo, uno simplemente los barajara con un segundo juego, idéntico, de los genes propios.

Las flores no tienen otro papel en la vida de su planta que el de intercambiar genes con otra planta que tenga un juego de genes distinto. Algunas plantas, como las gramíneas, se valen del viento. El aire se inunda de polen, una minúscula proporción del cual tiene la suerte de ser arrastrado hasta los órganos femeninos de una flor de la misma especie (otra proporción es arrastrada hasta los ojos y narices de los que padecen fiebre del heno). Este método de polinización es fortuito y, según como se mire, derrochador. Suele ser más eficiente explotar las alas y músculos de los insectos (o de otros vectores, tales como murciélagos y colibríes). Esta técnica dirige el polen mucho más directamente a su objetivo y, en consecuencia, requiere mucho menos polen.

Para atraer a los insectos, sin embargo, hay que hacer algún desembolso. Una parte del presupuesto se destina a publicidad: pétalos de vivos colores y potentes aromas. Otra parte se gasta en sobornos de néctar.

El néctar es un combustible de aviación de alta calidad para un insecto, y es de costosa fabricación para una planta. Algunas plantas eluden el gasto y en su lugar emplean publicidad engañosa. Las más famosas son algunas orquídeas cuyas flores semejan insectos hembra y huelen como tales (figura 8.2). Al intentar copular con las flores, los insectos macho son cargados con sacos de polen sin que lo adviertan o bien, si la flor es femenina, se les aligera de su carga. Hay orquídeas especializadas en imitar abejas, otras que imitan moscas y otras que imitan avispas. Una de las imitadoras de avispas, que recibe el adecuado nombre de orquídea martillo, sostiene su señuelo en el extremo de un pedúculo articulado y armado con un resorte, amartillado a una distancia fija lejos de la parte de la flor que porta el polen (figura 8.3). Cuando la avispa macho se posa sobre la hembra de mentira el muelle se suelta. La avispa macho es golpeada, de manera violenta y repetida, contra el yunque en el que se encuentran los sacos polínicos. Para cuando la avispa macho logra liberarse, su dorso está cargado con dos sacos de polen.

Tanto o más ingeniosa es la llamada orquídea de balde, que funciona un poco como una planta carnívora con ascidios, pero con una diferencia importante. La flor contiene una gran charca de líquido que huele como el seductor perfume sexual que secretan las hembras de una especie concreta de abeja. Los machos de dicha especie son atraídos por el líquido y caen en él. La única escapatoria para no ahogarse es a través de un estrecho túnel. La abeja que se debate acaba descubriéndolo y se arrastra por él hasta la salvación. En el extremo opuesto del tubo hay un paso complicado en el que queda atrapada durante unos cuantos minutos antes de poder escabullirse. Durante este forcejeo final en el portal del túnel, dos sacos de polen grandes y redondos son hábilmente transferidos a su dorso. Después la abeja sale volando y (quizá más triste, pero no más sabia) cae en otra orquídea de balde. De nuevo se debate en el líquido, de nuevo se abre camino penosamente a través del túnel de salida y de nuevo es retenida durante un tiempo antes de salir hacia la libertad. Durante este periodo la segunda

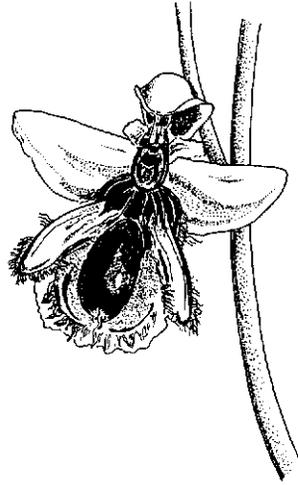
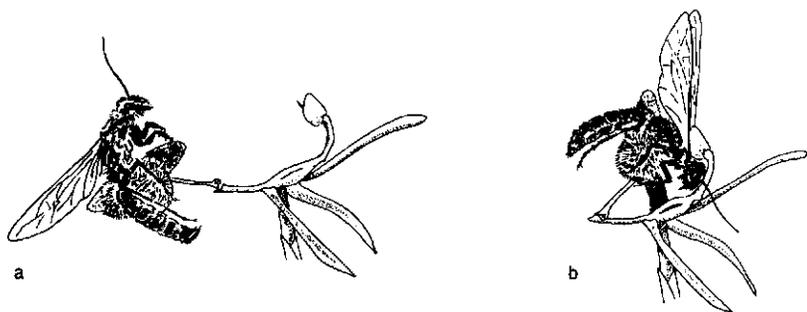


Figura 8.2. Una orquídea que imita un insecto. Orquídea ibérica, *Ophrys vernixia*.

orquídea la despoja de los sacos de polen y se completa la polinización.

No haga caso el lector de este «más triste, pero no más sabia». Como siempre, hay que resistir la tentación de atribuir intenciones conscientes. En todo caso, habría que atribuírselas a la planta. La manera correcta de pensar es en términos de maquinaria construida inconscientemente. El polen que contiene los genes para construir orquídeas de balde que manipulan abejas es transportado por abejas. El polen que contiene genes que dan lugar a orquídeas menos competentes en la manipulación de abejas tiene menos probabilidades de ser transportado por abejas. Así, a medida que pasan las generaciones, las orquídeas mejoran en el arte de manipular abejas (aunque, en honor a la verdad, hay que decir que, en la práctica, las orquídeas abejeras no tienen un éxito espectacular a la hora de engañar a las abejas para que copulen con ellas).

Estas sorprendentes orquídeas ejemplifican un aspecto importante de la estrategia de polinización. Muchas flores parecen poner todo su empeño en ser polinizadas por una especie determinada de animal y por ninguna otra. En los trópicos del Nuevo Mundo, las flores rojas y tubulares son indicativas de una polinización por colibríes. El rojo es un color vivo y atractivo a los ojos de las aves (los insectos no pueden



b) la articulación se pandea, haciendo golpear repetidamente el dorso de la avispa contra los polinios.

ver el color rojo en absoluto). Los tubos largos y estrechos excluyen a cualquier polinizador que no esté provisto de un pico largo y fino como el de los colibríes. Otras flores se esfuerzan en ser polinizadas sólo por abejas, y ya hemos señalado que sus flores suelen tener colores y dibujos en la parte ultravioleta del espectro, invisible para nosotros. Pero otras sólo son polinizadas por mariposas nocturnas. Suelen ser blancas, y utilizan perfumes antes que anuncios visibles. La culminación de la progresión hacia un consorcio de polinización exclusiva quizá sea el dúo, ajustado como anillo al dedo, de las higueras y sus avispas específicas, el ejemplo que abre y cierra nuestro libro. Ahora bien, ¿por qué deberían ser tan exigentes las plantas en cuanto a quién las poliniza?

Presumiblemente, la ventaja de cultivar polinizadores especialistas es una versión extrema de la ventaja de poseer polinizadores animales en lugar del viento. La polinización por el viento es de lo más extravagante y derrochadora, al bañar toda la campiña en una lluvia de polen. La polinización por animales voladores inespecíficos es mejor, pero sigue siendo muy derrochadora. La abeja que visita nuestra flor puede irse luego volando a la flor de una especie completamente diferente y habremos malgastado nuestro polen. El polen que transportan las abejas ordinarias no se desparrama por el campo como el de una hierba polinizada por el viento, pero todavía se reparte de una manera relativamente indiscriminada. Compárese esto con la abeja específica de la orquídea de balde, o con la avispa específica de la higuera. El insecto

vuela certeramente, como un minúsculo misil dirigido, o como lo que los periodistas médicos denominan una «bala mágica», hacia el blanco correcto desde el punto de vista de la planta cuyo polen transporta. En el caso de la avispa de los higos esto significa, como veremos, no ya otra higuera, sino otra higuera de la misma especie, de entre las 900 que existen. El empleo de polinizadores especialistas debe suponer un ahorro enorme en la producción de polen. Por otra parte, como también veremos, tiene costes añadidos, por lo que no es sorprendente que algunas plantas se vean abocadas, por su modo de vida, a mantener la derrochadora polinización por el viento. Otras especies de plantas se adaptan más a una técnica intermedia en el espectro que va del cañón de dispersión a la bala mágica. Los higos quizá sean el colmo de la dependencia de una especie polinizadora particular, y los reservaremos para nuestro climax en el capítulo final.

Volviendo a las abejas, los servicios de polinización que ofrecen son realmente impresionantes. Se ha calculado que, sólo en Alemania, las abejas melíferas polinizan alrededor de diez trillones de flores en el curso de un único día de verano. Se ha estimado asimismo que el 30% de todos los alimentos humanos derivan de plantas polinizadas por abejas, y que la economía de Nueva Zelanda se desplomaría si se eliminaran las abejas. Las abejas, podrían decir las flores, han sido puestas en el mundo para transportar nuestro polen para nosotras.

Así, pues, aunque pueda parecer que las flores coloreadas y fragantes del mundo hayan sido puestas aquí para nuestro provecho, es evidente que no es así. Las flores viven en un jardín de insectos, un misterioso jardín ultravioleta en el que, pese a todas nuestras vanidades, nosotros somos irrelevantes. Siempre se han cultivado y se han domesticado flores, pero, hasta tiempos muy recientes, los jardineros eran abejas y mariposas, no nosotros. Las flores usan a las abejas y las abejas usan a las flores. Cada una de las partes del consorcio ha sido conformada por la otra. Cada una de las partes ha sido en cierto modo domesticada y cultivada por la otra. El jardín ultravioleta es un jardín de doble uso. Las abejas cultivan flores para sus fines, y las flores domestican abejas para los suyos.

Consortios como éstos son bastante corrientes en la evolución. Existen los llamados jardines de hormigas, formados por epífitos (plantas que crecen sobre la superficie de otras plantas) que las hormigas

siembran enterrando en el suelo de sus nidos las semillas adecuadas. Las plantas crecen sobre la superficie del nido y sus hojas proporcionan comida a las hormigas. Se ha demostrado que algunas plantas crecen mejor si sus raíces se encuentran dentro de un hormiguero. Otras especies de hormigas y termites se especializan en cultivar hongos bajo tierra, plantando las esporas, escardando los jardines para eliminar las especies competidoras y fertilizándolos con estiércol compostado a partir de hojas masticadas. En el caso de las famosas hormigas cortadoras de hojas [del género *Atta*] de los trópicos del Nuevo Mundo, todo el esfuerzo de forrajeo de sus colonias (que cuentan con hasta ocho millones de individuos) se dirigen a la recolección de hojas recién cortadas. Pueden devastar una zona con una despiadada eficiencia que recuerda la de una plaga de langostas, pero las hojas que cortan no serán devoradas por las hormigas ni por sus larvas, sino que se recogen simplemente para fertilizar los jardines de hongos. Las hormigas comen únicamente los hongos, pertenecientes a una especie que sólo crece en los hormigueros de este género de hormigas. Estos hongos podrían decir que las hormigas están allí para cultivarlos a ellos, y las hormigas podrían decir que los hongos existen únicamente para alimentarlas a ellas.

Quizá las más notables de todas las plantas mirmecófilas sean unos epífitos del Sudeste asiático que desarrollan una gran dilatación del tallo denominada pseudobulbo. El pseudobulbo está recorrido interiormente por un laberinto de cavidades. Estas cavidades son tan parecidas a las que suelen excavar las hormigas en el suelo que cabe sospechar que son obra de estos insectos. Pero no es éste el caso. Las cavidades son producidas por la propia planta, y en ellas viven hormigas (figura 8.4).

Más conocidas son las hormigas de las acacias, que viven dentro de espinas huecas especiales (figura 8.5). Las espinas son gruesas y bulbosas, y la planta ya las produce huecas, con el único propósito aparente de albergar a las hormigas. Lo que las plantas obtienen de este arreglo es la protección que le proporcionan los nocivos aguijones de las hormigas. Así se ha sido demostrado mediante experimentos elegantemente simples. Cuando se mata a las hormigas con insecticida, las acacias huésped sufren muy pronto un notable incremento de la depredación por herbívoros. Las hormigas, suponiendo que piensen, seguramente pensarán que las espinas de acacia están ahí para prove-



Figura 8.4. Una planta que proporciona acomodo a la medida de las hormigas a cambio de protección. Sección transversal de un pseudobulbo de *Myrmecodia pentasperma*.

cho suyo. Las acacias pensarán que las hormigas están ahí para protegerlas de los herbívoros. ¿Deberíamos pensar entonces que cada uno de los miembros de este consorcio trabaja para el bien del otro? Es mejor pensar que cada uno de ellos está utilizando al otro para su *propio* bien. Es un tipo de explotación mutua en el que cada cual se aprovecha del otro lo suficiente para hacer que el coste de la ayuda prestada valga la pena.

Existe la tentación, en la que suelen caer los ecólogos, de considerar que la totalidad de la vida es una especie de grupo de ayuda mutua.

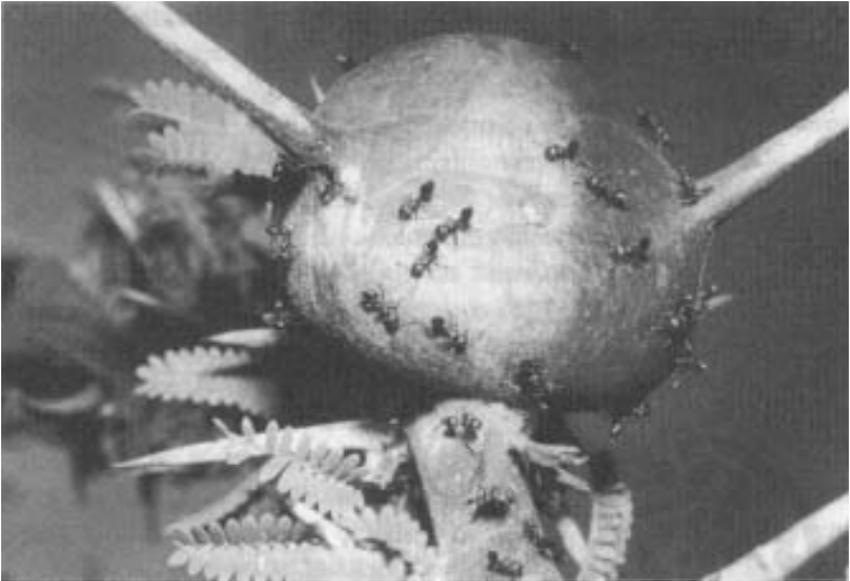


Figura 8.5. Espina de acacia. Otro ejemplo de cooperación entre hormigas y plantas. Estas espinas bulbosas están huecas, lo que permite a las hormigas morar en su interior.

Las plantas son las cosechadoras de la energía primaria de la comunidad. Captan la luz solar y ponen su energía a disposición de la comunidad entera. Su contribución a la comunidad es servir de comida. Los herbívoros, entre ellos los abundantísimos insectos vegetarianos, son el conducto a través del cual la energía solar es conducida desde los productores primarios, las plantas, hasta los niveles superiores de la cadena trófica, los insectívoros, los pequeños carnívoros y los grandes carnívoros. Cuando los animales defecan o mueren, sus elementos químicos vitales son reciclados por carroñeros tales como los escarabajos estercoleros y los escarabajos sepultureros, los cuales transfieren la preciosa carga a las bacterias del suelo, que en última instancia la pondrán de nuevo a disposición de las plantas.

Esta imagen benigna y apacible de la circulación de la energía y otros recursos no sería del todo errónea si se comprendiera claramente que los participantes en la misma *no* lo están haciendo por el bien del círculo. Están en el círculo para su propio bien. Un escarabajo pelotero recoge estiércol y lo entierra para utilizarlo como alimento. El hecho de que este animal y sus afines realicen así un servicio de limpieza y

reciclado que es valioso para los demás habitantes de la región es estrictamente fortuito.

La hierba proporciona la dieta básica para una comunidad entera de pacedores, y los pacedores abonan la hierba. Es incluso cierto que, si se retiraran los herbívoros, muchas de las hierbas morirían. Pero esto no significa que una planta herbácea exista para ser comida, o que se beneficie en algún sentido de ser comida. Si pudiera expresar sus deseos, una planta herbácea seguramente desearía no ser comida. ¿De qué modo, pues, resolvemos la paradoja de que si se eliminaran los herbívoros las hierbas morirían? La respuesta es que, aunque ninguna planta desea ser comida, las hierbas lo toleran mejor que muchas otras plantas (razón por la cual se las utiliza en los céspedes, que están destinados a ser segados). Mientras una zona sea intensamente pastada o segada, las plantas que podrían competir con las hierbas no pueden establecerse. Los árboles no pueden ganar pie porque sus pimpollos son destruidos. Los pacedores, por lo tanto, son indirectamente beneficiosos para las hierbas como clase. Pero esto no significa que una planta herbácea concreta se beneficie de ser comida. Puede beneficiarse de que otras plantas sean comidas, incluidas las de su propia especie, puesto que ello supondrá dividendos en abono y en eliminación de competidores. Pero si la planta herbácea individual puede pasar sin ser comida, tanto mejor para ella.

Hemos empezado ridiculizando la falacia corriente de que flores y animales están en este mundo para provecho de los seres humanos, de que el ganado está dócilmente ansioso de ser comido, y así sucesivamente. Algo más defendible era la idea de que están en el mundo para provecho de otros con los que han desarrollado evolutivamente un mutualismo natural: las flores para el provecho de las abejas, las abejas para el provecho de las flores, los cuernos de las acacias para el provecho de las hormigas y las hormigas para el provecho de las acacias. Pero la idea de que determinados organismos existen «para el bien» de otros organismos corre el peligro de una *reductio ad absurdum*. No debemos tener tratos con la falacia de la ecología pop, el santísimo grial de que todos los individuos trabajan para el bien de la comunidad, el ecosistema, «Gaia». Ya es hora de ser quisquillosos y dejar bien claro qué queremos decir cuando decimos que un ser vivo está aquí «para el provecho de» algo. ¿Qué significa realmente «para el bien de»? ¿Para

qué sirven flores y abejas, avispa y higuera, elefantes y pinos de conos erizados... para qué sirven *realmente* todos los seres vivos? ¿Qué tipo de entidad es aquella cuyo «provecho» estará servido por un cuerpo vivo o parte de un cuerpo vivo?

La respuesta es el DNA. Es una respuesta precisa y profunda, y la argumentación que conduce a ella no tiene puntos débiles, pero requiere una explicación. A esta explicación quiero llegar ahora y en el capítulo siguiente. Empezaré volviendo a mi hija.

En cierta ocasión mi hija padecía una fiebre intensa y yo padecía vicariamente con ella mientras me turnaba junto a la cabecera de su cama para refrescarla con agua fría. Los doctores modernos podían asegurarme que no se hallaba en grave peligro, pero la mente soñolienta de un padre amante no podía dejar de recordar las incontables muertes de niños en siglos anteriores, y la agonía de cada pérdida concreta. El propio Charles Darwin jamás se recobró de la muerte, nunca comprendida, de su amada hija Annie. Se dice que la injusticia aparente de la enfermedad de su hija contribuyó a que Darwin perdiera su fe religiosa. Si Juliet se hubiera vuelto hacia mí y me hubiera preguntado, en un eco lastimero de nuestra anterior y más feliz conversación, «¿Para qué sirven los virus?», ¿de qué manera debería haberle contestado?

¿Para qué sirven los virus? ¿Para hacernos mejores y más fuertes al hacernos triunfar sobre la adversidad? (Como los «beneficios» de Auschwitz, tal como sugirió un profesor de teología con el que compartí una mesa de debate en la televisión inglesa.) ¿Para evitar la superpoblación del mundo matando a un número suficiente de nosotros? (Una bendición en aquellos países en los que la contracepción efectiva ha sido prohibida por la autoridad teológica.) ¿Para castigarnos por nuestros pecados? (En el caso del virus del SIDA, parece que hay un gran número de entusiastas de esta idea. Uno casi siente lástima por los teólogos medievales, porque este patógeno admirablemente moralista no andaba suelto en su época.) De nuevo, estas respuestas son demasiado antropocéntricas, aunque lo sean de una manera negativa. Los virus, como todo lo demás en la naturaleza, no tienen interés alguno por los seres humanos, ni positivo ni negativo. Los virus son instrucciones de programa codificadas en el lenguaje del DNA, y están aquí para el bien de las propias instrucciones. Las instrucciones dicen: «Cópíame y

diseminame por doquier», y las que son obedecidas son las que encontramos. Eso es todo. Esto es lo más cerca que el lector estará de una respuesta a la pregunta «¿Qué sentido tienen los virus?». Parece un sentido sin sentido, y esto es precisamente lo que ahora quiero subrayar. Lo haré utilizando el caso paralelo de los virus informáticos. La analogía entre los virus verdaderos y los virus informáticos es extremadamente fuerte y asimismo esclarecedora.

Un virus informático es sólo un programa de ordenador, escrito en el mismo tipo de lenguaje que cualquier otro programa informático, y que viaja a través de la misma gama de medios, como por ejemplo los disquetes, o la red de ordenadores, cables telefónicos, módems y programas denominada Internet. Cualquier programa informático es sólo un conjunto de instrucciones. ¿Instrucciones para hacer qué? Podría ser esencialmente cualquier cosa. Algunos programas son conjuntos de instrucciones para calcular contabilidades. Los procesadores de textos son conjuntos de instrucciones que aceptan palabras mecanografiadas, las mueven por la pantalla y finalmente las imprimen. Pero otros programas, como Genius 2, que recientemente batió al gran maestro Kasparov, son instrucciones para jugar muy bien al ajedrez. Un virus informático es un programa consistente en instrucciones que dicen algo así: «Cada vez que te encuentres con un nuevo disco de ordenador, haz una copia de mí y ponme en ese disco». Es un programa «Duplícame». En ocasiones puede decir algo más, como por ejemplo: «Borra todo el disco duro». O puede hacer que el ordenador diga, en minúsculos tonos robóticos, las palabras «No te asustes». Pero esto es secundario. La característica fundamental de un virus informático, su rasgo distintivo, es que contiene las instrucciones «Duplícame», escritas en un lenguaje que será obedecido por los ordenadores.

Un ser humano puede que no encuentre ninguna razón perentoria para obedecer a rajatabla tales órdenes, pero los ordenadores obedecen como esclavos cualquier cosa mientras esté escrita en su propio lenguaje. «Duplícame» será obedecido tan diligentemente como «Invierte esta matriz», o «Pon este párrafo en cursiva», o «Haz avanzar este peón dos escaques». Además, hay muchísimas oportunidades de infección cruzada. Los usuarios de ordenadores intercambian disquetes de manera disoluta, y se pasan de unos a otros tanto juegos de ordenador como programas útiles. El lector entenderá fácilmente que, cuando hay

montones de discos que se comparten de forma promiscua, un programa que diga «Cópíame en cualquier disco que encuentres» se extenderá por todo el mundo como la varicela. Pronto habrá cientos de copias, y su número tenderá a aumentar. En la actualidad, con las autopistas de la información atravesando el ciberespacio en todas direcciones, las oportunidades para una infección cruzada de propagación rápida por virus informáticos son incluso mayores.

Es tentador quejarse de la falta de sentido de tales programas parásitos, como hice al hablar de los virus que causan enfermedades. ¿Para qué diantres sirve un programa que no dice más que «Duplica este programa»? Ciertamente se duplicará, ¿pero acaso no hay algo ridículamente ocioso en estos esfuerzos puramente autorreferenciales? ¡Pues claro que sí! Es malignamente fútil. Pero no *importa* que sea fútil y absurdo en este sentido. Puede carecer absolutamente de sentido y sin embargo propagarse. Se propaga porque se propaga porque se propaga. El hecho de que en el ínterin no haga nada útil (incluso puede que haga algo dañino) no viene al caso. En el mundo de los ordenadores y del cambalache de disquetes, sobrevive simplemente porque sobrevive.

Los virus biológicos son exactamente lo mismo. En lo fundamental, un virus no es más que un programa, escrito en el lenguaje del DNA, que es muy parecido a un lenguaje de ordenador, hasta el punto de estar escrito en un código digital. Como un virus informático, el virus biológico simplemente dice: «Cópíame y disemíname por doquier». Como en el caso de los ordenadores, no estamos sugiriendo que el DNA de un virus *desee* ser copiado. Lo que ocurre es que, de todas las maneras en las que el DNA podría disponerse, sólo las ordenaciones que emiten las instrucciones «Disemíname» son diseminadas. Sin quererlo, el mundo se llena de tales programas. De nuevo, como los virus informáticos, están aquí porque están aquí porque están aquí. Si no incorporaran instrucciones que aseguraran su existencia, no existirían.

La única diferencia importante entre ambos tipos de virus es que los virus informáticos son producto de los esfuerzos creativos de seres humanos traviesos o malévolos, mientras que los virus biológicos evolucionan por mutación y selección natural. Si un virus biológico tiene efectos perniciosos tales como provocar estornudos o la muerte, se trata de efectos secundarios o síntomas de sus métodos de propagación. A veces los efectos negativos de los virus informáticos son de

este tipo. El famoso Internet Worm [Gusano de Internet], que se extendió por las redes estadounidenses el 2 de noviembre de 1988, tuvo efectos negativos no deliberados que fueron todos efectos secundarios (un gusano informático es técnicamente distinto de un virus informático, pero eso no tiene por qué preocuparnos aquí). Las copias del programa enajenaron capacidad de memoria y tiempo de proceso, e hicieron que alrededor de 6000 ordenadores se bloquearan. Los virus informáticos, como hemos visto, tienen a veces efectos negativos que no son subproductos o síntomas necesarios, sino manifestaciones gratuitas de pura malicia. Lejos de ayudar a la difusión del parásito, lo único que hacen estos efectos maliciosos es retardarla. Los virus reales no harían nada tan antropocéntrico a menos que fuesen diseñados en un laboratorio de guerra biológica. Los virus que han evolucionado de forma natural no se apartan de su camino para matarnos o hacernos sufrir. El que suframos o no les trae sin cuidado. Nuestro sufrimiento, cuando existe, es un subproducto de sus actividades de autodiseminación.

Las instrucciones «Duplicame», como todas las instrucciones, no son de ninguna utilidad a menos que exista una maquinaria dispuesta a obedecerlas. El mundo de los ordenadores es un lugar adecuado y acogedor para un programa Duplicame. Los ordenadores, unidos mediante Internet y alimentados por personas que toman discos prestados y los prestan a su vez, constituyen una especie de paraíso para un programa de ordenador capaz de autocopiarse. Hay una maquinaria ya preparada que copia instrucciones y obedece instrucciones, que zumba y vibra y, en cierto modo, implora ser explotada por cualquier programa que diga «Duplicame». En el caso de los virus de DNA, la maquinaria ya preparada que copia y obedece es la maquinaria de las células, toda la compleja parafernalia del RNA mensajero, el RNA ribosómico y los diversos RNA de transferencia, cada uno de los cuales se engancha a su aminoácido propio codificado. El lector no necesita conocer los detalles, pero puede descubrirlos en el magnífico libro de J.D. Watson, *Biología molecular del gen*. Para nuestro propósito es suficiente comprender, primero, que todas las células contienen un análogo en miniatura de una maquinaria informática que obedece instrucciones y, segundo, que el «código máquina» de todas las células, en todos los organismos de la Tierra, es idéntico. (Dicho sea de paso, los virus in-

formáticos no tienen este lujo; los virus de DOS no pueden infectar a los «Macs», y viceversa.) Las instrucciones de los virus informáticos y las instrucciones de los virus de DNA son obedecidas porque están escritas en un código que es ciegamente obedecido en los ambientes respectivos en los que se encuentran.

Pero ¿de dónde procede esta maquinaria complaciente que copia y ejecuta instrucciones? No se encuentra aquí por casualidad. Tiene que ser construida. En el caso de los virus informáticos, la maquinaria ha sido fabricada por seres humanos. En el caso de los virus de DNA, la maquinaria son las células de otros organismos. ¿Y quién fabrica estos otros organismos, estos seres humanos y elefantes e hipopótamos cuyas células hacen que la vida sea tan fácil para los virus? La respuesta es: los fabrica otro DNA autocopiante, el DNA que «pertenece» a los seres humanos y a los elefantes. Así pues, ¿qué *son* los organismos grandes como los elefantes, los cerezos y los ratones? (Digo «grandes» porque incluso un ratón, desde el punto de vista de un virus, es muy, muy grande.) ¿Para provecho de quién, en fin, han venido al mundo ratones, elefantes y flores?

Nos estamos acercando a una respuesta definitiva a todas las preguntas de esta clase. Las flores y los elefantes sirven «para» la misma cosa que todos los demás organismos de los reinos vivos, para diseminar programas «Duplicame» escritos en el lenguaje del DNA. Las flores sirven para diseminar copias de instrucciones para hacer más flores. Los elefantes sirven para diseminar copias de instrucciones para hacer más elefantes. Los pájaros sirven para diseminar copias de instrucciones para hacer más pájaros. Las células de un elefante no pueden decir si las instrucciones que obedecen ciegamente son instrucciones de virus o instrucciones de elefante. Como en el caso de la Brigada Ligera de Tennyson, cuando alguien se ha equivocado totalmente, «No podían replicar, no podían razonar, no podían hacer otra cosa que cumplir con su deber y morir».*

El lector comprenderá que utilizo «elefante» para referirme a todos los organismos grandes y autónomos, flores o abejas, seres humanos o cactus, incluso bacterias. Las instrucciones de los virus, como hemos visto, dicen «Duplicame». ¿Qué dicen las instrucciones del elefante?

* *Their's not to make reply, /their's not to reason why, /their's but to do and die.*

Ésta es la idea principal que prefiero dejar para el final del capítulo. Las instrucciones del elefante también dicen «Duplícame», pero lo dicen de una manera mucho más tortuosa. El DNA de un elefante constituye un programa gigantesco, análogo a un programa de ordenador. Al igual que el virus de DNA, es fundamentalmente un programa «Duplícame», pero contiene una digresión casi fantásticamente grande como parte esencial de la ejecución eficiente de su mensaje fundamental. Dicha digresión es un elefante. El programa dice: «Duplícame por la ruta tortuosa de fabricar primero un elefante». El elefante come para crecer; crece para hacerse adulto; se hace adulto para aparearse y reproducir nuevos elefantes; reproduce nuevos elefantes para propagar nuevas copias de las instrucciones del programa original.

También podemos decir lo mismo de *fragmentos* de organismos. El pico del pavo real, al recoger alimento que mantiene vivo al pavo real, es una herramienta para diseminar indirectamente instrucciones para fabricar picos de pavo real. El abanico caudal o rueda del macho de pavo real es una herramienta para diseminar instrucciones para fabricar más ruedas de pavo real. Funciona resultando atractivo para las hembras de pavo real. Es bueno para hacer acopio de hembras de pavo real, mientras que el pico es bueno para hacer acopio de comida. Los machos con los abanicos más llamativos tendrán más descendientes que transmitirán copias de genes embellecedores del abanico. Ésta es la razón por la que las ruedas de los pavos reales son tan hermosas. El hecho de que también a nosotros nos resulten hermosas es un subproducto fortuito. El abanico del pavo real es un diseminador de genes que funciona a través de los ojos de las hembras de pavo real.

Las alas son herramientas para la dispersión de instrucciones genéticas para fabricar alas. En el caso del pavo real, tienen éxito como presentadores de genes especialmente cuando el ave es sorprendida por un depredador y emprende un rápido vuelo. Muchas plantas han desarrollado algo parecido a órganos de vuelo para sus semillas (figura 8.6). A pesar de ello, la mayoría de gente encontraría inconveniente el uso de la palabra «volar», en sentido literal, para las plantas. Por lo visto las plantas no vuelan, y no poseen alas.

Pero, ¡un momento! Desde el punto de vista de la planta, no *necesita* alas propias si tiene alas de abeja o alas de mariposa que hagan el trabajo por ella. En realidad, no me importaría llamar *alas vegetales* a

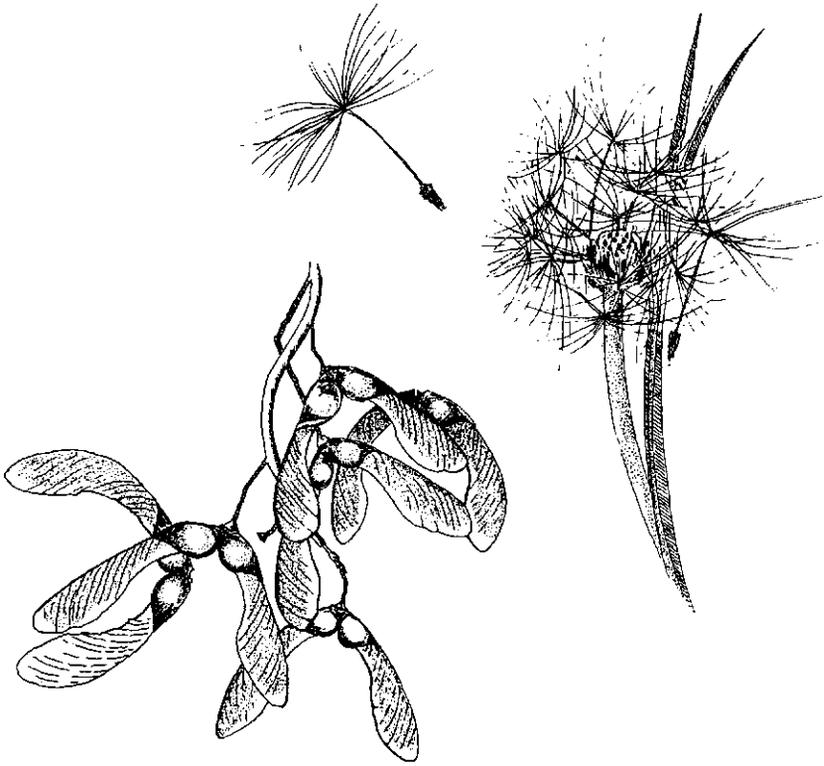


Figura 8.6. DNA con alas: semillas de arce y de achicoria amarga o diente de león.

las alas de una abeja. A fin de cuentas, son órganos de vuelo que son utilizados por la planta para transportar su polen de una flor a otra. Las flores son herramientas para transmitir DNA de la planta a la siguiente generación. Funcionan como los abanicos caudales de los pavos reales, pero en lugar de atraer hembras de pavos reales atraen abejas. Aparte de eso, no hay ninguna diferencia. Del mismo modo que la rueda de un pavo real opera, indirectamente, sobre los músculos de las patas de la hembra, haciendo que ella camine hacia el macho y se aparee con él, así los colores y motivos de una flor, su perfume y su néctar, operan sobre las alas de abejas, mariposas y colibríes. Sus alas batien y transportan el polen de una flor a otra. Bien puede decirse que las alas de abeja son alas de flores, pues transportan los genes de las flores con tanta seguridad como transportan los genes de abeja.

El cuerpo del elefante no puede decir si está trabajando para diseminar DNA de elefante o DNA vírico, y las alas de las abejas no pueden decir si están trabajando para diseminar DNA de abeja o DNA de flor. De hecho, y dejando aparte casos excepcionales como el de las abejas engañadas que pierden el tiempo copulando con orquídeas, trabajan para diseminar ambos DNA. La diferencia entre DNA «propio» y DNA de polen, desde el punto de vista de la maquinaria ejecutiva de la abeja, no puede percibirse. Pavos reales y abejas, flores y elefantes, mantienen con respecto a su propio DNA una relación muy parecida a la que mantienen con el DNA de los virus parásitos que los infectan. El DNA vírico es un programa que dice: «Duplícame de una manera sencilla y directa, utilizando la maquinaria ya preparada de las células huésped». El DNA de elefante dice: «Duplícame de una manera más complicada y tortuosa que supone, primero, construir un elefante». El DNA de flor dice: «Duplícame de una manera todavía más compleja e indirecta: primero, construye una flor y, después, utiliza esta flor para manipular, mediante influencias indirectas, tales como un néctar seductor, las alas de una abeja (que ya ha sido construida convenientemente según las especificaciones de otro lote de DNA "propio" de la abeja) para que transporte lejos y a muchos lugares los granos de polen dentro de los cuales están las instrucciones de DNA mismas». Llegaremos de nuevo a esta conclusión, por otro camino, en el siguiente capítulo.

El robot repetidor



Acabamos de llegar a í& conclusión de que las flores y los elefantes son, efectivamente, huéspedes de su propio DNA de la misma manera que lo son del DNA vírico. Esto es correcto, pero deja sin responder algunas preguntas difíciles. En este razonamiento falta un paso importante. Los virus informáticos se lo pasan en grande porque el mundo ya está lleno de ordenadores potentes, preparados y a la espera de recibir instrucciones. Pero estos ordenadores están fabricados por el hombre, y se ofrecen en bandeja a los programas parásitos. También los virus de DNA tienen huéspedes, con toda una compleja maquinaria celular que obedece instrucciones, que les son ofrecidos en bandeja. Ahora bien, ¿de dónde procede la maquinaria viva?

Imaginemos algo parecido a un virus informático que, en lugar de tener a su disposición un ordenador ya construido y dispuesto a obedecer sus instrucciones, tuviera que empezar de cero. No podría decir simplemente «Duplicame», porque no habría ningún ordenador para obedecer las instrucciones. ¿Que tendría que hacer un programa informático autoduplicante para ser verdaderamente capaz de autopropagarse en un mundo sin maquinaria de computación y duplicación pre-existente? Tendría que empezar diciendo: «Haz la maquinaria necesaria para duplicarme». Pero antes de esto tendría que decir: «Haz las partes con las que se montará la maquinaria para duplicarme». Y antes de esto tendría que decir: «Reúne las materias primas necesarias para construir las partes». Este programa más complejo necesita un nombre. Llamémoslo «Programa de Replicación de Instrucciones Ordenadas», o PRIOR.

El PRIOR debe tener control sobre algo más que un ordenador ordinario con un teclado y un monitor. Debe tener a su disposición el equivalente de manos hábiles, o dispositivos para asir y manipular, co-

nectados a dispositivos sensores con el fin de dar forma a las partes y remendarlas después. Los dispositivos en forma de manos son necesarios para encontrar y ensamblar las partes y, antes que esto, para reunir las materias primas. Un ordenador puede simular cosas en su pantalla, pero no puede construir otro ordenador como él por sí solo. Para hacerlo tiene que proyectarse en el mundo real y manipular metales, silicio y otros materiales tangibles.

Veamos con algo más de detenimiento los problemas técnicos que conlleva esto. Los modernos ordenadores de sobremesa pueden manipular formas coloreadas en pantallas de rayos catódicos, pigmentos coloreados sobre papel de imprimir y, menos corrientemente, cosas tales como sonidos en altavoces estereofónicos. Todas estas cosas pueden utilizarse para crear efectos de consistencia tridimensional. Pero se trata sólo de ilusiones, basadas en engañar al cerebro humano. Sobre la pantalla se dibuja un cubo en perspectiva. Con una representación adecuada de las superficies parece convincentemente sólido, pero no podemos asirlo y sentirlo, macizo y pesado, entre el índice y el pulgar. Con un programa adecuado podemos simular que cortamos el cubo por la mitad y contemplamos la sección transversal en pantalla, pero tampoco ahora será realmente sólido. Los ordenadores del futuro quizá puedan burlar otros sentidos de manera similar. Los equivalentes futuros del ratón podrían transmitir a los dedos una sensación realista de inercia cuando empujen un objeto «pesado» por la pantalla. Aun así, el objeto no será realmente pesado, no estará hecho de material tangible y sólido.

El computador que haga funcionar el PRIOR tiene que manipular algo más que la imaginación humana. Debe ser capaz de manejar objetos sólidos del mundo real. ¿Cómo puede hacer eso un ordenador? Sería de una dificultad formidable. Podemos empezar probando a diseñar un nuevo tipo de impresora, una «impresora 3-D». Una impresora ordinaria manipula tinta sobre una hoja de papel bidimensional. Una manera de aproximarnos a una representación tridimensional de, por ejemplo, el cuerpo de un gato, sería un conjunto de secciones seriadas impresas sobre hojas transparentes. El ordenador se abriría paso rebajando el gato desde el hocico hasta la cola, imprimiendo cientos de hojas de acetato. Cuando las hojas se amontonaran finalmente en un bloque macizo, dentro de éste se vería una representación tridimensional del gato.

Pero ésta no es todavía una impresora tridimensional, porque, si se imprimiera de este modo, el gato quedaría embutido en una matriz de acetato. Podríamos mejorar las cosas sustituyendo la tinta por una resina autotemplable. Las hojas se amontonarían como antes, pero después se disolverían o eliminarían, dejando sólo la resina, ahora endurecida. En el caso improbable de que pudieran resolverse los problemas técnicos que plantearía este diseño, tendríamos un instrumento capaz de componer cualquier objeto tridimensional: una verdadera impresora informática tridimensional.

Nuestra impresora tridimensional está todavía arraigada en preconcepciones bidimensionales, pues obtiene su resultado tridimensional utilizando el principio de las secciones o rebanadas seriadas. Ningún dispositivo de salida que se basara en el principio de las secciones seriadas sería adecuado para nuestro PRIOR. Esta técnica nunca permitiría fabricar una máquina útil del estilo de un motor de combustión interna. Una máquina así necesita subcomponentes tales como cilindros y pistones, volantes y correas. Dichos componentes están hechos de materiales diversos, y deben tener libertad de movimiento. Un motor no puede construirse amontonando rebanadas: debe *montarse* juntando partes que se han fabricado previamente por separado. Estas mismas partes deberán montarse del mismo modo juntando partes más pequeñas. El tipo apropiado de dispositivo de salida para el PRIOR no es, en absoluto, una impresora 3-D. Es un robot industrial. Esta clase de robot posee una pinza o el equivalente de una mano, capaz de asir objetos. La «mano» debe estar al final del equivalente de un brazo, y debe poseer una articulación universal o una serie de articulaciones capaces de moverse en los tres planos. Posee también los equivalentes de órganos de los sentidos, capaces de guiarlo hacia el siguiente objeto que debe asir, y capaces de dirigir dicho objeto hacia su destino estipulado de modo que pueda fijarse en su posición mediante un método apropiado.

Los robots industriales de esta clase ya existen en las fábricas modernas (figura 9.1). Hacen perfectamente su trabajo, siempre que se les asigne una tarea muy concreta en un punto determinado de una línea de montaje. Pero un robot industrial corriente sigue sin ser adecuado para hacer funcionar el programa PRIOR. Puede juntar partes (montarlas) si éstas se le suministran con una orientación determinada o se



Figura 9.1. Robot industrial de la fábrica de automóviles Nissan, Yokohama.

hace que desfilen delante de él en una línea de producción. Pero la finalidad básica de nuestro ejercicio es apartarnos de las cosas que se facilitan con una orientación fijada, «en bandeja». De alguna manera, nuestro robot debe encontrar las materias primas para fabricar las partes antes de poder ensamblarlas. Para hacer esto tiene que desplazarse por el mundo, buscando activamente materias primas para extraerlas y acumularlas. Debe poseer medios de desplazamiento, algo así como bandas de oruga o patas.

Hay robots que tienen patas u otros mecanismos para moverse por el mundo de una manera casi intencionada. El de la figura 9.2 tiene un aspecto bastante parecido al de un insecto, solo que tiene cuatro patas en lugar de seis. Está provisto de pies con ventosas como una mosca, porque su truco de salón consiste en trepar por superficies verticales. Un juego favorito de sus constructores es fastidiarlo poniendo una mano exactamente en el lugar en el que el robot quiere pisar. Este per-

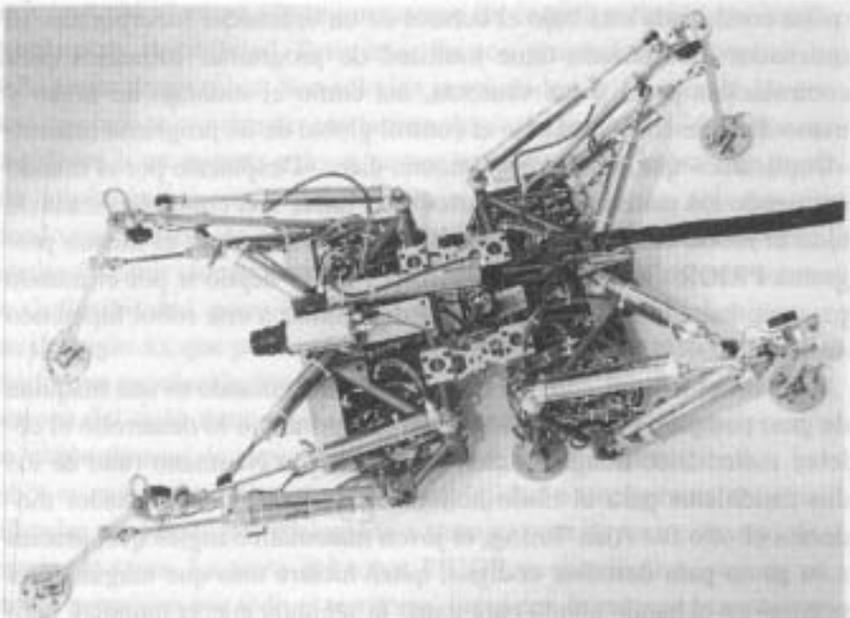


Figura 9.2. Robot que camina sobre patas con ventosas, del Politécnico de Portsmouth, Inglaterra.

cibe la consiguiente inadecuación del terreno y, como si estuviera vivo, se libra a una deliciosa pantomima de búsqueda de una superficie mejor. Pero éste es un detalle de un robot concreto. Un robot anterior ya famoso, la «tortuga» o *Machina speculatrix* construida por W. Grey Walter, de la Universidad de Bristol, acostumbraba a enchufarse en la red eléctrica para recargar sus baterías. Cuando éstas se empezaban a descargar, el robot manifestaba un «apetito» cada vez más inquieto por la electricidad e intensificaba su búsqueda de un enchufe eléctrico. Cuando lo encontraba, se ponía de espaldas al enchufe y se quedaba allí hasta que se recargaba. Estos detalles no son fundamentales. Estamos hablando de una máquina que es capaz de desplazarse sobre sus propias patas y buscar algo, bajo el control de sus propios órganos sensoriales y su propio ordenador incorporado.

Nuestra próxima tarea es unir ambos tipos de robot. Imagine el lector que el robot que anda con ventosas porta, en el dorso, algo parecido al robot industrial de mano soldadora que hemos visto antes. La má-

quina combinada está bajo el control de un ordenador incorporado. El ordenador incorporado tiene multitud de programas rutinarios para controlar las patas y las ventosas, así como el montaje de brazo y mano. Pero se encuentra bajo el control global de un programa maestro «Duplicame» que, fundamentalmente, dice: «Desplázate por el mundo reuniendo los materiales necesarios para hacer una copia duplicada de todo el robot. Haz un nuevo robot y después introduce el mismo programa PRIOR en su ordenador incorporado, y déjalo ir por el mundo para que haga lo mismo». Podemos denominar a este robot hipotético «robot PRIOR».

Un robot PRIOR como el que estamos imaginando es una máquina de gran complejidad e ingenio técnico. El principio lo desarrolló el célebre matemático húngaro-americano John von Neumann (uno de los dos candidatos para el título honorífico de padre del ordenador moderno; el otro fue Alan Turing, el joven matemático inglés que, gracias a su genio para descifrar códigos, quizá hiciera más que ninguna otra persona en el bando aliado para ganar la segunda guerra mundial, pero que fue abocado al suicidio después de la guerra debido a la persecución judicial de que fue objeto —que incluía inyecciones forzadas de hormonas— por su homosexualidad). Pero no se ha construido todavía ninguna máquina de Von Neumann, ningún robot PRIOR autoduplicante. Quizá no sea construido nunca. Puede que se encuentre más allá de los límites de lo practicable.

¿Pero qué tontería estoy diciendo? ¿Decir que nunca se ha construido un robot autoduplicante! ¿Qué diantres pienso que *soy* yo mismo? ¿O el lector? ¿O una abeja, una flor o un canguro? ¿Qué somos, todos nosotros, sino robots PRIOR? No hemos sido fabricados para este fin: hemos sido ensamblados por los procesos del desarrollo embrionario, bajo la dirección última de genes seleccionados de forma natural. Pero lo que hacemos en realidad es exactamente lo que acabamos de decir que hace el hipotético robot PRIOR. Nos movemos por el mundo buscando las materias primas necesarias para ensamblar las partes necesarias para mantenernos y, en última instancia, ensamblar otros robots capaces de las mismas hazañas. Estas materias primas son moléculas que extraemos del rico venero del alimento.

Algunas personas encuentran ofensivo que se les califique de robots. Ello se debe, por lo general, a que piensan que un robot tiene que

ser un zombi inepto e idiota que carece de control refinado, de inteligencia y de flexibilidad. Pero éstas no son propiedades necesarias o definitorias de un robot. Son sólo las propiedades de algunos de los robots que hemos construido con la tecnología disponible. Si digo que un camaleón, o un insecto palo, o un ser humano, es un robot que porta sus propias instrucciones de programación en su interior, no estoy diciendo nada acerca de su inteligencia. Una entidad puede ser muy inteligente y seguir siendo un robot. Tampoco estoy diciendo nada acerca de su flexibilidad, porque un robot puede ser muy flexible. Las personas del siglo xx que ponen objeciones al calificativo de robot están negando una asociación irrelevante y superficial del término (como una persona del siglo xviii que se negara a llamar vehículo de transporte a un vagón de tren de vapor sobre la base de que no tiene caballo). Un robot es cualquier mecanismo, de complejidad e inteligencia no especificadas, dispuesto por adelantado a trabajar para llevar a cabo una determinada tarea. La tarea del robot PRIOR es distribuir copias de su propio programa por todo el territorio, junto con la maquinaria necesaria para ejecutarlo.

El punto de partida de nuestra disquisición sobre los robots autocopiantes había sido nuestra decisión de que un programa simple del tipo «Duplicame», como un virus informático o un virus de DNA real, estaba muy bien, pero dependía de que el mundo estuviera repleto de maquinaria capaz de leer y obedecer instrucciones. Pero el mundo es así de amable sólo porque alguien, o algo, ha construido previamente esa maquinaria que obedece instrucciones. Ahora hemos imaginado un robot muy refinado que es, de nuevo, una digresión gigantesca dentro de un programa «Duplicame». En lugar de decir simplemente «Duplicame», el programa dice: «Ensambla las partes y haz una nueva versión de la maquinaria completa necesaria para copiarme, y después cárgame en su ordenador incorporado».

Hemos llegado de nuevo a la conclusión del capítulo anterior. Un elefante es una enorme digresión dentro de un programa informático escrito en el lenguaje del DNA. Un avestruz es otra clase de divagación, y un roble otra; y, desde luego, un ser humano es otra más. Todos somos robots PRIOR, todas máquinas de Von Neumann. Ahora bien, ¿cómo empezó todo el proceso? Para responder a esto, tenemos que retroceder una enormidad de tiempo, más de 3000 millones de años

atrás, quizá hasta 4000 millones de años. En aquellos tiempos el mundo era muy distinto. No había vida, ni siquiera biología, sólo física y química, y los detalles de la química terrestre eran muy distintos. La mayor parte, aunque no toda, de la especulación informada comienza en lo que se ha dado en llamar la «sopa» primordial, un caldo diluido de sustancias orgánicas simples en el mar. Nadie sabe cómo ocurrió, pero de alguna manera, sin violar las leyes de la física y de la química, surgió una molécula que tenía casualmente la propiedad de autocopiarse: un replicador.

Esto puede parecer un enorme golpe de suerte. Quiero decir algunas cosas sobre esta «suerte». En primer lugar, tuvo que suceder sólo una vez. A este respecto, se parece a la suerte asociada a la colonización de una isla. La mayoría de las islas del mundo (hasta las más remotas, como la isla Ascensión) poseen animales. Algunos de ellos, como las aves o los murciélagos, llegaron allí de una manera que podemos entender fácilmente, sin necesidad de postular una enorme suerte. Pero otros animales, como los lagartos, no pueden volar. Nos rascamos la cabeza y nos preguntamos cómo llegaron allí. Postular que se trata de un capricho de la suerte (como que un lagarto estuviera agarrado a un manglar en el continente, manglar que se desgajó y derivó con la corriente a través del mar) puede parecer poco satisfactorio, pero, caprichosa o no, este tipo de suerte se da: hay lagartos en las islas oceánicas. Por lo general no conocemos los detalles, porque no es algo que ocurra con tanta frecuencia como para tener cierta probabilidad de observarlo. Lo importante es que bastó con que ocurriera una vez. Y lo mismo vale para el origen de la vida en un planeta.

Es más: por lo que sabemos, puede que sólo ocurriera en un único planeta de entre los billones de billones de planetas del universo. Desde luego, mucha gente piensa que tuvo lugar realmente en muchísimos planetas, pero sólo tenemos *evidencia* de que ocurrió en un planeta, después de un lapso de quinientos a mil millones de años. De modo que el tipo de acontecimiento afortunado que estamos observando *pudo* haber sido tan absolutamente improbable que la probabilidad de que ocurra en algún lugar del universo podría ser muy baja, del orden de una vez cada billón de billones de billones de años. Si ocurrió *realmente* en sólo un planeta, en cualquier lugar del universo, este planeta tiene que ser el nuestro... porque aquí estamos, hablando de ello.

Personalmente pienso que seguramente la vida no es tan rara, y que el origen de la vida no fue tan improbable. Pero existen argumentos en contra de esta idea. Uno interesante es el del «¿dónde están?». Imaginemos una raza del Pacífico Sur cuya isla es tan remota que, en toda la historia oral de la tribu, ninguna canoa ha encontrado nunca ningún otro pedazo de tierra habitada. Los ancianos de la tribu especulan acerca de la posibilidad de que exista vida fuera de la isla. La facción «estamos solos» tiene un potente argumento en el hecho de que la isla nunca ha sido visitada. Incluso si los viajes que parten de la isla se limitan al área que alcanza una canoa, ¿no debieran existir otras tribus que hubieran progresado hasta barcas avanzadas? ¿Por qué no han venido nunca?

En el caso de las islas habitadas de la Tierra, todas ellas han sido ya visitadas, y hoy en día debe haber pocas personas que no hayan visto nunca un avión. Pero, por lo que sabemos a partir de informes adecuadamente autenticados, nuestro planeta isla en el universo no ha sido nunca visitado. Por otra parte, durante las últimas décadas hemos estado en condiciones de detectar comunicaciones de radio procedentes de muy lejos. Hay alrededor de un millón de estrellas dentro de la esfera que las ondas de radio podrían abarcar en un millar de años. Mil años es un tiempo corto para los estándares de las estrellas y la geología. Si las civilizaciones tecnológicas son comunes, algunas de ellas deberían haber estado emitiendo ondas de radio desde hace más miles de años que nosotros. ¿No habríamos oído ya algunos murmullos de su existencia? Este no es un argumento en contra de la existencia de vida de cualquier tipo en otro lugar del universo. Pero sí es un argumento en contra de que la vida inteligente, técnicamente sofisticada, esté distribuida en el universo con una densidad suficiente para encontrarse a una distancia de otras islas de vida dentro del radio de acción de las ondas de radio. Si la vida, cuando aparece, tiene sólo una bajísima probabilidad de dar origen a vida inteligente, podríamos considerar esto como una evidencia de que la vida misma es rara. Una conclusión alternativa a esta cadena de razonamiento es la sombría propuesta de que la vida inteligente podría surgir con cierta frecuencia, pero que, por norma, sólo transcurre un corto espacio de tiempo entre la invención de la radio y la autodestrucción tecnológica.

La vida podría ser algo corriente en el universo, pero también so-

mos libres de especular que es rarísima. De ahí se sigue, por lo tanto, que el tipo de acontecimiento que estamos buscando cuando especulamos acerca del origen de la vida podría ser uno muy, pero que muy improbable: no el tipo de acontecimiento que podemos esperar reproducir en el laboratorio y que un químico calificaría de «plausible». Es ésta una interesante paradoja, que expliqué con claridad en un capítulo de *El relojero ciego* titulado «Orígenes y milagros». Podríamos estar buscando activamente una teoría con la propiedad específica de que, cuando la encontremos, la consideraremos implausible. Según como se mire, incluso nos podríamos sentir positivamente preocupados si un químico consiguiera corroborar una teoría del origen de la vida que, con los estándares de probabilidad ordinarios, juzgáramos plausible. Por otra parte, la vida parece haber surgido en el primer medio millón de los 4500 millones de años de la Tierra; hemos estado aquí durante ocho novenos de la edad de la Tierra, y mi intuición sigue siendo que la aparición de la vida en un planeta no es un acontecimiento del todo inesperado.

El origen de la vida, en cualquier lugar, consiste en la aparición casual de una entidad autorreplicante. En la actualidad, el replicador importante en la Tierra es la molécula de DNA, pero es probable que el replicador original fuera otro. No sabemos qué molécula era. A diferencia del DNA, las moléculas replicantes originales no pudieron basarse en una maquinaria complicada que las duplicara. Aunque, en cierto sentido, tuvieron que ser instrucciones equivalentes a «Duplícame», el «lenguaje» en el que fueron escritas no era, a buen seguro, un lenguaje tan altamente formalizado que sólo una máquina complicada las pudiera obedecer. El replicador original no debía necesitar una descodificación compleja, como necesitan en la actualidad las instrucciones del DNA y los virus informáticos. La autoduplicación era una propiedad inherente a la estructura de la entidad, del mismo modo, pongamos por caso, que la dureza es una propiedad inherente a un diamante, algo que no tiene que ser «descodificado» ni «obedecido». Podemos estar seguros de que los replicadores originales, a diferencia de sus sucesores posteriores —las moléculas de DNA— carecían de una maquinaria compleja de descodificación y de obediencia de instrucciones, porque la maquinaria compleja es la clase de cosa que surge en el mundo únicamente después de muchas generaciones de evolución; y la

evolución no se inicia hasta que hay replicadores. En lucha contra la llamada «trampa 22 del origen de la vida» (véase más adelante), las entidades autoduplicantes originales tuvieron que ser lo bastante sencillas para surgir por accidentes químicos espontáneos.

Una vez entraron en liza los primeros replicadores espontáneos, la evolución pudo avanzar deprisa. Está en la naturaleza de un replicador generar una población de copias de sí mismo, lo que implica una población de entidades que también experimentan duplicación. De ahí que la población tienda a crecer de forma exponencial hasta que la competencia por los recursos o las materias primas imponga un límite. Enseguida desarrollaré la idea del crecimiento exponencial. Brevemente, la población se duplica a intervalos regulares en lugar de crecer mediante la suma simple de un número constante de individuos a intervalos regulares. Esto significa que muy pronto existirá una población muy grande de replicadores, y por lo tanto competencia entre ellos. Está en la naturaleza de cualquier proceso de copia el que nunca sea absolutamente perfecto: se producen errores aleatorios en la duplicación. En la población surgirán, por lo tanto, variaciones del replicador. Algunas de tales variaciones habrían perdido la propiedad de autoduplicarse, y su forma particular no se habría conservado en la población. Otras variantes habrían resultado tener alguna propiedad que habría hecho que se duplicaran más rápidamente o con más eficiencia. En consecuencia, se habrían hecho más numerosas en la población. Puesto que habrían estado compitiendo por las mismas materias primas que los replicadores rivales, con el paso del tiempo el tipo de replicador promedio, típico de la población, habría sido suplantado continuamente por un tipo promedio nuevo y mejor. ¿Mejor para qué? Mejor para replicarse, naturalmente. Después, esta mejora se habría traducido en una influencia sobre otras reacciones químicas que habrían facilitado la autorreplicación. Al final la influencia se habría hecho lo bastante complicada para que un observador, si hubiera habido alguno (no lo había, desde luego, porque la evolución de algo que pudiéramos llamar observador requiere miles de millones de años), describiese el proceso como una decodificación y una obediencia de instrucciones; y si a este mismo observador se le hubiera preguntado qué significaban dichas instrucciones, habría tenido que responder: «Duplicame».

Esta historia plantea dificultades indudables. Entre ellas ya he alu-

dido a la llamada «trampa 22»* del origen de la vida. Cuánto más grande sea el número de componentes de un replicador, más probable es que alguno de ellos sea copiado erróneamente, lo que conducirá al funcionamiento completamente defectuoso del conjunto. Esto sugiere que los replicadores primordiales debieron tener muy pocos componentes. Sin embargo, es probable que las moléculas con un número de componentes por debajo de una cierta cota inferior sean demasiado simples para dirigir su propia duplicación. Para reconciliar estos dos requerimientos aparentemente incompatibles se ha invertido mucho ingenio, que ha reportado algún éxito, pero el razonamiento es demasiado matemático para incluirlo en este libro.

Las máquinas de replicación originarias (los primeros robots repetidores) debieron haber sido mucho más simples que las bacterias, pero las bacterias son los ejemplos más simples de robots PRIOR que conocemos en la actualidad (figura 9.3a). Las bacterias se ganan la vida de gran variedad de maneras, una variedad mucho mayor desde el punto de vista químico que la de los demás reinos vivos juntos. Algunas bacterias están más relacionadas con nosotros que con otros tipos extraños de bacterias. Hay bacterias que obtienen su sustento del azufre de las fuentes termales, y para las que el oxígeno es un veneno mortal; bacterias que fermentan el azúcar convirtiéndolo en alcohol en ausencia de oxígeno; bacterias que viven a base de dióxido de carbono e hidrógeno, y que producen metano; bacterias fotosintetizadoras (que utilizan la luz del Sol para sintetizar alimento), como las plantas; otras bacterias que realizan la fotosíntesis de manera muy distinta a como lo hacen las plantas. Los distintos grupos de bacterias abarcan una gama de bioquímicas radicalmente distintas, comparadas con las cuales el resto de nosotros (animales, plantas, hongos y ciertas bacterias) somos monótonamente uniformes.

Bacterias de varios tipos diferentes se unieron, hace más de mil millones de años, para formar la «célula eucariota» (figura 9.3b). Éste es nuestro tipo de célula propio, con un núcleo y otras partes internas

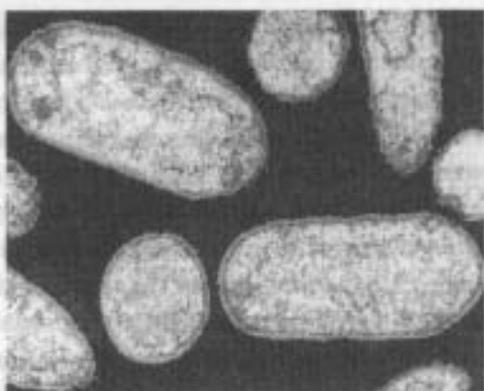
* Orden imposible de cumplir sin violar otra igualmente importante. De la novela y película del mismo título (*Catch 22*), de Joseph Heller, en la que pilotos de la Fuerza Aérea estadounidense en la segunda guerra mundial intentan evitar las misiones peligrosas haciéndose pasar por locos; pero la mejor prueba de que no lo están (y de que son aptos para el servicio) es que no quieren seguir volando. (*N. del T.*)

complicadas, muchas de ellas formadas por membranas internas replegadas de manera intrincada, como las mitocondrias a las que me referí brevemente en la figura 5.2. En la actualidad se considera que la célula eucariota deriva de una colonia de bacterias. Las propias células eucariotas se unieron posteriormente para formar colonias. Los *Volvox*, algas verdes unicelulares, son organismos modernos (figura 9.3c), pero es posible que representen el *tipo* de cosa que apareció hace más de mil millones de años, cuando las células eucariotas empezaron a reunirse en colonias. Esta agrupación de células eucariotas era comparable a la agrupación anterior de bacterias en células eucariotas y a la reunión incluso anterior de genes en bacterias. Los grupos mayores y más densamente empaquetados de células eucariotas se denominan metazoos. La figura 9.3d muestra un metazoo comparativamente pequeño, un tardígrado. Los metazoos, a su vez, se agrupan a veces en colonias que se comportan como si fueran individuos (figura 9.3e).

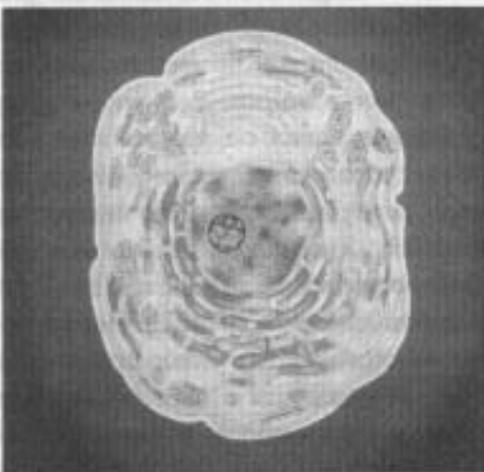
He dicho que un elefante es una enorme divagación sobre un programa «Duplicame», pero podía haber dicho ratón en lugar de elefante, y «enorme» continuaría siendo un calificativo adecuado. Una colonia de *Volvox* tiene unos cuantos centenares de células. Un ratón es un gran edificio de quizá mil millones de células. Un elefante es una colonia de unos 1000 billones de células (10^{15}), y cada una de estas células es una colonia de bacterias. Si un elefante es un robot que transporta consigo su proyecto de construcción, entonces es un robot casi inconcebiblemente grande. Se trata de una colonia de células pero, puesto que todas portan copias idénticas de las mismas instrucciones de DNA, todas cooperan para conseguir el mismo objetivo de duplicar sus programas.

Un elefante no es algo especialmente grande en términos absolutos. Comparado con una estrella es diminuto. Es grande en comparación con las moléculas de DNA para cuya preservación y propagación está diseñado. Es grande si se le compara con los replicantes hacedores de elefantes que lleva dentro.

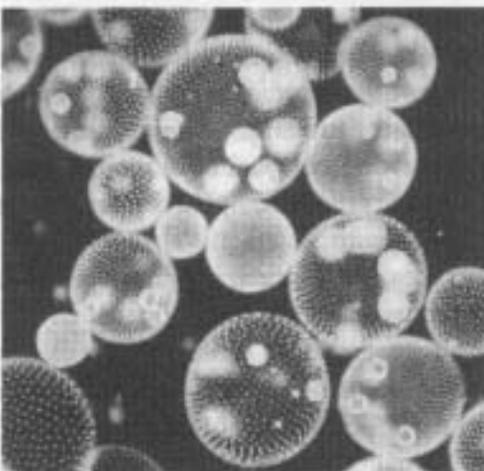
Para tener una idea de la escala, imaginemos que unos ingenieros humanos construyen un robot mecánico gigante en cuyo interior pueden viajar como los griegos en su caballo de Troya, pero a una escala tal que cada ingeniero humano equivale en tamaño a una de las moléculas de DNA del robot. Recuérdese que estamos considerando que un caballo real es un robot construido por los genes que viajan en su inte-



a



b



c

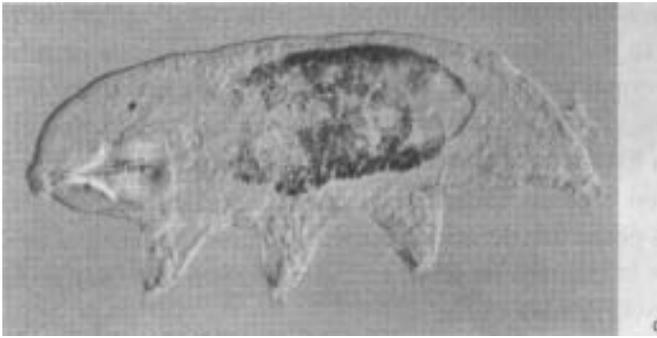


Figura 9.3. Niveles crecientes de organización en los seres vivos: *a)* bacterias individuales; *b)* célula avanzada (eucariota) con núcleo, que originalmente evolucionó a partir de una colonia de bacterias; *c)* *Volvox*, una colonia de células eucariotas; *d)* una colonia mucho más compacta y populosa de células eucariotas diferenciadas, un tardígrado. El cuerpo humano es otra de tales colonias; una colonia de colonias, de hecho, puesto que cada una de nuestras células es una colonia de bacterias; *e)* una colonia de organismos individuales: un enjambre de abejas melíferas (una colonia de colonias de colonias).

rrior. La idea es que, si construyéramos un caballo robot para poder viajar en su interior, y si nuestro robot fuera tan grande en relación a nosotros como un caballo real en relación a los genes que *lo* construyeron, entonces nuestro caballo robot podría alzarse sobre el Himalaya (figura 9.4). Un caballo real vivo está constituido por billones de células. Con algunas excepciones poco importantes, cada una de estas células posee una dotación completa de genes que viajan en su interior, aunque la mayoría de ellos, en cualquier tipo de célula que consideremos, está dormida.

Un cuerpo vivo real puede ser tan grande (en comparación con los genes que lo han construido) porque su proceso de crecimiento es muy diferente del de una máquina fabricada por el hombre (muy distinto del proceso de construcción de nuestro caballo mecánico, si es que llegara a construirse). La manera especial de crecer de los seres vivos es el crecimiento exponencial. Dicho de otra manera, los seres vivos crecen por duplicación local.

Nuestra existencia comienza con una única célula muy pequeña o, mejor dicho, del tamaño más o menos adecuado para los genes que la producen. Se encuentra dentro del rango de tamaños que los genes pueden abarcar mediante manipulación bioquímica. Sus zarcillos de influencia pueden alcanzar todos los rincones de una célula, y pueden hacer que dicha célula tenga determinadas propiedades. Quizá la propiedad más notable de esa célula es la capacidad de dividirse en dos células hijas más o menos parecidas a la progenitora. Al ser como la célula progenitora, cada célula hija es capaz de dividirse en dos, produciendo así cuatro células nietas. Cada una de estas cuatro puede duplicarse a su vez, lo que produce ocho células, y así sucesivamente. Esto es crecimiento exponencial, o duplicación local.

La gente poco versada en ello encuentra sorprendente el poder del crecimiento exponencial. Como prometí, le dedicaré un poco más de tiempo, porque es importante. Hay muchas maneras efectivas de ilustrarlo. Si se dobla una hoja de papel una vez, tenemos el doble de grosor. Doblémosla de nuevo y su grosor será cuatro veces el inicial. Otro doblez y tendremos un fajo de ocho capas de grosor. Otros tres dobleces es seguramente lo máximo que podremos conseguir antes de que el taco se haga demasiado rígido para ser doblado de nuevo: un grosor de sesenta y cuatro capas. Pero supongamos que esta rigidez mecánica no



Figura 9.4. Un caballo es un vehículo robot para las moléculas de DNA y es muy grande en comparación con ellas. Si los seres humanos construyeran un Caballo de Troya para viajar en su interior, a una escala similar en relación a nosotros, dejaría pequeño al Himalaya. Esta fantasía la pintó mi madre, Jean Dawkins, para una de mis Conferencias Navideñas de la Royal Institution.

fuera ningún problema y que pudiéramos seguir doblando la hoja de papel hasta, pongamos, cincuenta veces. ¿Cuán grueso sería para entonces el fajo de papel? La respuesta es que sería tan grueso que sobrepasaría la atmósfera terrestre y llegaría hasta la órbita del planeta Marte.

Del mismo modo, mediante duplicación local de las células por todo el cuerpo que se desarrolla, el número de células alcanza rápidamente una cifra astronómica. Una ballena azul está constituida aproximadamente por cien mil billones de células (10^{17}). Pero es tal el poder del crecimiento exponencial que sólo se tardaría unas cincuenta y siete generaciones celulares, en condiciones ideales, para producir un tal leviatán. Cuando digo generación celular quiero decir duplicación. Recuérdese que el número de células aumenta del siguiente modo: 1, 2, 4, 8, 16, 32, etc., de manera que hacen falta seis generaciones celulares para alcanzar las treinta y dos células. Si se sigue multiplicando por dos de esta manera, se tardan sólo cincuenta y siete generaciones celulares en llegar a los cien mil billones, que es el número de células de una ballena azul.

De hecho, esta manera de calcular el número de generaciones celulares es poco realista, porque supone que, después de cada generación celular, todas las células siguen duplicándose. En realidad, muchos linajes celulares abandonan antes el juego de las duplicaciones, cuando han acabado de construir una parte determinada del cuerpo, por ejemplo el hígado. Otros linajes celulares siguen duplicándose durante más tiempo. De manera que una ballena azul consiste en realidad en un número de linajes celulares de longitud distinta, que construyen diferentes partes del animal. Algunos de estos linajes siguen dividiéndose después de cincuenta y siete generaciones celulares. Otros dejan de dividirse antes. En la práctica hay «células vástago», subconjuntos de células que se reservan con la finalidad de emitir copias de células iguales.

Se puede calcular aproximadamente el número mínimo "degeneraciones celulares que serían necesarias, en condiciones ideales de duplicación, para hacer crecer cualquier animal hasta su tamaño máximo. Se puede suponer que los animales grandes no están formados por células especialmente grandes; lo único que ocurre es que tienen más células que los animales pequeños. Un cálculo ingenuo indica que producir un ser humano adulto requeriría un mínimo de cuarenta y siete generaciones de duplicación celular, y producir una ballena azul requeriría sólo unas diez generaciones celulares más. Naturalmente, estas cifras son subestimaciones, por la razón que he dado antes. No obstante, sigue siendo cierto que el poder del crecimiento exponencial es tan grande que basta un pequeño cambio en la duración del proceso de división de un determinado linaje celular para obtener un cambio espectacular en el tamaño final del grupo de células producido. Las mutaciones hacen esto a veces.

La construcción de estos cuerpos colosales (colosales según los estándares de sus constructores y pasajeros de DNA) puede calificarse de *gigatecnología*. La gigatecnología es el arte de construir cosas al menos mil millones de veces mayores que uno mismo. El arte de la gigatecnología es algo en lo que los ingenieros humanos no tienen experiencia. Los mayores vehículos que construimos para viajar en ellos (los grandes barcos) no son demasiado grandes en relación a sus constructores, y en cuestión de minutos podemos recorrerlos caminando. Cuando construimos algo como un barco, no tenemos la ventaja del crecimiento exponencial. Para nosotros no hay otra manera de hacerlo

que pulular por toda su estructura y remachar cientos de placas de acero prefabricadas para soldarlas.

El DNA, que construye sus vehículos robot para viajar en ellos, tiene a su disposición el recurso del crecimiento exponencial. El crecimiento exponencial pone un gran poder en las manos de los genes seleccionados naturalmente, lo que significa que un minúsculo ajuste en un detalle del control del crecimiento embrionario puede tener un efecto de lo más espectacular sobre el resultado. Una mutación que le diga a un sublinaje de células concreto que siga dividiéndose sólo una vez más (pongamos que lo haga durante veinticinco generaciones celulares en lugar de veinticuatro) puede en principio tener el efecto de duplicar el tamaño de una determinada parte del cuerpo. El mismo truco de cambiar el número de generaciones celulares o las tasas de división celular puede ser utilizado por los genes durante la embriología para cambiar la *forma* de una porción del cuerpo. Los seres humanos modernos poseemos un mentón prominente en comparación con nuestro antepasado relativamente reciente, *Homo erectus*. Todo lo que hace falta para cambiar la forma del mentón es un pequeño reajuste en el número de generaciones celulares en regiones concretas del cráneo embrionario.

Hasta cierto punto, lo que resulta notable es que los linajes celulares dejen de dividirse cuando se supone que les toca, de tal manera que todas nuestras partes guarden las proporciones mutuas correctas. En algunos casos, sin embargo, es notorio que los linajes celulares no cesan de dividirse cuando debieran. Cuando eso ocurre, lo llamamos cáncer. En su brillante libro (al que pusieron el excelente título de *Darwinian Medicine* —Medicina darwiniana—, pero que después los editores sustituyeron por una serie de títulos nada memorables y geográficamente variables) Randolph Nesse y George Williams hacen un atinado comentario sobre el cáncer. Antes de preguntarnos por qué tenemos cáncer, deberíamos preguntarnos por qué no lo tenemos todo el tiempo.

Quién sabe si algún día los seres humanos intentarán construir cosas mediante la gigatecnología, pero ahora mismo ya se habla de *nanotecnología*. Así como «giga» significa mil millones, «nano» significa una milmillonésima. La nanotecnología tiene que ver con la construcción de cosas cuyo tamaño es una milmillonésima parte del tamaño del constructor.

Hay personas (y no se trata de adeptos del movimiento New Age ni fanáticos de culto) que ya están diciendo que algo parecido a lo que aparece en la figura 9.5 será realidad en un futuro no muy distante. Si tienen razón, apenas habrá un área de la vida humana que no resulte extraordinariamente afectada por ello. La práctica médica es un ejemplo. Los cirujanos modernos son personas muy preparadas que manejan instrumentos de precisión delicados. Extraer el cristalino de un ojo que se ha vuelto opaco por culpa de una catarata y reemplazarlo por una lente de sustitución, como hacen los cirujanos modernos, es una extraordinaria proeza de habilidad. Los instrumentos que se utilizan son asombrosamente finos y precisos. Pero, comparados con la escala de la nanotecnología, aún son inmensamente toscos. Escuchemos a Eric Drexler, el científico norteamericano que se está destacando como el sumo sacerdote de la nanotecnología, cuando invoca una imagen nanotecnológica de los escalpelos e instrumentos de sutura actuales:

«Los escalpelos y suturas modernos son sencillamente demasiado toscos para reparar capilares, células y moléculas. Considérese una cirugía "delicada" desde la perspectiva de una célula: una enorme hoja penetra y pasa tajando ciegamente a través de la maquinaria molecular de una multitud de células, matando miles de ellas. Más tarde, un gran obelisco penetra a través de la dividida multitud, arrastrando con él un cable tan grueso como un tren de carga para amarrarla de nuevo. Desde la perspectiva de una célula, incluso la cirugía más delicada, realizada con cuchillas exquisitas y gran destreza, sigue siendo un trabajo de carnicero. Sólo la capacidad de las células de abandonar a sus muertos, reagruparse y multiplicarse hace posible la curación».

El «obelisco» es, obviamente, una delicada aguja quirúrgica, y el cable tan ancho como un tren de mercancías es el hilo quirúrgico más fino. La nanotecnología propone el sueño de construir instrumentos quirúrgicos lo bastante pequeños para trabajar a la escala de las propias células. Tales instrumentos serían demasiado pequeños para ser controlados por los dedos de un cirujano; si un pedazo de hilo tiene el ancho de un tren de mercancías a la escala celular, piénsese lo grandes que serían los dedos de un cirujano. Tendrían que ser pequeñas máquinas automáticas, pequeños robots, no demasiado distintos de versiones

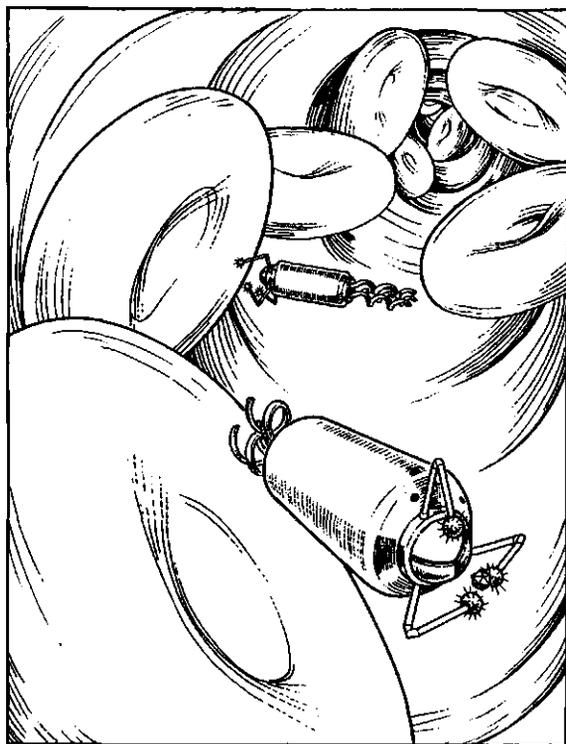


Figura 9.5. Una fantasía nanotecnológica. Dispositivos robotizados enviados para reparar los glóbulos rojos de la sangre.

en miniatura de los robots industriales considerados al principio de este capítulo.

Ahora bien, un robot tan pequeño podría ser maravilloso para reparar, pongamos por caso, un glóbulo rojo enfermo. Pero hay un ejército imponente de glóbulos rojos, capaz de amedrentar al robot más animoso, alrededor de 30.000 millones en cada uno de nosotros. Así pues, ¿cómo diantres puede habérselas el minúsculo robot nanotecnológico con una multitud de ese calibre? El lector habrá adivinado ya la respuesta: la multiplicación exponencial. La esperanza es que el robot nanotecnológico utilice la misma técnica de automultiplicación que las propias células sanguíneas. El robot se clonaría, se replicaría. Mediante el empleo del poder del crecimiento exponencial, se supone que la población de robots alcanzaría pronto los miles de millones de

efectivos, exactamente igual que la población de glóbulos rojos de la sangre.

La nanotecnología pertenece por ahora al futuro, y puede que nunca llegue a materializarse, pero la razón por la que sus proponentes piensan que vale la pena es que saben que, por extraño y ajeno que pueda parecer, su equivalente ya está operando en nuestras células. El mundo de las moléculas de DNA y de proteína es un mundo que opera a una escala que nosotros consideraríamos nanotecnología. Cuando un médico nos inyecta inmunoglobulinas para frenar una hepatitis, está cargando nuestro torrente sanguíneo con el equivalente natural de instrumentos nanotecnológicos. Cada molécula de inmunoglobulina es un objeto complicado que, como cualquier otra molécula de proteína, se basa en su forma para llevar a cabo su trabajo (figura 9.6). Estos diminutos instrumentos médicos son efectivos únicamente porque hay millones de ellos. Han sido producidos en masa (clonados) mediante técnicas de crecimiento exponencial. En este caso se trata de técnicas biológicas. Se suele inyectar para que se reproduzcan en la sangre de un caballo, por ejemplo. Otras vacunas promueven la tendencia del propio cuerpo a clonar anticuerpos como las inmunoglobulinas de caballo. La esperanza es poder clonar herramientas nanotecnológicas, que se parecerán mucho a robots industriales en miniatura, mediante procedimientos artificiales hábilmente diseñados.

La nanotecnología nos parece algo muy extraño, apenas creíble. El mundo de las máquinas a escala molecular nos resulta pavorosamente extraño, más extraño que la vida en otros planetas tal como la imaginan los escritores de ficción científica. Para nosotros la nanotecnología es algo que pertenece al futuro» algo apasionante, quizás un tanto, inquietante y en apariencia nuevo. Pero, lejos de ser realmente nueva y extraña, la nanotecnología es *antigua*. Somos nosotros, los seres grandes, los que somos nuevos, raros, extraños. Somos el producto de una gigatecnología (giga desde el punto de vista de nuestros genes) fulgurante y nueva. La vida se fundamenta en el nanomundo de lo muy pequeño (nano desde nuestro punto de vista), un mundo de moléculas de proteína fabricadas de acuerdo con las especificaciones codificadas en las moléculas de DNA y que controlan las interacciones de otras moléculas.

La nanotecnología es cosa del futuro. Volvamos al principal mensaje de este capítulo y del anterior. Los genes de un elefante o de un ser

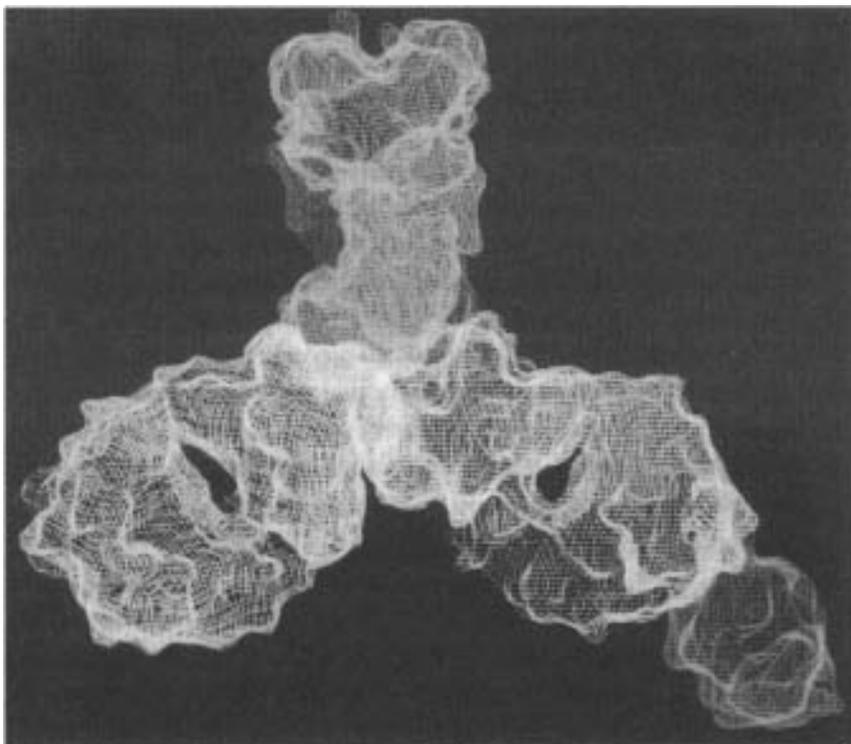
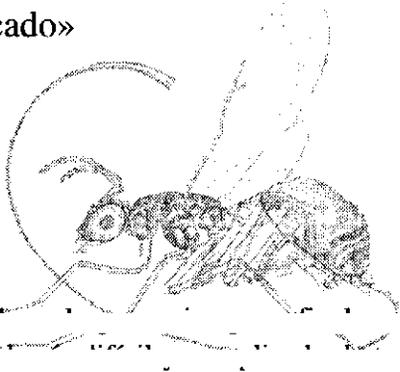


Figura 9.6. Nanotecnología en la vida real: una molécula de inmunoglobulina.

humano, como los de un virus, pueden considerarse un programa informático «Duplícame». Los genes víricos son instrucciones codificadas que dicen (si es que están parasitando un elefante): «Células de elefante, duplicadme». Los genes de elefante dicen: «Células de elefante, trabajad juntas para hacer un nuevo elefante, que a su vez debe ser programado para crecer y hacer más elefantes, todo ello programado para duplicarme». El principio es el mismo, solo que algunos programas «Duplícame» son más indirectos y prolijos que otros. Sólo los programas parásitos pueden permitirse ser escuetos, porque utilizan maquinaria ya a punto para obedecer sus instrucciones. Los genes de elefante, más que programas no parásitos, son subrutinas mutuamente parásitas. Los genes de elefante son como una colonia gigantesca de virus que se apoyan mutuamente. Cada gen de elefante desempeña un papel no mayor que el que desempeña un gen vírico. Cada uno desem-

peña su propio pequeño papel en la construcción cooperativa de la maquinaria que todos ellos necesitan para la ejecución de su programa. Cada uno prospera en presencia de los demás. Los genes víricos prosperan igualmente en presencia del conjunto de genes cooperativos de elefante, pero en cambio no aportan nada positivo. Si lo hicieran, probablemente no los llamaríamos genes víricos, sino genes de elefante. Dicho de otro modo, todo cuerpo contiene genes sociales y genes antisociales. A los antisociales los denominamos genes víricos (y otros tipos de genes parásitos). A los sociales los llamamos genes de elefante (o de ser humano, de canguro, de sicómoro, etcétera). Pero los mismos genes, ya sean sociales o antisociales, ya sean genes víricos o genes «propios», son sólo instrucciones de DNA, y todas ellas dicen, de una manera o de otra, a las duras o a las maduras, de forma sucinta o rebuscada, «Duplicame».

«Un jardín cercado»



Hemos recorrido , estamos preparados para volver a recorrerlos. Mis relatos: el del higo. Vamos a empezar con algo que, a primera vista, parece otra guasa literaria propia del infortunado conferenciante que he ridiculizado al principio de este libro. Un higo no es un fruto, sino un jardín de flores vuelto del revés. Parece un fruto; sabe como un fruto; ocupa un nicho en forma de fruto en nuestros menús mentales y en las estructuras profundas reconocidas por los antropólogos. Sin embargo, no es un fruto: es un jardín enclaustrado, un jardín colgante y una de las maravillas del mundo. No voy a dejar esta afirmación en suspenso como algo profundo y evidente que la gente «sensible» pueda extraer mientras el resto permanece desconcertado. He aquí lo que significa.

El significado está enraizado en la evolución. Las higueras descienden, a través de una cadena de intermedios infinitesimalmente escalonados, de antepasados superficialmente muy distintos de las higueras modernas. Imaginemos una película temporal compuesta como sigue. La primera imagen es un higo actual, cogido del árbol, seccionado por la mitad, colocado sobre una hoja de cartulina y fotografiado. La segunda imagen es un higo similar de hace un siglo. Sigamos procediendo a través de los siglos, de higo en higo, de imagen en imagen, a través de un higo que pudo comer Jesús, o ser recogido para Nabucodónosor por un esclavo en los jardines colgantes de Babilonia, un higo del país de Nod, al este del Edén, higos que endulzaron la corta vida, famélica de azúcar, de los *Homo erectus*, los *Homo habilis* y la pequeña Lucy de Afar; retrocedamos hasta los tiempos anteriores a la agricultura, hasta los higos silvestres del bosque y más allá. Ahora proyectemos la película y observemos de qué modo el higo moderno se transforma en su antepasado remoto. ¿Qué cambios contemplaremos?

Sin duda habrá una reducción de tamaño a medida que retrocedamos, porque los higos cultivados se han ido engrosando al cabo de los siglos a partir de antepasados silvestres más pequeños y duros. Pero éste es un cambio secundario y, por interesante que sea, habrá concluido pasados los primeros milenios de nuestro viaje hacia atrás en el tiempo. Más radical y sorprendente es el cambio que observaremos después de haber retrocedido millones de años. El «fruto» se abrirá. El minúsculo agujero, casi invisible, en el ápice del higo fruncirá los bordes como si de los labios de una boca se tratara, después se abrirá y bostezará hasta que habrá dejado de ser un agujero para transformarse en una copa. Si se observa atentamente la superficie interior de la copa se verá que está tapizada de flores diminutas. Al principio la copa es honda; después, a medida que seguimos rebobinando la película hacia atrás en el tiempo, se hace paulatinamente más abierta. Quizá pase por un estadio plano como un girasol, porque un girasol está también formado por cientos de pequeñas flores, apretujadas en un lecho masivo. Avanzando deprisa más allá del estadio de girasol, nuestro higo en forma de copa se evagina hasta que las florecitas o flósculos se encuentran en la parte exterior, como en una mora (el higo es un miembro del orden de las moras). Más atrás en el tiempo, pasado el estadio de mora, los flósculos se separan y se convierten en flores reconocibles individualmente, como en un jacinto (aunque los jacintos no son parientes cercanos de los higos).

Describir un único higo como «un jardín cercado» puede resultar un tanto artificioso, incluso pretencioso. Después de todo, no solemos describir un jacinto o una mora como un jardín expuesto. Mi defensa es buena y va más allá de una mera obsesión personal por una frase del Cantar de los Cantares de Salomón. Observemos un jardín a través de los ojos de los insectos que polinizan sus flores. A escala humana, un jardín es una población de flores que cubre muchos metros cuadrados. Los polinizadores de los higos son tan diminutos que, para ellos, el interior de un único higo podría parecer un jardín (aunque, hay que reconocerlo, un pequeño jardín de una casita de campo). En él hay plantadas cientos de flores completas en miniatura, tanto masculinas como femeninas. Además, para los diminutos polinizadores el higo es realmente un mundo enclaustrado y en gran parte autosuficiente.

Técnicamente, los polinizadores pertenecen a una familia de avis-

pas —los agaónidos— tan minúsculas que sólo pueden verse claramente con ayuda de una lupa. Cuando digo que «técnicamente» son avispa quiero significar que, aunque no advirtamos en ellas un gran parecido con las avispa listadas de amarillo y negro que en verano amenazan el bote de mermelada, las avispa de los higos comparten con ellas un antepasado común. Las flores de los higos son polinizadas exclusivamente por estas minúsculas avispa (figura 10.1). Casi cada especie de higuera (y hay más de 900) tiene una especie propia de avispa que ha sido su compañero genético único a lo largo del tiempo evolutivo desde que ambos se escindieron de sus ancestros respectivos. Las avispa dependen por completo del higo para su alimentación, y los higos dependen absolutamente de las avispa para el transporte de su polen. Cada una de estas dos especies se extinguiría rápidamente sin la otra. Son las avispa hembras, que abandonan su higo natal, las que transportan el polen. Tienen la forma que uno esperaría de unas avispa miniaturizadas. Los machos, en cambio, carecen de alas, porque nacen y mueren en el mundo cerrado y oscuro de un único higo, y resulta difícil creer que son avispa, ni siquiera de la misma especie que las hembras.

El problema a la hora de contar el relato biológico de las avispa de los higos es que se trata de un ciclo, y no es evidente en qué punto debe comenzar nuestra descripción. Esto no tiene solución, de manera que partiré de la eclosión de nuevas larvas de avispa, acurrucada cada una dentro de una minúscula cápsula en la base de una de las flores femeninas situadas en la parte más interna del jardín enclaustrado. Alimentándose de la semilla en desarrollo, la larva crece y se transforma en adulto, se abre paso a mordiscos fuera de la cápsula y emerge a la relativa libertad del oscuro interior del higo. A continuación, machos y hembras siguen ciclos biológicos ligeramente distintos. Los machos eclosionan antes, y cada uno explora el higo en busca de la cápsula de una hembra nonata. Cuando encuentra una, se abre paso a través de la pared del ovario y se aparea con la hembra aún por nacer. Después la hembra abandona su cápsula y empieza su propio viaje por el jardín colgante en miniatura. Los detalles de lo que ocurre a continuación varían ligeramente según la especie. Lo que sigue es típico. La hembra busca flores masculinas, que suelen encontrarse cerca de la entrada del higo. Valiéndose de los cepillos de sus patas anteriores, expresamente

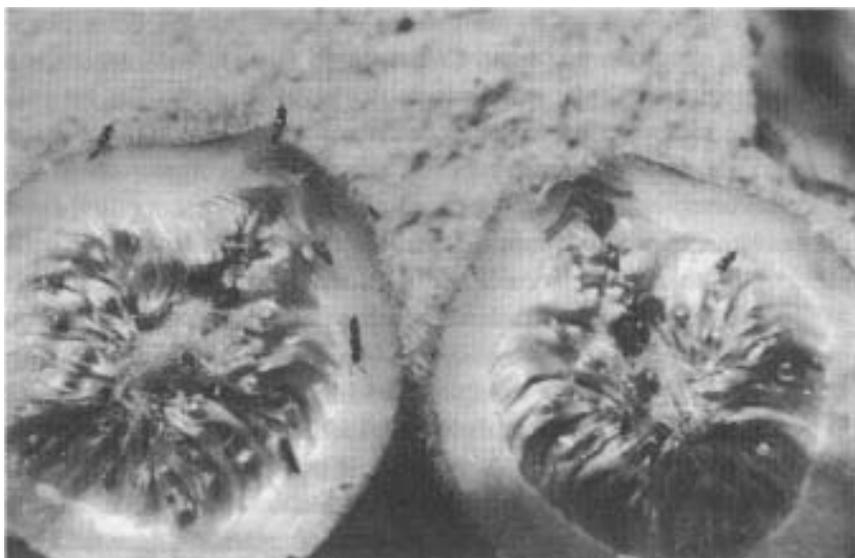


Figura 10.1. Interior de un higo con machos y hembras de avispas de los higos.

construidos, trabaja sin cesar en la oscuridad, traspasando sistemáticamente el polen a unos sacos polínicos especiales que posee en el tórax.

Resulta revelador que la avispa se tome tanto trabajo para almacenar polen y que posea receptáculos especiales para transportarlo. La mayoría de insectos polinizadores se ven simplemente espolvoreados, lo quieran o no. Carecen del instinto de hacer acopio de polen y de un aparato destinado a recogerlo y transportarlo. Las abejas sí lo tienen. Poseen cestillos visibles como engrosamientos amarillos o pardos de polen acumulado en las patas. Pero, a diferencia de las avispas de los higos, las abejas transportan el polen para alimento de sus larvas. Las avispas de los higos no transportan el polen para utilizarlo como alimento; lo cargan en bolsillos especiales con el único propósito de fecundar los higos (lo cual beneficia a las avispas sólo de forma indirecta). Volveremos más tarde a la cuestión de la cooperación aparentemente amistosa entre los higos y sus polinizadores.

Cargada con el precioso polen, la hembra abandona el higo y se dirige hacia la libertad aérea del mundo exterior. La forma de salir varía de una especie a otra. Unas veces se arrastra a través de la «puerta del jardín», el pequeño agujero apical del higo (figura 10.2). En otras es-

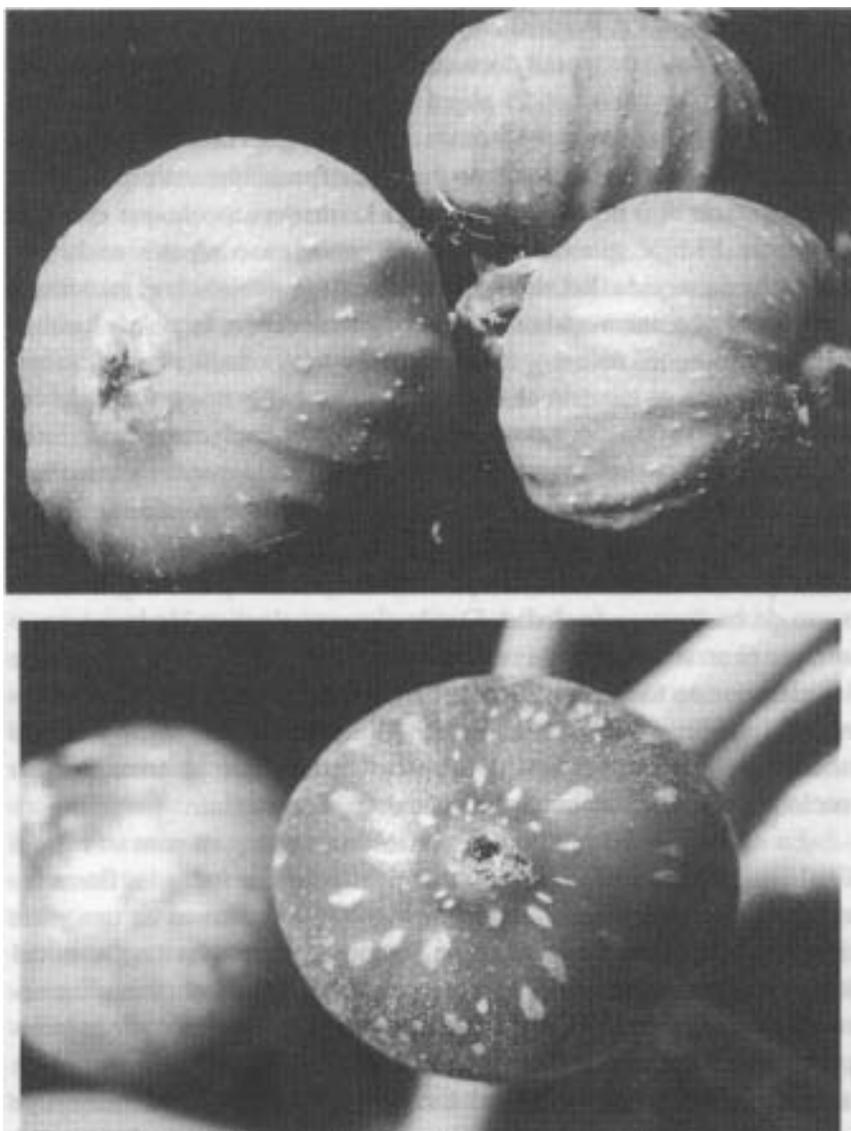


Figura 10.2. La puerta del jardín: exterior de un higo en el que se puede observar la entrada.

pecies les toca a los machos cortar un agujero a través de la pared del higo (para lo cual cooperan docenas de individuos) a través del cual salen volando las hembras. El papel del macho en la vida ya ha concluido, pero la hembra tiene todavía ante sí su gran momento. Se lanza al desacostumbrado medio aéreo en busca (probablemente por medio del olfato) de otro higo perteneciente a la misma especie que el que la vio nacer. El higo que busca tiene que encontrarse además en la fase adecuada de su vida, la fase en que las flores femeninas han madurado.

Una vez ha encontrado el tipo de higo adecuado, la avispa localiza el minúsculo poro apical y se arrastra a su través hacia el oscuro interior. La puerta es tan estrecha que es muy probable que las alas del insecto resulten arrancadas de raíz. Cuando se examinan con lupa, estos poros apicales suelen aparecer obstruidos por alas, antenas y otros restos de avispa. Desde el punto de vista del higo, la ventaja de tener una entrada tan incómodamente estrecha es que no permite el paso de parásitos indeseables. La fricción quizá sirva también para limpiar al insecto de bacterias y suciedad. Desde el punto de vista de la avispa, y aunque el arrancamiento le resulte doloroso, nunca volverá a necesitar las alas, que en todo caso serían un estorbo para moverse por los confines del jardín enclaustrado. Recuérdese que las hormigas reina se arrancan a menudo las alas de un mordisco cuando ha terminado su vuelo nupcial y se disponen a instalarse bajo tierra.

En el interior del higo la avispa hembra se prepara para su misión final antes de morir. Esta misión es doble: polinizar todas las flores femeninas que visita en el interior del higo y poner huevos en una parte de ellas. No en todas, porque si pusiera huevos en todas las flores del higo éste fracasaría como órgano reproductor del árbol (todas sus semillas serían devoradas por las queresas de la avispa). ¿Se puede interpretar esta preservación de una parte de las flores como una restricción altruista por parte de la avispa? Es una pregunta que debe manejarse con cuidado. La evolución de esta autolimitación por parte de las avispas podría justificarse de varias maneras respetables desde el punto de vista darwinista. Pero hay al menos algunas especies en las que la higuera vela por sus propios intereses racionando el número de flores en las que se permite que las avispas pongan huevos. Las técnicas son ingeniosas, y me desviaré de mi relato del ciclo vital usual sólo lo justo para describir dos de ellas.

En algunas especies el higo contiene dos tipos de flores femeninas, unas de estilo largo y otras de estilo corto. (El estilo es el órgano femenino puntiagudo que surge del centro de cualquier flor.) La avispa intenta poner huevos en ambos tipos de flor, pero su oviscapto es demasiado corto para las flores de estilo largo, de modo que abandona y se va. Sólo cuando su oviscapto alcanza el fondo de una flor de estilo corto la avispa pone un huevo. En otras especies de higuera cuyos higos tienen flores homogéneas, el método de la higuera para mantener a raya a las avispas podría ser más draconiano. Así lo cree W.D. Hamilton, en la actualidad colega mío en Oxford y uno de los principales sucesores de Darwin. Hamilton sugiere, sobre la base de observaciones propias en Brasil, que las higueras pueden detectar si un higo ha sido sobreexplotado por las avispas. Los higos con huevos en todas las flores son inútiles desde el punto de vista del árbol. Las avispas han sido demasiado egoístas. Han matado la gallina de los huevos de oro. Mejor dicho, según Hamilton la gallina se suicida. La higuera hace que los higos sobreexplotados caigan al suelo, donde los huevos de avispa que contiene perecen. Es tentador considerar esto como una venganza, y existen modelos matemáticos teóricamente respetables que podrían liberarnos de la sospecha de antropomorfismo. Pero en este caso, lo que el árbol probablemente hace no es tanto infligir venganza como reducir sus propias pérdidas. La maduración de un higo tiene un precio en forma de recursos, y hacer madurar un higo infestado de avispas codiciosas sería un despilfarro. Dicho sea de paso, este tipo de lenguaje estratégico que no rehúye el uso de expresiones tales como «venganza» o «mantener a raya», será recurrente en todo el capítulo. Es legítimo si se usa adecuadamente, lo que casi siempre querrá decir que se está aplicando la teoría matemática de juegos.

Volviendo al ciclo biológico de la avispa de los higos típica, nuestra hembra acababa de escurrirse como Alicia a través de una puerta diminuta para no volver a ver el mundo exterior, y estaba empezando a desprenderse del polen recogido en el higo donde nació. El comportamiento de polinización de la avispa de los higos es tal que parece deliberado. Lejos de dejar que el polen simplemente se desprenda de su cuerpo, como ocurre con la mayoría de insectos polinizadores, la hembra de algunas especies deja su carga con la misma diligencia y atención que derrochó al acumularla. De nuevo utiliza los cepillos de sus

patas anteriores, agitándolos vigorosamente sobre la superficie receptora de la flor femenina.

Con la puesta de sus huevos nuestra avispa pone punto final al relato de su ciclo biológico. Su vida también termina aquí. Se arrastra hasta alguna grieta húmeda del jardín enclaustrado y muere, dejando tras ella megabits de información genética fielmente registrada en sus huevos, y el ciclo continúa.

El relato que he contado, con algunas diferencias de detalle (que enseguida ampliaré), es aplicable a la mayoría de especies de higueras. *Ficus*, el género de las higueras, es uno de los más amplios y diversos del mundo vivo. Además de las dos especies de higueras que producen higos comestibles (para nosotros), el género incluye la higuera del caucho [*F. elástico*], el baniano sagrado o higuera de Bengala [*F. benghalensis*], el árbol bo o higuera de las pagodas (*F. religiosa*), bajo el cual reflexionaba Buda, varios arbustos y plantas trepadoras, y las siniestras higueras «estranguladoras» de los trópicos. Vale la pena contar la historia de las higueras estranguladoras. El suelo de la selva es un lugar oscuro, ávido de energía solar. El objetivo de cada uno de los árboles de la selva es alcanzar el cielo abierto y el sol. Los troncos son ascensores de hojas, dispositivos para elevar paneles solares (las hojas) por encima de la sombra de los árboles rivales. La mayoría de árboles está destinada a morir sin pasar de la fase de plantón. Sólo cuando un árbol viejo se viene abajo, abatido por el viento y los años, tiene oportunidad de crecer algún árbol joven. Este acontecimiento propicio puede que tenga lugar sólo una vez cada cien años. Cuando ocurre, se produce una fiebre del oro en busca del sol. Todos los plantones situados en el área recién despejada, pertenecientes a muchas especies, entablan una temeraria carrera para ser los primeros en ocupar el precioso claro en la bóveda arbórea.

Pero las higueras estranguladoras han encontrado su propio atajo siniestro, y su relato robaría el protagonismo a la serpiente del Génesis (figura 10.3). En lugar de esperar a que muera un árbol residente, lo matan. Una higuera estranguladora empieza su vida como una planta trepadora. Se enrolla alrededor de un árbol vivo de otra especie y crece como una clemátide o rosa trepadora. Pero, a diferencia de una clemátide, los zarcillos de la higuera estranguladora continúan creciendo y haciéndose cada vez más robustos y fuertes. De esta forma estrecha

inexorablemente su abrazo sobre el infortunado huésped, frenando su crecimiento hasta que, al final, consigue el equivalente botánico de un estrangulamiento hasta la muerte. Para entonces la higuera ha crecido hasta una altura respetable, lo que le permite ganar fácilmente la carrera hasta el retazo de luz que el árbol asfixiado ha dejado vacante. El baniano es un tipo de higuera estranguladora con un rasgo añadido notable. Después de haber ahogado a su huésped original, emite raíces aéreas que, al entrar en contacto con el suelo, se convierten en raíces absorbentes típicas, pero que por encima del suelo sirven como tallos adicionales. De esta forma un único árbol se transforma en todo un bosquecillo de hasta 300 metros de diámetro, que puede cobijar un mercado cubierto mediano en la India.

He estado contando historias sobre higos e higueras para, en parte, demostrar que los hechos sobre ellos son, como mínimo, tan cautivadores como cualquier cosa que pudiera desenterrar de la mitología o la literatura mi conferenciante del capítulo 1, pero también para ilustrar un estilo científico de abordar cuestiones que podría servir de ejemplo saludable para aquel diletante literario. Los hechos que he contado tan sumariamente son el producto de muchos años-hombre de trabajo metódico e ingenioso; trabajo que merece la distinción de «científico» no porque haga uso de un aparato complejo o caro, sino porque está disciplinado por una determinada actitud mental. Gran parte del desentrañamiento de la historia de la polinización de la avispa habría implicado sencillamente seccionar higos y mirar en su interior. Pero la palabra «mirar» da una impresión de excesiva pasividad. No se trata de observaciones casuales, sino de una inspección cuidadosamente planificada que proporciona números con los que efectuar cálculos. No se trata sólo de coger higos y rebanarlos; se trata de hacer un muestreo sistemático de higos de gran número de árboles, a alturas fijadas y en determinadas estaciones del año. No basta con mirar las avispas que se retuercen dentro: hay que identificarlas, fotografiarlas, dibujarlas con precisión, contarlas y medirlas; hay que clasificarlas según su especie, sexo y situación dentro del higo; hay que enviar especímenes a museos para su identificación mediante la comparación detallada con patrones reconocidos internacionalmente. No se trata de efectuar medidas y recuentos indiscriminados porque sí, sino con el fin de comprobar hipótesis formuladas previamente; y cuando se observa para comprobar si



Figura 10.3. Higuera estranguladora; (*Página opuesta*) baobab entrelazado por una higuera estranguladora.

los recuentos y medidas encajan con las expectativas de nuestra hipótesis, hay que considerar, con un calculado detalle, la probabilidad de que nuestros resultados sean producto de la casualidad y no signifiquen nada.

Pero volvamos a las avispas de los higos. Como he dicho antes, en el caso de muchas especies los machos cooperan para excavar un agujero a través del cual salen las hembras. ¿Por qué ocurre esto? ¿No sería mejor para un macho concreto —dado que sus colegas van a hacer el agujero— dejar que sean otros los que trabajen? He aquí, en versión microcósmica, un enigma que intriga continuamente a los biólogos: el rompecabezas del altruismo. Un problema adicional importuna al biólogo que pretende explicar el asunto a los no especialistas, y es que el



sentido común rara vez lo percibe como un enigma. Antes de dedicarse a ensalzar lo ingenioso de la solución, el biólogo tiene que persuadir a su audiencia de que efectivamente existía un enigma que requería una solución especial. En el caso concreto de los machos de las avispas de los higos, la razón por la que su cooperación es un enigma es la siguiente. Un macho que se acomodara y dejara a sus colegas el trabajo de hacer el agujero podría dedicar toda su energía a aparearse con las hembras, confiando en que no tendría necesidad de reservarse para el esfuerzo de hacer el agujero. Si lo demás no cambia, los genes de los individuos no cooperativos se propagarán a expensas de los genes para cooperar en la perforación del agujero. Decir que los genes X se propagarán a expensas de los genes Y es equivalente a decir que el rasgo Y

desaparecerá de la escena, suplantado por X. La consecuencia obvia de ello sería que no se excavaría ningún agujero, y todos los machos saldrían perdiendo al final. Pero ésta no es en sí misma una razón para esperar que los machos cooperen. Podría serlo si tuvieran nuestra visión de futuro, pero si asumimos que no la tienen, la selección natural siempre favorecerá el beneficio a corto plazo. Dado que el resto de machos se dedicará a excavar, un individuo de sexo masculino que opte por no cooperar y guardarse su energía gozará de un beneficio a corto plazo. De acuerdo con este argumento, la excavación cooperativa tendría que desaparecer de la población, excluida por la selección natural. El que esto no suceda plantea un enigma. Por suerte es un enigma que, en principio, tiene solución.

Una parte de la solución puede residir en el parentesco: en la elevada probabilidad de que todos los machos de un higo determinado sean hermanos. Los hermanos tienden a compartir copias de los mismos genes. Una avispa macho que ayude a perforar un agujero estará abriendo paso no sólo a las hembras con las que se ha apareado él, sino a las que se han apareado con sus hermanos. Por el agujero saldrán a borbotones copias de los genes que promueven la excavación cooperativa, a caballo de los cuerpos de todas estas hembras. Esta es la razón por la que tales genes persisten, y aquí tenemos una buena explicación de la persistencia de la conducta cooperativa entre los machos.

Pero el parentesco no lo explica todo. No voy a describirlo en detalle, pero hay un elemento en este juego que no tiene conexión con el hecho de ser hermanos, y que se aplica a la cooperación entre la avispa y el higo. Toda la historia de las avispas y los higos sugiere un duro regateo entre confianza y traición, la tentación de desertar castigada con represalias inconscientes. Ya hemos tenido un anticipo de ello en la teoría de Hamilton sobre los higos sobreexplotados que caen al suelo. Como tantas veces, debo hacer la advertencia ritual de que todo este regateo es inconsciente. Esto resulta obvio para la mitad de la historia (la de la higuera), porque ninguna persona en sus cabales puede pensar que las plantas tienen conciencia. Las avispas podrían tenerla o no, pero para los fines de este capítulo trataremos la estrategia de la avispa al mismo nivel que la estrategia palmariamente inconsciente de una higuera.

El jardín cercado es un paraíso cultivado para el beneficio de pequeños insectos, y no puede sorprender que albergue una rica y bulli-



Figura 10.4. Peligros de ser una avispa de los higos. Una hormiga acecha en el exterior de la puerta del jardín, a la espera de que salgan las avispas.

ciosa fauna liliputiense, además de las avispas cuyos servicios de polinización lo hacen posible en último término. Hay abundancia de escarabajos, polillas y moscas miniaturizados, así como ácaros y pequeños gusanos. También hay depredadores que acechan a la puerta misma del jardín, a la espera de sacar provecho de la rica fauna del interior (figura 10.4).

Las avispas genuinamente polinizadoras no son las únicas que viven dentro de los higos y que se agrupan bajo la denominación general de «avispa de los higos». También hay gorriones, parientes lejanos de los polinizadores genuinos y parásitos de éstos. En lugar de penetrar en el higo a través del agujero apical, estas avispas parásitas suelen ser inyectadas en forma de huevo a través de la pared del higo mediante la jeringa hipodérmica espectacularmente larga y delgada que constituye el oviscapto de su madre, único y especializado (figura 10.5). En las profundidades del higo, la punta de la jeringa hipodérmica busca las pequeñas flores en las que han sido depositados los huevos de las avispas polinizadoras genuinas. Una hembra de avispa parásita es una especie de equipo de perforación y funciona como tal; el agujero que excava a través de la pared del higo es, a su propia escala, equivalente

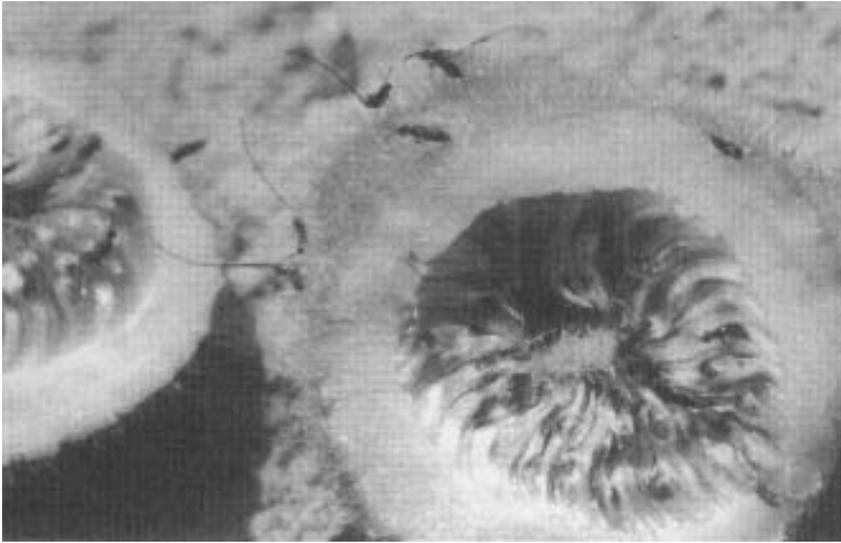


Figura 10.5. Higo seccionado con hembras de avispa parásitas que ondean en el aire sus «equipos de perforación».

a un pozo de 30 metros. Los machos suelen ser ápteros, como los de las verdaderas avispas de los higos (figura 10.6). Para rematar la historia, hay parásitos de segundo orden, avispas que acechan junto a una avispa tipo «equipo de perforación» a la espera de que termine su trabajo. Tan pronto como ésta retira su oviscapto, el hiperparásito introduce el suyo, más modesto, en el agujero e inserta su propio huevo.

Al igual que las propias avispas polinizadoras, las diversas especies parásitas que viven a expensas de ellas participan en complicados juegos de estrategia. Esto fue investigado por el mismo W.D. Hamilton, que trabajó en Brasil con su esposa Christine. A diferencia de las avispas polinizadoras, los machos de las especies parásitas suelen ser alados como las hembras. En algunas especies hay machos alados y machos ápteros, y en otras todos los machos son ápteros. Los machos ápteros, al igual que los de las especies polinizadoras, nunca abandonan su higo natal, dentro del cual luchan, se aparean y mueren. Los machos alados, en cambio, abandonan volando su higo natal junto con las hembras y, una vez fuera, se aparean con cualquier hembra que no lo haya hecho ya. Así pues, hay dos maneras alternativas de ser macho, y en algunas especies se dan ambas. Un hecho interesante es que las

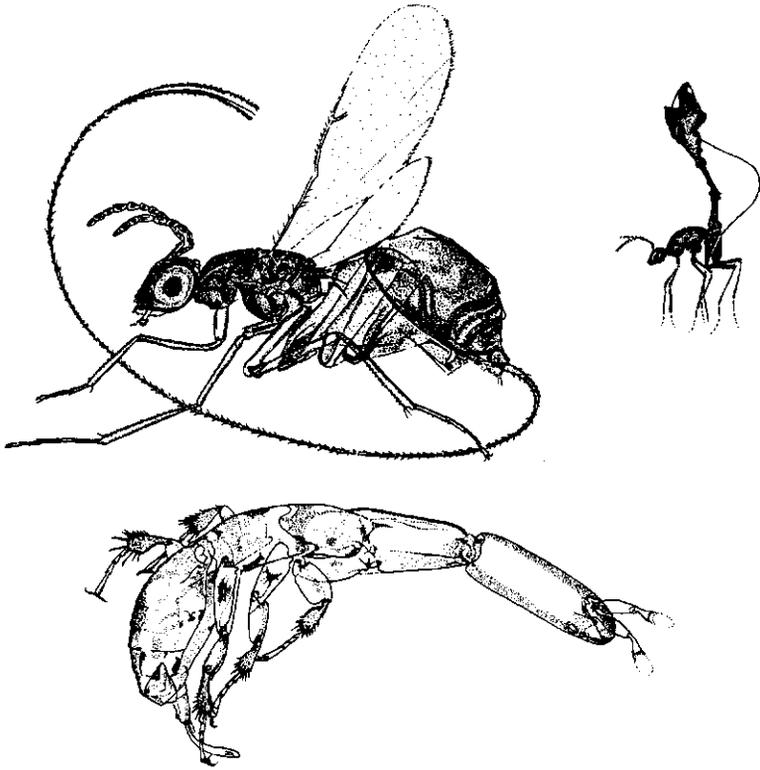


Figura 10.6. Avispas parásitas, *Apocrypta perplexa*, que no realizan la polinización pero sacan provecho del higo, a) Hembra; b) aspecto reducido de la hembra en su posición de «equipo de perforación»; c) macho, sin alas y en apariencia muy distinto de una avispa.

especies más raras frecuentemente son aladas, mientras que las más corrientes tienden a ser ápteras. Esto tiene sentido, porque un macho de una especie corriente tiene muchas posibilidades de encontrar una hembra de su misma especie dentro del mismo higo. En cambio, un macho de una especie rara tiene muchas posibilidades de ser el único miembro de su especie dentro de su higo. Su mejor esperanza de encontrar pareja es salir a buscarla. De hecho, los Hamilton encontraron que los machos alados rehúsan aparearse *hasta* que han abandonado su higo natal.

Desde el punto de vista estratégico, nos interesan especialmente aquellas especies con dos tipos de machos. Los machos alados son casi como un tercer sexo. De hecho, estos machos se *parecen* mucho más a

hembras que a machos ápteros. Tanto las hembras como los machos alados son identificables como avispas, aunque diminutas. Pero los machos ápteros no parecen avispas en absoluto. Muchos poseen mandíbulas con enormes pinzas que hacen que parezcan tijeretas en miniatura que caminan al revés. Parece ser que sólo utilizan estas mandíbulas para luchar, lacerando y tajando hasta la muerte a los machos competidores que les salen al paso mientras patrullan a lo largo y ancho del jardín oscuro, húmedo y silencioso que es su único mundo. El profesor Hamilton nos ofrece una descripción memorable.

«Se diría que su lucha es a la vez cruel y cautelosa; cobarde sería la palabra, solo que, si se piensa en ello, este calificativo parece injusto en una situación que sólo puede equipararse, en términos humanos, a una habitación oscurecida llena de personas que forcejean entre sí y entre las cuales, o bien acechando en alacenas y escondrijos que se abren por todos lados, hay una docena de maníacos homicidas armados con cuchillos. Un mordisco puede ser fatal. Un gran macho de *Idarnes* es capaz de cortar a otro por la mitad de un mordisco, pero con frecuencia una pequeña perforación en el cuerpo resulta letal. La parálisis que sigue con rapidez y regularidad a una pequeña herida sugiere el uso de algún veneno... Si del primer o segundo ataque recíproco no resulta una herida grave, uno de los machos, quizá herido por la pérdida de un pie o sintiéndose de alguna forma superado, se retira e intenta esconderse... Desde esta posición puede morder los pies del vencedor u otro macho que pase por ahí con mucho menos peligro... Una fructificación de un árbol grande de *Ficus* supone probablemente varios millones de muertes en combate».

El fenómeno de una especie con dos tipos distintos de machos no es desconocido en el resto del reino animal, pero nunca es tan pronunciado como en el caso de las avispas parásitas de los higos. Hay machos de ciervo rojo, los llamados mochos, que carecen de cornamenta y, sin embargo, parecen tener una ejecutoria respetable a la hora de reproducirse en competencia con sus rivales cornudos. Los teóricos distinguen dos explicaciones posibles de lo que ocurre en tales casos. Una es la teoría del «de lo perdido, saca lo que puedas». Probablemente es aplicable a una especie de abeja solitaria llamada *Centris pallida*. Los machos de esta especie se pueden clasificar en «rondadores» y «cerneadores». Los rondadores son grandes. Excavan activamente en busca de

hembras que aún no han salido del huevo dentro de sus guarderías subterráneas y se aparean con ellas bajo tierra. Los cernedores son pequeños. No excavan, sino que se ciernen en el aire a la espera de que salgan las pocas hembras voladoras que se dejaron los rondadores bajo tierra. La evidencia sugiere que los rondadores se las arreglan mejor que los cernedores, pero, dado que éstos últimos son machos pequeños con pocas posibilidades de éxito como rondadores, sacan el máximo partido de lo perdido cerniéndose en el aire en lugar de excavar. Como siempre, estamos hablando de una elección genética, no consciente.

La otra teoría que pretende explicar la coexistencia en una misma especie de dos tipos de machos es la del equilibrio estable. La idea aquí es que ambos tipos de macho tienen el mismo éxito cuando coexisten en una proporción equilibrada, estable, en la población. Lo que mantiene el equilibrio poblacional es lo siguiente. Cuando un macho es del tipo más raro se desenvuelve bien, precisamente porque es raro. Por lo tanto, nacen más como él, y en consecuencia su tipo deja de ser raro. Si tienen tanto éxito que se hacen predominantes, el otro tipo de macho, al hacerse relativamente raro, tendrá ventaja, y en consecuencia se hará de nuevo más frecuente. La proporción de machos de uno y otro tipo es regulada casi a la manera de un termostato. He descrito la situación como si diera origen a grandes oscilaciones, pero esto no tiene por qué ser así (la temperatura de una habitación controlada por un termostato no oscila de manera violenta). La proporción estable tampoco tiene por qué ser 50:50. Sea cual sea la proporción de equilibrio, la selección natural sigue empujando la población hacia ella. La proporción de equilibrio es aquella para la que ambos tipos de macho se desenvuelven igualmente bien.

¿Cómo podría algo así surtir efecto en el caso de las avispas parásitas de los higos? Lo primero que hace falta es que las hembras de estas especies tiendan a poner sólo uno o dos huevos en un higo antes de irse a otro (recuerde el lector que introducen su oviscapto desde el exterior). Hay buenas razones para ello. Si una hembra colocara todos sus huevos en un único higo, muy probablemente sus hijas e hijos (ápteros) se aparearían entre sí, y hay buenas razones para pensar que el incesto es indeseable, por lo mismo que las flores evitan la autopolinización. En cualquier caso, es un hecho que las hembras reparten ampliamente su prole entre los higos. Una consecuencia de esto es que,

por azar, habrá cierto número de higos que no contendrá ningún huevo de la especie; y también habrá cierto número de higos que no contendrá ningún huevo masculino y cierto número de higos que no contendrá ningún huevo femenino.

Piénsese ahora en las posibilidades que tiene un macho de avispa áptero. Si eclosiona en un higo sin hembras, no podrá hacer nada. En términos genéticos, es el fin. Pero si en su higo hay algunas hembras, podrá aprovechar la ocasión, aunque sea en competencia con otros machos de su especie (no es de extrañar que estos diminutos machos figuren entre los luchadores mejor armados y más despiadados del reino animal). Si dentro del higo hay algún macho áptero, pocas hembras lo abandonarán sin haber sido fecundadas. Por otra parte, algunos higos tendrán huevos femeninos pero no masculinos. Estas hembras abandonarán el higo sin haber sido fecundadas, y los únicos machos que podrán aparearse con ellas serán los machos alados del exterior.

Así pues, los machos alados sólo podrán prosperar cuando haya higos que contengan avispa hembra pero no machos ápteros. ¿Qué probabilidad hay de ello? Dependerá de lo densa que sea la población de avispas en relación a la de higos, y dependerá también de la fracción de machos alados. Si las avispas son escasas en relación al número de higos, los higos que contengan huevos de avispa estarán muy alejados entre sí, y se puede esperar que haya al menos algunos higos que sólo contengan hembras. Los machos alados se desenvolverán relativamente bien en estas condiciones. Veamos ahora qué ocurre cuando la población de avispas es elevada. En ese caso la mayoría de higos tendrá varias avispas de ambos sexos en su interior. La mayoría de hembras será fecundada por machos ápteros antes de abandonar sus higos, y los machos alados tendrán pocas opciones.

Hamilton hizo cálculos precisos y llegó a la conclusión de que si el número medio de huevos masculinos por higo es, en números redondos, superior a tres, los machos alados casi nunca se reproducirán. A densidades superiores, la selección favorecerá a los machos sin alas. Si el número promedio de huevos masculinos por higo es inferior a uno, los machos ápteros se desenvolverán mal, porque casi nunca se encontrarán compartiendo un higo con otra avispa de su especie, por no decir una hembra. En estas condiciones la selección natural favorecerá la presencia de alas en los machos. A densidades de población in-



Figura 10.7. Un jardín cercado.

termedias, entra en liza la teoría del equilibrio estable y la selección natural favorece una mezcla de machos alados y ápteros en la población.

Una vez se aplica la teoría del equilibrio estable, la selección natural favorece a cualquiera de los dos tipos de macho que se encuentre en minoría o, más bien, a cualquiera de los dos tipos de macho que se encuentre por debajo de la frecuencia crítica, sea cual sea ésta. Podemos decir sucintamente que la selección natural favorece la frecuencia crítica. Esta frecuencia crítica variará de una especie a otra en función de la densidad absoluta de avispas en relación a la de higos. Podemos imaginar las diferentes especies de avispa, con sus diversas densidades avispa/higo, como habitaciones reguladas por un termostato. Cada habitación tiene su termostato ajustado a una temperatura distinta. Por ejemplo, en una especie en la que el número promedio de huevos masculinos por higo sea de tres, la selección natural favorecerá una proporción de machos ápteros cercana al 90%. En una especie en la que el

número promedio de huevos masculinos por higo sea de dos, la selección natural favorecerá una proporción de machos ápteros cercana al 80%. Recuérdese que la condición de la que estamos hablando es un *promedio* de dos machos por higo. Esto no significa que cada higo contenga exactamente dos machos. Habrá higos sin ningún macho, con uno, con dos y con más de dos. El 20% de los machos alados se gana genéticamente la vida no gracias a los higos con dos machos (cuyas hembras probablemente habrán sido fecundadas antes de emprender el vuelo), sino gracias a los higos vacíos de machos.

¿Hay alguna evidencia de que estas avispas se ajusten más a un modelo de equilibrio estable que a uno del tipo «de lo perdido, saca lo que puedas»? La diferencia clave entre una y otra teoría es que en la primera los dos tipos de macho tienen el mismo éxito, lo que no ocurre en la segunda. Los Hamilton encontraron evidencias que sugieren que ambos tipos de macho tienen un éxito equivalente a la hora de aparearse con las hembras. Observaron diez especies distintas, y encontraron que en todas ellas la proporción de machos alados a machos ápteros era aproximadamente igual a la proporción de hembras que abandonaban sus higos natales sin ser fecundadas. Así, una especie en la que el 80% de las hembras abandonaba sus higos natales sin haber perdido la virginidad era también una especie en la que el 80% de los machos tenía alas. Una especie en la que las hembras fecundadas antes de abandonar su higo natal representaban el 70% era también una especie en la que el 70% de los machos carecía de alas. Es como si las proporciones de ambos tipos de machos fueran exactamente las que debieran ser para asegurar una cuota equitativa de hembras para todos. Esto respalda la teoría del equilibrio estable en contra de la teoría del «de lo perdido, saca lo que puedas». Siento que todo esto sea tan complicado, pero así son las cosas en el mundo de los higos.

Dejemos de lado las avispas parásitas y volvamos a las avispas de los higos genuinas, las encargadas de la polinización. Si el lector piensa que la saga de las avispas parásitas es complicada, prepárese para el que va a ser mi último relato. Tengo a gala el procurar explicar de la mejor manera posible temas difíciles y complicados, pero lo que sigue podría derrotarme. Permítaseme poner todo mi empeño en ello y, si fracaso, échesele la culpa a los higos y sus socias las avispas. Aunque, en vez de culparme a mí o los higos o las avispas, uno puede ren-

dirse ante la sutil maravilla de la compleja danza de la evolución a lo largo del tiempo geológico. Costará un poco de trabajo seguir estas páginas finales del libro, pero me gusta pensar que el esfuerzo merece la pena.

Las higueras en las que transcurre la historia que voy a contar son «dioicas». Esto significa que, en vez de producir higos con flores masculinas y femeninas, como las higueras «monoicas» de las que hemos estado hablando hasta ahora, hay árboles masculinos y árboles femeninos. Los árboles femeninos producen higos que solamente contienen flores femeninas. Los árboles masculinos, por su parte, producen higos que contienen flores masculinas. Pero esto no es todo. Estos higos masculinos contienen también flores pseudofemeninas, lo cual es muy importante para las avispas. A diferencia de las flores femeninas verdaderas de los higos femeninos, las flores pseudofemeninas de los higos masculinos no producen semillas aunque sean polinizadas. Están ahí para proporcionar alimento a las crías de avispa, pero —y sobre esto hay mucho que decir— deben ser previamente polinizadas. Las flores femeninas fértiles de los higos enteramente femeninos son un cementerio genético para las avispas, aunque son vitales para la reproducción de las higueras. Las avispas hembras penetran en ellas y las polinizan, pero sus huevos no pueden crecer en su interior.

Tenemos aquí los elementos de un rico juego estratégico describible en términos de los «deseos» (en el particular sentido darwiniano) de los diversos jugadores. Tanto los higos masculinos como los femeninos «desean» que las avispas penetren en ellos, pero éstas sólo desean entrar en los higos masculinos, y sólo por las flores pseudofemeninas nutritivas que contienen. Las higueras masculinas desean que se pongan huevos en sus flores pseudofemeninas para que las crías femeninas que eclosionen se carguen con el polen masculino de sus higos y se lo lleven volando. El árbol no tiene un interés directo en que dentro de sus higos eclosionen avispas masculinas, porque éstas no transportan polen. Esto quizá sorprenda, porque, después de todo, los machos de avispa son necesarios para la continuación de la estirpe de las avispas de los higos. Dada nuestra tendencia a contemplar el futuro y meditar sobre las consecuencias de nuestras acciones, nos resulta difícil desembarazar nuestra mente de la idea de que la selección natural también contempla el futuro. Ya he subrayado esto en otro contexto. Si la

selección natural fuera capaz de hacer planes a largo plazo, animales y plantas tomarían medidas para preservar su estirpe (la suya propia y la de los organismos de los que dependen, ya sean presas ya polinizadores). Pero la naturaleza, a diferencia de los seres humanos provistos de cerebro, es incapaz de prever. Los «genes egoístas» y el beneficio a corto plazo se verán siempre favorecidos en un mundo en el que otros se hagan cargo de las necesidades a largo plazo de la estirpe. Si una higuera concreta pudiera dedicarse impunemente a nutrir sólo hembras de avispa y dejar que las otras higueras se ocuparan de criar los machos necesarios para preservar la estirpe de las avispas, así lo haría. La cuestión es que, mientras los demás árboles estarían produciendo machos de avispa, una única higuera egoísta y rebelde que descubriera una forma de aumentar su producción de hembras de avispa —y con ello la cantidad de polen exportable— tendría ventaja. A medida que pasaran las generaciones, cada vez más higueras se tornarían egoístas, y serían cada vez menos los árboles encargados de criar las avispas macho necesarias. Finalmente, la estirpe de los árboles productores de avispas macho desaparecería, desplazada por sus rivales dedicados a la producción exclusiva de avispas hembra polinizadoras.

Por suerte, no parece que las higueras tengan control alguno sobre la proporción de avispas macho que se crían en sus higos. Si pudieran controlarla, es probable que los machos acabasen desapareciendo y con ellos la estirpe de las avispas de los higos. Naturalmente, en ese caso la estirpe de las higueras se extinguiría junto con sus polinizadoras, lo cual no dejaría de ser una tragedia. La selección natural no puede anticipar tanto. La razón por la cual las higueras no ejercen control alguno sobre la proporción sexual de las avispas es probablemente que éstas, interesadas también en controlar su propia proporción sexual, llevan la voz cantante.

Una higuera femenina también desea (de nuevo en sentido darwiniano) que las avispas hembra penetren en sus higos; de otro modo sus flores femeninas nunca serán polinizadas. Lo que desea una avispa hembra es penetrar en higos masculinos, porque sólo allí encontrará las flores pseudofemeninas en las que pueden crecer sus larvas. Debe huir de los higos femeninos como de la peste, porque si entra en uno de ellos estará genéticamente muerta. No dejará descendientes. Expresado con más rigor, los genes que hagan que las avispas entren en hi-

gos femeninos no serán transmitidos a las generaciones futuras. Si la selección natural operara sólo sobre las avispas, el mundo estaría lleno de avispas que discriminarían los higos femeninos en favor de los higos masculinos con sus deliciosos y pseudofemeninos receptores de huevos.

Una vez más, sentimos la tentación de interrumpir y decir: «Pero seguramente las avispas de los higos debieran desear que algunos de sus individuos penetraran en los higos femeninos porque, aunque constituyan cementerios para los genes de avispas individuales, son vitales para la continuación de la estirpe de las higueras, y si la estirpe de las higueras se extingue, la de las avispas de los higos se extinguirá con ella». Esta es la imagen especular de nuestro razonamiento anterior. Si las avispas de los higos fueran lo bastante tontas, o altruistas, para introducirse en higos femeninos, la selección natural favorecería a cualquier avispa egoísta que descubriera cómo evitar los higos femeninos y entrara sólo en los masculinos. Es seguro que este egoísmo se verá favorecido frente a cualquier inclinación a trabajar abnegadamente por la continuidad de la especie. Entonces, ¿por qué no se extinguen las higueras y las avispas de los higos? No por altruismo o previsión, sino porque el egoísmo en cada lado de la divisoria avispa/higuera es contrarrestado por contramedidas egoístas en el otro bando. Lo que impide que las avispas hembra se comporten de forma egoísta y eviten los higos femeninos es la acción directa emprendida por las propias higueras para frustrar a las avispas potencialmente egoístas. La selección natural ha favorecido tácticas de engaño que hacen que los higos femeninos sean tan parecidos a los masculinos que las avispas no pueden distinguir la diferencia.

Nuestro juego entre avispas e higos tiene una simetría fascinante. En ambos bandos hay oportunidades para que los individuos se comporten de manera egoísta. Si cualquiera de estos dos impulsos egoístas tuviera éxito, tanto las avispas como las higueras se extinguirían. Lo que evita que tal cosa suceda no es la renuncia altruista ni la conciencia de las relaciones ecológicas. Lo que evita que tal cosa suceda es la represión policial directa que ejercen los jugadores individuales sobre la otra parte, actuando en su propio interés egoísta. Si pudieran, las higueras suprimirían las avispas macho, con lo que se asegurarían de paso la extinción de las avispas y la suya propia. Las avispas impiden

que hagan tal cosa, porque les interesa que las higueras críen tanto hembras como machos. Si pudieran, las avispas de los higos evitarían penetrar en los higos femeninos, y con ello se asegurarían la extinción de las higueras y la suya propia. Los árboles impiden que las avispas hagan esto dificultándoles la distinción entre higos masculinos y femeninos.

Para resumir lo dicho hasta aquí, podemos esperar que las higueras masculinas y femeninas hagan todo lo que puedan para atraer a las avispas hacia su propia clase de higo, y podemos esperar que las avispas hagan todo lo que puedan para distinguir los higos masculinos de los femeninos y evitar los segundos. Recuérdese que «hagan todo lo que puedan» significa que, al cabo del tiempo evolutivo, las avispas llegarán a poseer genes que les conferirán una predilección por los higos masculinos. Más retorcida es la expectativa de que tanto las higueras masculinas como las femeninas estarán interesadas en nutrir a las avispas que van a penetrar en los higos del *otro* sexo. Para este complejo razonamiento me estoy basando en un brillante artículo de dos biólogos ingleses: Alan Grafen, uno de los principales teóricos matemáticos del darwinismo moderno, y Charles Godfray, conocido ecólogo y entomólogo.

¿Con qué armas cuentan las higueras para jugar su juego de estrategia? Los árboles femeninos pueden hacer que sus higos tengan un aspecto (y un olor) lo más parecido posible al de los higos masculinos. El mimetismo, como hemos visto en capítulos anteriores, es un fenómeno común en el mundo vivo. Los insectos palo semejan ramitas no comestibles, por lo que son ignorados por las aves. Muchas mariposas comestibles se parecen a mariposas de mal sabor pertenecientes a una especie completamente distinta que las aves han aprendido a evitar. Orquídeas de diversas especies imitan abejas, moscas o avispas. Esta clase de mimetismo ha deleitado a los naturalistas desde el siglo xix, y con frecuencia ha engañado a los coleccionistas con la misma efectividad con que presumiblemente engaña a otros animales. Aunque en el pasado suscitó tanta admiración como incompreensión, hoy en día resulta obvio que el mimetismo, de una perfección casi ilimitada, evoluciona fácilmente por selección natural. Ciertamente cabe esperar un mimetismo de higos masculinos (deseables para las avispas) por parte de los higos femeninos (indeseables para las avispas), pero la secuela

es, por decirlo suavemente, menos evidente y requiere una buena dosis de reflexión: cabe esperar además que los higos masculinos se tomen el trabajo de semejar higos femeninos y oler como ellos. He aquí el porqué.

Una higuera masculina «desea» que las avispas hembra penetren en sus higos y pongan huevos en las flores pseudofemeninas que contiene. Pero el árbol sólo ganará algo con ello si las avispas hembra que posteriormente eclosionen interpretan el papel que les corresponde. Las nuevas hembras deben cargarse de polen, abandonar su higo natal y después (al menos algunas) deben penetrar en el cementerio genético de un higo femenino y polinizarlo (con lo que perpetuarán los genes de la higuera, pero no los suyos propios). Un higo masculino claramente diferenciable de los femeninos puede ayudar a las avispas hembra a conseguir su objetivo de poner sus huevos dentro de flores masculinas. Pero las hijas de estas avispas tenderán a heredar el gusto de sus madres. Las avispas hijas heredarán una preferencia por los higos masculinos, por lo que no servirán para propagar los genes del higo en que nacieron (aunque propagarán eficazmente sus propios genes).

Considérese ahora una higuera masculina rival cuyos higos parezcan femeninos. Quizá le resulte más difícil atraer avispas hembra (pues éstas tenderán a evitar los higos de aspecto femenino), pero aquellas hembras que *consiga* atraer constituirán un conjunto especialmente selecto: serán hembras de avispa que han sido lo bastante necias (desde su propio punto de vista) para introducirse en un higo de aspecto femenino. Como antes, estas avispas pondrán sus huevos en las flores pseudofemeninas. Como antes, sus hijas heredarán el gusto de sus madres. Pensemos ahora cuál será dicho gusto: las avispas madres penetraron, voluntaria y afanosamente, en un higo masculino *que parecía un higo femenino*, y sus hijas heredarán su propensión (absurda desde su propio punto de vista). Estas avispas se lanzarán al mundo en busca de higos de aspecto femenino, y buena parte de ellas se introducirá en higos que, además de parecer femeninos, serán femeninos (lo que equivaldrá a un suicidio genético, pero habrán llevado el polen de la higuera masculina justo donde ésta quería). Estas hembras engañadas tiran por la borda sus propios genes, pero portan en sus cestillos de polen genes de higuera exitosos, entre ellos los encargados de hacer que los higos masculinos imiten higos femeninos. Genes de higuera rivales que ha-

gan que los higos masculinos sean muy distintos de los femeninos también serán transportados en los cestillos de polen de las avispas. Pero esta carga de polen tiene más posibilidades de desperdiciarse (desde el punto de vista de la higuera masculina) en el cementerio genético masculino. De ahí que los higos masculinos «conspirarán» con los femeninos para hacer que las avispas tengan dificultades para discriminarlos y eviten *su* cementerio genético. Los higos masculinos y los femeninos «se pondrán de acuerdo» en «desear» ser indistinguibles unos de otros.

Como exclamó Einstein en cierta ocasión, ¡sutiles el Señor! Pero, si el lector puede resistirlo, el argumento se complica. Las flores pseudofemeninas dentro de los higos masculinos requieren ser polinizadas para proporcionar el alimento que necesita una larva de avispa. No es difícil comprender, desde el punto de vista de una avispa hembra, por qué se carga activamente de polen; no hay dificultad en comprender por qué las hembras poseen cestillos especiales para transportarlo. Al hacer acopio de polen, las hembras de avispa tienen todo que ganar. Lo necesitan para hacer que las flores pseudofemeninas produzcan alimento para sus queresas. Pero Grafen y Godfray señalan que todavía surge un problema en la otra cara de esta notable relación. ¿Por qué razón las flores pseudofemeninas de un higo masculino *necesitan* ser polinizadas antes de poder alimentar a las larvas de avispa? ¿Acaso no sería más sencillo que pudiesen proporcionar alimento a las larvas sin necesidad de ser polinizadas? Los higos masculinos deben alimentar a las larvas de avispa para que éstas lleven su polen hasta los higos femeninos. ¿Por qué insisten entonces las flores pseudofemeninas en ser polinizadas antes de producir alimento?

Imaginemos que una higuera masculina se hiciera menos exigente en virtud de una mutación que relajara este requerimiento y permitiera que las larvas de avispa se desarrollaran en flores no necesariamente polinizadas. Este árbol mutante parecería tener ventaja sobre sus rivales más remilgados, dado que produciría una mayor cosecha de jóvenes avispas. Pensemos en ello. Cualquier higo puede ser visitado por hembras que, por una u otra razón, no lleven nada de polen en sus cestillos. En el higo exigente estas hembras pueden poner huevos, pero las larvas resultantes morirán y de ellas no surgirán avispas jóvenes polinizadoras. Veamos ahora el higo mutante, no exigente. Si es visitado por

una hembra sin polen, no importa: sus larvas crecerán igualmente y se transformarán en avispas jóvenes y sanas. El higo no exigente producirá un mayor lote de avispas jóvenes porque criará la progenie no sólo de las avispas portadoras de polen, sino también de aquellas que no pudieron aportarlo. El higo masculino no exigente tendrá, pues, una clara ventaja sobre el higo masculino exigente, porque producirá un ejército mayor de jóvenes hembras dispuestas a transportar su polen al exterior y al futuro genético. ¿No es así?

No, no lo es, y aquí va la sutileza casi intolerablemente retorcida identificada por Grafen y Godfray. Ese pequeño gran ejército de jóvenes avispas hembra que sale del higo no exigente será ciertamente numeroso. Pero (el razonamiento es como antes) habrán heredado las inclinaciones de sus madres. Ahora bien, estas madres, en especial las de las avispas suplementarias (las que el higo no exigente produce en adición al número de las que producen sus rivales exigentes), tenían un defecto. No habían polinizado la flor en la que crecieron sus larvas porque no habían recolectado polen o por alguna otra razón. Es por esto por lo que las larvas suplementarias son precisamente eso, suplementarias. Las larvas suplementarias tenderán a heredar el defecto de sus madres. Por la razón que sea, tenderán a ser malas polinizadoras. Es casi como si el higo masculino exigente hiciera pasar un examen a las avispas que entran en él. Las pone a prueba para ver si hacen con las flores pseudofemeninas lo que se supone que tienen que hacer con una flor femenina verdadera. Si no lo hacen, no permite que sus larvas se desarrollen. Al hacerles pasar esta prueba, el higo masculino está seleccionando los genes de avispa que tienden a hacer que las hembras transmitan eficazmente los genes de higuera. Grafen y Godfray la denominan «selección vicaria». Es un poco como la selección artificial que vimos en el capítulo 1, pero con alguna diferencia. Las flores pseudofemeninas son como los simuladores de vuelo que se utilizan para eliminar a los pilotos no cualificados para volar en aviones reales.

La selección vicaria es una idea novedosa que proporciona respuestas a problemas todavía más sutiles. Los genes de las higueras y los de las avispas son como una pareja de baile, trabados en un vals vertiginoso a través del tiempo geológico. La mayoría de especies de higuera tiene, como hemos visto, su propia especie de avispa. Las higueras y sus polinizadoras privadas han evolucionado juntas (han *coe-*

volucionado) acompasadamente, y sin seguir el paso de otras especies de higueras y avispas. Hemos visto la ventaja de ello desde el punto de vista de la higuera. Su especie privada de avispa polinizadora es lo último en balas mágicas. Al cultivar una especie de avispa, y sólo una, dirigen su polen estrictamente hacia higos femeninos de su propia especie y ninguna otra. No malgastan polen como lo harían si tuvieran que compartir la misma especie de avispa, una que visitara de forma promiscua todas las especies de higuera. No está tan claro que la lealtad absoluta a una especie de higuera beneficie de la misma manera a las avispas, pero probablemente no tienen elección. Por razones en las que no es necesario entrar, las poblaciones de una especie evolucionan ocasionalmente de manera divergente. En el caso de las higueras, esta divergencia en el tiempo evolutivo bien puede modificar los santos y señas químicos mediante los que las avispas reconocen los higos, y quizá también detalles de tipo llave y cerradura, como la altura de sus diminutas flores. Las avispas se ven forzadas a hacer lo mismo. Por ejemplo, el alargamiento gradual de las flores por parte del higo (cerradura) impone un alargamiento gradual de los oviscaptos por parte de la avispa (llave).

Lo que viene ahora es un problema peculiar reconocido también por Grafen y Godfray. Extendamos la analogía de la cerradura y la llave. Las especies de higuera evolucionan alejándose mutuamente al cambiar sus cerraduras, y las avispas hacen lo mismo con sus llaves. Algo parecido debió ocurrir cuando las orquídeas ancestrales divergieron en orquídeas de abejas, orquídeas de moscas y orquídeas de avispas. Pero en este caso es fácil ver cómo se produjo la coevolución. Las higueras plantean un problema especialmente exasperante, el último que trataré en este libro. Si la historia de las higueras y las avispas se ajustara al plan coevolutivo usual, esperaríamos ver algo parecido a lo que sigue. Entre los higos femeninos se seleccionarían, por ejemplo, genes para flores más altas. Esto crearía una presión de selección en favor de oviscaptos más largos entre las avispas. Pero la extraña historia natural de estas higueras hace que este modelo normal de coevolución no pueda funcionar. Las únicas flores femeninas que transmiten sus genes son las flores femeninas verdaderas, no los floretes pseudo-femeninos que hay dentro de los higos masculinos; en cambio, las únicas hembras de avispa que transmiten sus genes son las que ponen sus

huevos en flores pseudofemeninas, no las que los ponen en flores femeninas verdaderas. Esto quiere decir que aquellas avispas provistas de oviscaptos largos que les permitan alcanzar el fondo de las flores femeninas largas no transmitirán sus genes para oviscaptos largos. Las avispas que transmitirán sus genes serán aquellas cuyos oviscaptos alcancen el fondo de las flores pseudofemeninas. Pero en este caso los genes para flores largas no se transmitirán. Tenemos un nuevo enigma.

De nuevo, la respuesta parece residir en la selección vicaria: simuladores de vuelo precisos para pilotos a prueba. Los higos masculinos «desean» que las avispas que exportan sean eficaces a la hora de polinizar flores femeninas verdaderas. Por lo tanto, en nuestro ejemplo hipotético, desean que tengan oviscaptos largos. La mejor manera de que un higo masculino se asegure de ello es permitir poner huevos en sus flores pseudofemeninas sólo a las madres con oviscaptos largos. Al expresar la idea en los términos de este ejemplo concreto se corre el riesgo de hacer que todo parezca demasiado intencionado, como si los higos masculinos «supieran» que las flores femeninas son altas. La selección natural lo haría automáticamente, favoreciendo aquellos higos masculinos cuyas flores pseudofemeninas se parecieran a flores femeninas verdaderas en todos los aspectos, incluida la altura.

Las higueras y las avispas de los higos ocupan las tierras altas de los logros evolutivos: un pináculo espectacular del monte Improbable. Su relación es tortuosa y sutil hasta casi lo absurdo, tanto que pide a gritos una interpretación en el lenguaje del cálculo deliberado, consciente, maquiavélico. Sin embargo, se consigue en total ausencia de deliberación, sin poder cerebral ni inteligencia de ningún tipo. Podemos asimilarlo porque los actores son, por un lado, una avispa diminuta con un cerebro minúsculo y, por otro, un árbol sin cerebro alguno. Todo es el producto de un ajuste darwiniano inconsciente, cuya intrincada perfección no creeríamos si no la tuviéramos delante de nuestros ojos. Hay en marcha una suerte de cálculo (o, más bien, millones de cálculos paralelos) de costes y beneficios. Los cálculos son de tal complejidad que abrumarían a nuestros mejores ordenadores. Pero el «ordenador» que los está realizando no está hecho de componentes electrónicos, ni siquiera está constituido por componentes neuronales. No se localiza tampoco en un lugar concreto del espacio. Es un ordenador automático y disperso cuyos bits de datos están almacenados en código

de DNA, distribuidos en millones de cuerpos individuales, y que van y vienen de un cuerpo a otro, a través del proceso de reproducción.

En un famoso pasaje, el famoso fisiólogo de Oxford Sir Charles Sherrington comparó el cerebro con un telar encantado:

«Es como si la Vía Láctea emprendiera una danza cósmica. El cerebro se convierte rápidamente en un telar encantado en el que millones de lanzaderas fulgurantes tejen un motivo que se disuelve, un motivo siempre significativo pero nunca duradero; una cambiante armonía de submotivos».

Fue la aparición de los sistemas nerviosos y los cerebros lo que trajo los objetos diseñados al mundo. Los propios sistemas nerviosos, y todos los objetos diseñados, son producto de una danza cósmica más antigua y más lenta. La visión de Sherrington le ayudó a convertirse en uno de los principales investigadores del sistema nervioso en la primera mitad de este siglo. Podemos tomar prestada una visión paralela. La evolución es un telar encantado de códigos de DNA que van y vienen, cuyos motivos evanescentes, a medida que hacen danzar a sus parejas a través del tiempo geológico, tejen una enorme base de datos de sabiduría ancestral, una descripción codificada digitalmente de mundos ancestrales y de lo que costó sobrevivir en ellos.

Pero ésta es una línea de pensamiento que tendrá que esperar a otro libro. La principal lección de éste es que no se puede acceder precipitadamente a las tierras altas de la evolución. Se pueden resolver incluso los problemas más difíciles y se pueden escalar incluso las alturas más escarpadas; sólo hay que encontrar un sendero lento, gradual, escalonado. No se puede tomar por asalto el monte Improbable. Hay que escalarlo siempre de manera gradual, si no lenta.

Apéndices

Procedencia de las ilustraciones

Dibujos de Lalla Ward: 1.7, 1.9, 1.10, 1.13, 1.14, 2.9, 3.1, 3.3, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 5.15, 6.3, 6.4, 6.10, 6.13, 6.15, 7.3, 7.8, 7.15a, 7.16, 8.2, 8.3, 8.6; 1.2 (de Holldobler y Wilson); 1.3 (de Wilson); 1.11 (de Eberhard); 2.6 (de Bristowe); 5.30 (de M. F. Land); 7.10 (de Brusca y Brusca); 7.11 (de *Collins Guide to Insects*); 7.17 (de Brusca y Brusca); 10.6 (de Heijn from Ulenberg).

Imágenes generadas mediante ordenador por el autor (las marcadas con un asterisco están redibujadas por Nigel Andrews): 1.14, 1.15, 1.16, 5.3*, 5.5*, 5.6*, 5.7*, 5.9*, 5.10*, 5.11*, 5.12, 5.20*, 5.28, 6.2*, 6.3*, 6.5, 6.6, 6.8, 6.11, 6.12, 6.14, 7.1, 7.9, 7.12, 7.13, 7.14; por Jeremy Hopes: 5.13.

Heather Angel: 1.5, 1.11b, 5.21, 8.1, Ardea: 1.8 (Hans D. Dossenbach), 1.11a (Tony Beamish), 6.7 (P. Morris), 9.3e (Bob Gibbons). Euan N. K. Clarkson: 5.28. Bruce Coleman: 10.3a (Gerald Cubitt). W. D. Hamilton: 10.1, 10.2, 10.4, 10.5, 10.7. Ole Munk: 5.31. NHPA: 6.1 (James Carmichael Jr). Chris O'Toole: 1.6a y b. Oxford Scientific Films: 1.4 (Rudie Kuitert), 2.1 (Densey Clyne), 5.19 (Michael Leach), 5.19b (J. A. L. Cooke), 10.2b (K. Jell), 10.3b (David Cayless). Portech Mobile Robotics Laboratory, Portsmouth: 9.2. Prema Photos: 8.5 (K. G. Preston-Mafham). David M. Raup: 6.9. Science Photo Library: 9.3a (A. B. Dowsett), 9.3b (John Bavosi), 9.3c (Manfred Kage), 9.3d (David Patterson), 9.6 (J. C. Revy). Dr. Fritz Vollrath: 2.2, 2.3, 2.4, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13. Zefa: 9.1.

1.1 de Micheli, J. (1978) *Simulacra*. Thames & Hudson. Londres.

2.5 de Hansell (1984).

2.7 y 2.8 de Robinson (1991).

2.14 y 2.15 de Terzopoulos *et al.* (1995) © 1995 Massachusetts Institute of Technology.

3.2 cortesía del *Hamilton Spectator*, Canadá.

4.1 cortesía de J. T. Bonner 1965, © Princeton University Press.

5.2 de Dawkins (1986) (dibujo de Bridget Peace).

- 5.4a, b y d, 5.8a-e, 5.24a y b de Land (1980) (redibujado de Hesse, 1899).
- 5.4c de Salvini-Plawen y Mayr (1977) (según Hesse, 1899).
- 5.16a y b de Hesse, *Untersuchungen über die organe der Lichtempfindung bei niederen thieren*, *Zeitschrift für Wissenschaftliche Zoologie*, 1899.
- 5.17, 5.19d y e, 5.25, 5.26 cortesía de M. F. Land.
- 5.18a y f, 5.27, 5.30 dibujos de Nigel Andrews.
- 5.22 dibujo de Kuno Kirschfeld, reproducido con autorización de *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Stuttgart.
- 5.23 cortesía de Dan E. Nilsson de Stavenga & Hardie (eds.) (1989).
- 5.29a-e cortesía de Walter J. Gehring *et al.*, de Georg Halder *et al.* (1995).
- 6.16 de Meinhardt (1995).
- 7.2, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 de Ernst Haeckel (1904) *Kunstformen der Natur*. Leipzig y Viena: Verlag des Bibliographischen Instituts.
- 7.15b de Raff y Kaufman (1983) (según Y. Tanaka, «Genetics of the Silkworm», en *Advances in Genetics*, 5:239-317, 1953).
- 8.4 de Wilson (1971) (de Wheeler, 1910, según F. Dahl).
- 9.4 Jean Dawkins.
- 9.5 © K. Eric Drexler, Chris Peterson y Gayle Pergamit. Reservados todos los derechos. Reproducido con autorización de *Unbounding the Future: The Nanotechnology Revolution*. William Morrow, 1991.

Bibliografía

Libros citados en el texto y sugerencias para lecturas adicionales

- Adams, D., *The More than Complete Hitchhiker's Guide*, Wings Books, Nueva York, 1989.
- Attenborough, D., *Life on Earth*, Collins, Londres, 1979
- Attenborough, D., *The Living Planet*, Collins/BBC Books, Londres, 1984. (Trad, esp.: *El planeta viviente*, Salvat, Barcelona, 1987.)
- Attenborough, D., *The Private Life of Plants*, Collins/BBC Books, Londres, 1995. (Trad, esp.: *La vida privada de las plantas*, 1995.)
- Basalla, G., *The Evolution of Technology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988. (Trad, esp.: *La evolución de la tecnología*, Crítica, Barcelona, 1991.)
- Berry, R.J. & Hallam, A., eds., *Collins Encyclopedia of Animal Evolution*, Collins, Londres, 1986.
- Bonner, J.T., *The Evolution of Complexity*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1988.
- Bristowe, W.S., *The World of Spiders*, Collins, Londres, 1958.
- Brusca, R.C. & Brusca, G.J., *Invertebrates*, Sinauer, Sunderland, Mass, 1990.
- Carroll, S.B., «Homeotic genes and the evolution of arthropods and chordates», *Nature*, 376 (1995), págs. 479-485.
- Coveney, P. & Highfield, R., *Frontiers of Complexity*, Faber & Faber, Londres, 1995.
- Cringley, R.X., *Accidental Empires*, Viking, Londres, 1992.
- Cronin, H., *The Ant and the Peacock*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- Dance, S. P., *Shells*, Dorling Kindersley, Londres, 1992.
- Darwin, C., *The Origin of Species* (1859), Penguin, Harmondsworth, 1968. (Trad, esp.: *El origen de las especies por medio de la selección natural*, Bruguera, Barcelona, 1967.)
- Darwin, C., *The Various Contrivances by Which Orchids are Fertilised by Insects.*, John Murray, Londres, 1882.
- Dawkins, R., *The Extended Phenotype*, W.H. Freeman, Oxford, 1982.
- Dawkins, R., *The Blind Watchmaker*, Longman, Harlow, 1986. (Trad, esp.: *El relojero ciego*, Labor, Barcelona, 1988.)
- Dawkins, R., «The evolution of evolvability», en C. Langton, ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley, Santa Fe, 1989.

- Dawkins, R., *The Selfish Gene* (2ª ed.), Oxford University Press, Oxford, 1989. (Trad. castellana: *El gen egoísta*, Labor, Barcelona, 1979.)
- Dawkins, R., *River Out of Eden*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1995.
- Dennett, D.C., *Darwin's Dangerous Idea*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.
- Douglas-Hamilton, I. & Douglas-Hamilton, O., *Battle for the Elephants*, Doubleday, Londres, 1992.
- Drexler, K.E., *Engines of Creation*, Anchor Press/Doubleday, Nueva York, 1986. (Trad. esp.: *La nanotecnología*, Gedisa, Barcelona, 1993.)
- Eberhard, W.G., *Sexual Selection and Animal Genitalia*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1985.
- Eldredge, N., *Reinventing Darwin: The great debate at the high table of evolutionary theory*, John Wiley, Nueva York, 1995.
- Fisher, R.A., *The Genetical Theory of Natural Selection*, Dover, Nueva York, 1958
- Ford, E.B., *Ecological Genetics*, Chapman & Hall, Londres, 1975.
- Frisch, K.v., *Animal Architecture*, Butterworth, Londres, 1975.
- Fuchs, P. & Krink, T., *Modellierung als Mittel zur Analyse räumlichen Orientierungsverhaltens*, Tesis doctoral, Universidad de Hamburgo, 1994.
- Goodwin, B., *How the Leopard Changed its Spots*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1994. (Trad. española: *Las manchas del leopardo*, Tusquets Editores, Barcelona, 1998.)
- Gould, J.L. y Gould, C.G., *The Honey Bee*, Scientific American Library, Nueva York, 1988.
- Gould, S.J., *Hen's Teeth and Horse's Toes*, W.W. Norton, Nueva York, 1983. (Trad. española: *Dientes de gallina y dedos de caballo. Reflexiones sobre historia natural*, Crítica, Barcelona, 1995.)
- Grafen, A. & Godfray, H.C.J., «Vicarious selection explains some paradoxes in dioecious fig-pollinator systems», *Proceedings of the Royal Society of London, B*, 245 (1991), págs. 73-76.
- Gribbin, J. & Gribbin, M., *Being Human*, J.M. Dent, Londres, 1993.
- Haeckel, E., *Art Forms in Nature*, Dover, Nueva York, 1974.
- Haldane, J.B.S., *On Being the Right Size* (J. Maynard Smith, ed.), Oxford University Press, Oxford, 1985.
- Haider, G., Callaerts, P. & Gehring, W.J., «Induction of ectopic eyes by targeted expression of the *eyeless* gene in *Drosophila*», *Science*, 267 (1995), págs. 1788-1792.
- Hamilton, W.D., *Narrow Roads of Gene Land: The collected papers of W.D. Hamilton, Vol. I. Evolution of Social Behaviour*, W.H. Freeman/Spektrum, Oxford, 1996.
- Hansell, M. H., *Animal Architecture and Building Behaviour*, Longman, Londres, 1984.
- Hayes, B., «Space-time on a seashell», *American Scientist*, 83 (1995), págs. 214-218.
- Heinrich, B., *Bumblebee Economics*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1979.

- Hölldobler, B. & Wilson, E.O., *The Ants*, Springer, Berlin, 1990.
- Hoyle, F., *Evolution Front Space*, J.M. Dent, Londres, 1981.
- Janzen, D., «How to be a fig», *Annual Review of Ecology and Systematics*, 10 (1979), págs. 13-51.
- Kauffman, S., *At Home in the Universe*, Viking, Harmondsworth, 1995.
- Kettlewell? H.B.D., *The Evolution of Melanism*, Oxford University Press, Oxford, 1973.
- Kingdon, J., *Self-made Man and His Undoing*, Simon & Schuster, Londres, 1993.
- Kingsolver, J.G. & Koehl, M.A.R., «Aerodynamics, thermoregulation, and the evolution of insect wings: differential scaling and evolutionary change», *Evolution*, 39 (1985), págs. 488-504.
- Land, M.F., «Optics and vision in invertebrates», en H. Autrum, ed., *Handbook of Sensory Physiology VII/6B*, Springer, Berlin, 1980, págs. 471-592.
- Langton, C.G., ed., *Artificial Life*, Addison-Wesley, Nueva York, 1989.
- Lawrence, P.A., *The Making of a Fly*, Blackwell Scientific Publications, Londres, 1992.
- Leakey, R., *The Origin of Humankind*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1994. (Trad. esp.: *La formación de la humanidad*, Serbal, Barcelona, 1991.)
- Lundell, A., *Virus! The secret world of computer invaders that breed and destroy*, Contemporary Books, Chicago, 1989.
- Macdonald, D., ed., *The Encyclopedia of Mammals* (2 vols.), Allen & Unwin, Londres, 1984.
- Marden, J.H. & Kramer, M.G., «Locomotor performance of insects with rudimentary wings», *Nature*, 377 (1995), págs. 332-334.
- Margulis, L., *Symbiosis in Cell Evolution*, W.H. Freeman, San Francisco, 1981.
- Maynard Smith, J., *Did Darwin Get it Right?*, Penguin Books, Harmondsworth, 1988.
- Maynard Smith, J., *The Theory of Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- Maynard Smith, J. & Szathmáry, E., *The Major Transitions in Evolution*, Freeman/Spektrum, Oxford, 1995.
- Meeuse, B. & Morris, S. *The Sex Life of Plants*, Faber & Faber, Londres, 1984.
- Meinhardt, H., *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, Springer, Berlin, 1995.
- Moore, R.C., Laiicker, C.G. & Fischer, A.G., *Invertebrate Fossils*, McGraw-Hill, Nueva York, 1952.
- Nesse, R. & Williams, G.C., *Evolution and Healing: The New Science of Darwinian Medicine*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1995. (Publicado asimismo como *Why We Get Sick*, Random House, Nueva York, 1995.)
- Nilsson, D.-E., «Vision, optics and evolution», *Bioscience*, 39 (1989), págs. 298-307.
- Nilsson, D.-E., «Optics and evolution of the compound eye», en D.G. Stavenga & R.C. Hardie, eds., *Facets of Vision*, Springer, Berlin, 1989.
- Nilsson, D.-E. & Pelger, S., «A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve», *Proceedings of the Royal Society of London, B*, 256 (1994), págs. 53-58.

- Orgel, L.E., *The Origins of Life*, Chapman & Hall, Londres, 1973. (Trad, esp.: *Los orígenes de la vida*, Alianza Editorial, Madrid, 1975.)
- Pennycuik, C.J., *Animal Flight*, Edward Arnold, Londres, 1972.
- Pennycuik, C.J., *Newton Rules Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Pinker, S., *The Language Instinct*, Harmondsworth, Viking, 1994. (Trad, esp.: *El instinto del lenguaje*, Alianza Editorial, Madrid, 1996.)
- Provine, W.B., *Sewall Wright and Evolutionary Biology*, Chicago University Press, Chicago, 1986.
- Raff, R.A. & Kaufman, T.C., *Embryos, Genes and Evolution*, Macmillan, Nueva York, 1983.
- Raup, D.M., «Geometric analysis of shell coiling: general problems», *Journal of Paleontology*, 40 (1966), págs. 1178-1190.
- Raup, D.M., «Geometric analysis of shell coiling: coiling in ammonoids», *Journal of Paleontology*, 41 (1967), págs. 43-65.
- Ridley, Mark, *Evolution*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993. (Trad, esp.: *La evolución y sus problemas*, Pirámide, Madrid, 1987.)
- Ridley, Matt, *The Red Queen: Sex and the evolution of human nature*, Viking, Harmondsworth, 1993.
- Robinson, M.H., «Niko Tinbergen, comparative studies and evolution.», en M.S. Dawkins, T.R. Halliday y R. Dawkins, eds., *The Tinbergen Legacy*, Chapman & Hall, Londres, 1991.
- Ruse, M., *Darwinism Defended*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1982.
- Sagan, C. & Druyan, A., *Shadows of Forgotten Ancestors*, Random House, Nueva York, 1992. (Trad, esp.: *Sombras de antepasados olvidados*, Planeta, Barcelona, 1993.)
- Salvini-Plawen, L. v. y Mayr, E., «On the evolution of photoreceptors and eyes», en M.K. Hecht, W.C. Steere y B. Wallace, eds., *Evolutionary Biology*, 10, Plenum, Nueva York, 1977, págs. 207-263.
- Terzopoulos, D., Tu, X. & Grzeszczuk, R., «Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world», *Artificial Life*, 1 (1995), págs. 327-351.
- Thomas, K., *Man and the Natural World: Changing Attitudes in England 1500-1800*, Penguin Books, Harmondsworth, 1983.
- Thompson, D'A., *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1942. (Trad, esp.: *Sobre el crecimiento y la forma*, Blume, Madrid, 1980.)
- Trivers, R.L., *Social Evolution*, Benjamin/Cummings, Menlo Park, 1985.
- Vermeij, G.J., *A Natural History of Shells*, Princeton University Press, Princeton, NJ., 1993.
- Vollrath, F., «Untangling the spider's web», *Trends in Ecology and Evolution*, 3 (1988), págs. 331-335.
- Vollrath, F., «Analysis and interpretation of orb spider exploration and web-building behavior», *Advances in the Study of Behavior*, 21 (1992), págs. 147-199.
- Vollrath, F., «Spider webs and silks», *Scientific American*, 266 (1992), págs.

- 70-76 (Trad, castellana: «Telas y sedas de araña», *Investigación y ciencia*, 188, págs. 52-59)
- Watson, J.D., Hopkins, N.H., Roberts, J.W., Steitz, J.A. & Weiner, A.M. *Molecular Biology of the Gene* (4^a ed.), Benjamin/Cummings, Menlo Park, 1987. (Trad, esp.: *Biología molecular*, Aguilar, Madrid, 1978.)
- Weiner, J., *The Beak of the Finch*, Jonathan Cape, Londres, 1994.
- Williams, G.C., *Natural Selection: Domains, Levels and Challenges*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Wilson, E.O., *The Insect Societies*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1971.
- Wolpert, L., *The Triumph of the Embryo*, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- Wright, S., «The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution», *Proceedings 6th International Congress of Genetics*, 1 (1932), págs. 356-366.

Índice onomástico y de materias

Los números en cursiva remiten a ilustraciones

- Abeja(s)
 - albañil, 25
 - visión ultravioleta, 284
 - y néctar, 283
- aberración esférica, 197
- abocinamiento, 225, 6.4, 6.5
- acacias y hormigas, 290
- accidente y designio, 14
- Adams, Douglas, 282
- agaónidos, 329
- agua
 - retorno al, 149
 - vida en el, 150
- águilas, 147
- alas, 12
 - de aves y aeroplanos, 146
 - de insecto, 265, 332
 - como paneles solares, 132
 - de semillas, 8.6
 - eficiencia aerodinámica, 131
 - propagadoras de instrucciones genéticas, 299
- aleteo, 146-147
- altruismo, 336-337
- Ampelisca*, 5.23
- animal(es)
 - «estatua», 17
 - grandes frente a pequeños, 129
 - pequeños y flotación en el aire, 130
 - regreso al agua, 149-151
 - voladores, 129-130
- antropocentrismo, 283
- Araneus diadematus*, 54
- araña(s)
 - apareamiento, 60, 65, 76
 - boleadora, 68, 69
 - captura de insectos, 62
 - depredadores, 59
 - diferencias entre sexos, 59
 - envenenamiento de la presa, 64
 - filamento de apareamiento, 2.5
 - machos: conductas de apareamiento, 60, 2.6
 - problemas que tienen que resolver, 53-63
 - saltadoras, 193
 - solución al problema de «gol en propia puerta», 53-54
- telas, 12, 49, 85
 - ajuste fino, 61-62
 - construcción, 54-59
 - economía, 52
 - eficiencia, 49
 - en escalera, 2.7
 - evolución en NetSpinner, 2.12
 - pegajosidad, 2.4
 - radios, 56
 - rendimiento, 80
 - selección natural y, 48
 - simulación, 69-81
 - tensión óptima, 67
 - trampa de resorte, 65
- árboles
 - acacias y hormigas, 290
 - evolución del vuelo y, 133-134
 - higos y avispas, 288
 - informáticos, 1.15
- ardillas voladoras, 137
- artefactos animales, 27
- artromorfos
 - efectos genéticos, 7.13
 - segmentados, 7.12

- selección artificial, 272
- zoológico de, 7.14
- artrópodos
 - estructura corporal, 266
 - genes calidoscópicos, 279
 - segmentos repetidos, 7.10
 - variación de segmentos, 7.17
- asimetría, evolución de la, 252-253
- Asimov, Isaac, 92
- atrapamoscas (*Dionaea muscipola*), 22
- aves
 - alas de las, 146
 - comienzos del vuelo, 144
 - como descendientes de los dinosaurios, 142
 - no voladoras, 147
 - trayectoria evolutiva de las, 145
- avispas
 - alfareras, 25, 1.6
 - egoísmo, 349
 - higos, coevolución, 287, 329, 335, 337-338, 349, 354
 - machos alados, 344
 - machos ápteros, 344, 346
 - parásitas, 339, 10.6
 - presa de arañas, 64
 - receptáculos diseñosidos, 24-25
- azar, 93-94, 116

- bacterias, como robots PRIOR, 314
- ballenas, 149, 4.6
 - ascendencia terrestre, 153
- bastones retinianos, 5.2, 192-193
- Bathylchnops exilis*, 5.31
- Bauplan*, 250
- Bennet-Clark, Henry, 250
- biomorfos, 40-48, 7.9
 - árboles, 40-41, 1.15
 - coloreados, 42, 47
 - embriología de, 249-250
 - espejos calidoscópicos, 7.1
 - país de los, 221
 - Relojero Ciego y, 1.16
 - selección artificial de, 41-42
- Biston betularia*, 102
- Brassica oleracea*, 1.13, 36-38
- buitres, 146-148
- bulldog, 1.14

- caballo (como vehículo para el DNA), 9.4
- calamar
 - evolución independiente de los ojos, 164
 - volador, 141
- California, Universidad de, 130
- Callaerts, Patrick, 213
- cangrejo de río, espermatozoide, 7.3
- caras
 - afán humano por ver, 32-34
 - mimetismo en insectos, 32-34
- Caracolero Ciego, 233
- célula(s)
 - código máquina de, 297-298
 - eucariota, 314-315
 - fotosensibles, 186
 - generaciones de, 319
 - principios, 315
 - retinales, 5.2
 - sensibles a la luz, 186
- chiuhua, 1.14
- ciempiés, segmentación del, 263
- clasificación de las especies, 122
- coevolución de avispas e higos, 288, 329, 335-338, 349, 354
- col silvestre, 1.13, 36
- colmillos de elefante, fosilización, 108-110
- concha(s)
 - abocinamiento, verma y espira, 225, 6.4
 - de peregrino (ojos), 197
 - formas, 6.10
 - informáticas, 222, 6.5, 233
 - selección artificial, 6.11
 - semejanza con conchas reales, 6.13
 - radiografías, 6.6
 - teóricas, 6.14
 - tubulares, 224
- conos retinianos, 192-193
- consorcios, flores y abejas, 289
- creacionistas
 - blanco favorito, 156

- cita favorita, 218
- clasificación de las especies, 122
- crecimiento exponencial, 318, 321
- cristalino
 - como remedio de los defectos de la cámara oscura, 196
 - evolución, 174, 180-183, 191-192
- curruca costurera (*Orthotomus sutorius*), 1.7
- Darwin, Charles
 - modelo de la selección natural basado en la selección artificial, 42-45
 - sobre el ojo, 157-158
 - teoría de la evolución, 87-88
- darwinismo
 - azar y, 89-90, 93-94
 - el problema de la improbabilidad, 92
 - herencia y, 106
 - malinterpretado, 94
 - selección natural no aleatoria, 89
 - «de lo perdido, saca lo que puedas», teoría, 342
 - y teoría del equilibrio estable, 345
- defectos genéticos, 112
- delfín (evolución convergente), 1.10
- Dennett, Daniel, 221
- designio
 - ilusión de, 249
 - y accidente, 14-15
- diatomeas, espejos calidoscópicos, 7.4
- difracción, 171
- dimensiones
 - cuatro, 222
 - dos, y física de la vida real, 48
- dinosaurios, 142
- Dios
 - como montañero, 91
 - control sobre la naturaleza, 88
- diseñoides, objetos
 - de «segundo orden», 28
 - definición, 15
 - trampas, 22
- DNA, 12
 - en árboles, 41
 - huéspedes del, 294, 301
 - vehículos robot para el, 9.4
- vírico, 300, 301
- y crecimiento exponencial, 321
- y herencia, 104
- Douglas-Hamilton, Iain, 106
- Douglas-Hamilton, Oria, 107
- dragón de mar foliáceo (*Phycodurus eques*), 17-18
- Drexler, Eric, 322
- Drosophila*
 - genes del ojo, 211
 - mutaciones homeóticas, 273-274
- duplicación local, 318
- «Duplícame», programa, 295, 309, 325
- Eberhard, William, 65
- Edmonds, Donald, 70
- eficiencia
 - de alas, 131
 - de cuchillos, 20
 - de objetos naturales, 18-21
 - de ojos, 181
 - de telarañas, 49
 - medidas de, 20
- Eldredge, Niles, 121
- elefantes (evolución de la trompa), 12, 106-108
- embriología
 - calidoscópica, 247-279
 - de biomorfos, 249
 - de insectos, 247
 - de mamíferos, 247
 - en modelos de evolución, 182
 - mutaciones dependientes de la, 247
- embriones
 - calidoscópicos, 247-279
 - cambios en, 118
- enfoque, mecanismos de, 186, 186-188
- enzimas, improbabilidad de los, 89
- epífitos, 290
- equilibrio estable, teoría del, 343, 345
- equilibrio interrumpido, 121
- equinodermos
 - biomorfos semejantes a, 260, 7.9

- simetría pentarradiada, 258
- erizos, 1.9
- escarabajos imitadores de hormigas, 1.2,1.3
- escarabajos, mimetismo, 1.2, 1.3
- espacio genético, 221
- espejos de simetría, 7.8
- espinazo, flexión del, 142
- espira (conchas), 225, 226, 6.4
- estatuas
 - animales, 17
 - diseñoides, 18
- estrés
 - incremento de las tasas de mutación, 100
 - y mutación, 96-97
- eucariotas, células, 314
- evolución
 - coevolución, 353-354
 - convergente, 1.10,29
 - ingredientes necesarios de la, 102
 - irreversible, 154
 - macromutaciones y, 114
 - recetas para la, 156
 - retorno al viejo modo de vida, 149
 - rutas alternativas, 154
- factor de conversión, de proteína de seda en moscas, 80
- falangero planeador pigmeo, 4.2
- fecundación cruzada, 284
- Fisher, R.A., 93, 118
- física
 - del vuelo, 125, 146-147
 - real, no bidimensional, 46
 - simulada, 81
- flores
 - de higos, 328
 - estrategias de polinización, 287
 - propósito de las, 281-294
 - transmisión de DNA, 300
- flotación en el aire, 129
- fósiles
 - clasificación, 122
 - como evidencia de la evolución, 106-107
 - de elefantes, 108, 110
- fotocélulas, 161, 5.2
- fotones
 - economía de, 165
 - naturaleza aleatoria de los, 163
 - tecnologías de percepción remota, 157
- fotosensibilidad, evolución preliminar, 186-187
- fotosíntesis, 161
- Fuchs, Peter, 71
- fuego, reproducción del, 102-103
- galgo, 1.14
- Gehring, Walter, 211-215
- generaciones celulares, 320
- genes
 - caleidoscópicos, 277
 - climas genéticos, 101
 - control de la tasa de mutación, 97
 - de artromorfos, 268
 - de los ojos de los mamíferos, 213-217
 - efectos sobre el embrión, 118
 - efectos fenotípicos, 118
 - evolución espontánea, 268
 - gradiente, 272
 - instrucciones de DNA, 326
 - modificadores, 120
 - nomenclatura, 211-212
 - para la excavación cooperativa, 338
 - programa «Duplícame», 324
 - «pulido» de mutaciones, 120
 - recombinación sexual, 98
 - segmento, 270
 - tagma, 270
 - trasfusiones de, 156
 - variación, 220
- geodas (piedras diseñoides), 19
- Gigantocypris*, visión, 196, 5.18
- Godfray, Charles, 350
- Goldschmidt, Richard, 113
- Gould, Stephen Jay, 121
- Grafen, Alan, 350
- gran danés, 1.14
- Grzeszczuk, Radek, 82-83
- gusano de Internet, 297

- gusanos primitivos (ojos compuestos), 5.24
- Haeckel, Ernst, 255
- Halder, George, 213
- Halley, cometa, 162,163
- halterios, 77.11
- Hamilton, W.D., 333, 340, 341
- Hardy, Alister, 196
- hemoglobina, 92
- heredabilidad, 184
- herencia
 - darwinismo y, 106
 - DNA y, 104-105
 - reproducción y, 102
- hierbas, 293
- higo(s) (*Ficus* sp.), 11-12, 327, 334-337
 - coevolución con las avispas, 288, 329, 335-336, 349, 353-354
 - dioicos, 347
 - en copa, 328
 - en la literatura, 11
 - flores masculinas y femeninas, 328, 333
 - masculinos y femeninos, 351
 - mimetismo, 350, 351
 - polinizadores, 328
 - poros, 332
- higuera estranguladora, 334
- hormigas
 - «jardines» de, 289-290
 - acomodo para, 8.4
 - y acacias, 290
- Hoyle, Fred, 89, 116
- Hyptiotes* (araña), 66
- imaginación, 28
- impresora «3-D», 304-305
- índice de refracción, 174-175
- inmunoglobulinas, 324
- insectos
 - eficiencia de captura, 49
 - jardín cercado para beneficio de, 338
 - lentes, desarrollo, 5.16
 - ojo compuesto, 166
 - plantas insectívoras, 21-22
 - receptáculos de, 25
 - vuelo, 131
- Internet, gusano de, 297
- invertebrados, evolución independiente del ojo, 164
- jirafa (alargamiento del cuello), 116, 3.3
- Juniper, Barrie, 21
- Kaehler, Ted, 267, 272
- Kelvin, Lord, 90
- Kettlewell, Bernard, 102
- Kingdon, Jonathan, 51
- Kingsolver, Joel, 130-131
- Kirby, William, 281
- Kirschfeld, Kuno, 5.22
- Koehl, Mimi, 130-131
- Krink, Thiemo, 71
- Land, Michael, 193, 216
- Langton, Christopher, 81
- langostas, 274, 276
- lentes
 - complejas, 5.13, 179-180
 - desarrollo, 5.16
 - informáticas, 5.8
 - principios, 167
- liebre saltadora (*Pedetes capensis*), 4.5
- Lin, Lorraine, 70
- lobo (selección artificial), 4.5
- luz
 - captación, 166
 - desviación, 172-175
 - refracción, 5.10
 - ultravioleta, 284
- Machina speculatrix* (robot «tortuga»), 307
- machos, dos tipos, 342
- macromutaciones, 111, 115-116
- desconexión con el equilibrio puntuado, 121-122
- importancia evolutiva, 114
- selección natural y, 112,277

- tipos, 116
- mariposas y polillas, 64
 - evolución, 102
 - presa de arañas, 64,68
- masa vitrea, 178-180
- Mastophora* (araña), 68
- Maynard Smith, John, 110
- Medawar, Peter, 250
- medusas
 - hexarradiadas, 7.7
 - tetrarradiadas, 7.2
- Meinhardt, Hans, 241-242
- mimetismo, 16
 - de caras en insectos, 32-34
 - entre ojo humano y cámara fotográfica, 28
- «monstruo prometedor», teoría del, 113-114
- Monte Improbable
 - parábola del, 87
 - región del ojo, 5.30
- More, Henry, 282
- mosca(s)
 - halterios, 7.11
 - segmentación, 264
 - y telarañas, 80
- MoveWatch, programa, 11,2.10
- Muller, trinquete de (explicación del sexo), 99
- Museo de Historia Natural de Londres, 12
- Museo de Todas las Conchas, 231, 233, 236, 240
- Museo de Todos los Animales Posibles, 222
- mutaciones
 - aleatorias en el darwinismo, 93
 - buenas y malas, 99
 - controladas genéticamente, 97
 - dirigidas, 95
 - homeóticas, 273, 7.15
 - no aleatorias, 95
 - presión de selección y, 97
 - «pulido» subsiguiente, 120
 - selección natural y, 100,112, 247
 - sesgadas, 94
 - véase también* macromutaciones
- nanotecnología, 9.5
 - inmunoglobulinas y, 324
- néctar
 - combustible para insectos, 286
 - «soborno» de abejas, 283
- Nepenthes pervillei* (planta insectívora), 21, 22, 1.5
- Nesse, Randolph, 321
- NetSpinner, simulador, 182
 - telarañas teóricas, 71-80, 2.12
- Nilsson, Dan, 182-186, 202, 211, 216-217
- noriega (*Raja batís*), 4.7
- número de la hemoglobina, 92
- O'Toole, Christopher, 25
- ojo(s), 157-218
 - compuesto, 166,197
 - de aposición, 5.20
 - definición, 200-201
 - primitivo, 5.24
 - principio, 200-201
 - superposición; 208, 5.27
 - con cristalino
 - de arañas saltadoras, 193
 - tasa de evolución, 211
 - de caracoles, 160, 15.7
 - de espejo, 195-197, 5.20
 - de invertebrados, 5.8
 - disposición de las partes, 92
 - doble, 5.31
 - en copa, 166-169, 5.4
 - dirección de la luz, 5.3
 - invertido, 5.20
 - problemas, 169
 - enfoque, 186-187
 - evaluación de la eficiencia, 181
 - genes mutantes, 213-215
 - intermedios, 202
 - modelo de evolución del, 183-184, 5.14
 - no formadores de imágenes, 160
 - problemas que plantea al evolucionismo, 156
 - según Darwin, 157-158
 - semejanza con una cámara, 28
 - tamaño necesario, 159

- tipo cámara oscura, 169-171-9
 - defectos, 193
 - difracción, 171
- tipos, 158
- okapi (como ancestro de la jirafa), 3.3, 117
- omatidios, 201, 205-206
- orquídea(s)
 - de balde, 286
 - ibérica, 8.2
 - martillo, 8.3
 - miméticas, 8.2
- orugas
 - patas, 264
 - segmentación, 263, 264
- Paecilopachys* (araña), 68
- Pasilobus* (araña), 67, 2.8
- peces
 - de cuatro ojos, 5.31
 - informáticos, 82
 - ojos de, 183, 5.14
 - planos, 4.7
 - voladores, 138, 4.4
- Pelger, Susanne, 182-186
- Pennycuick, Colin, 147
- perros, como ejemplo de selección artificial, 1.14
- Pilkington, James, 281
- pingüino de las Galápagos, 1.10
- planeadores marsupiales, 134-135
- planeo
 - sobre la superficie del agua, 4.4
 - vertebrados, 135-141, 4.3
- plantas
 - insectívoras, 21
 - mirmecófilas, 290
- plátano, utilidad del, 282-283
- plumas, 143-144
- población, crecimiento exponencial de la, 313
- polen, transmisión, 284-285
- polinización
 - cruzada, 284
 - estrategias, 287
- polinizadores
 - de higos, 328
 - especializados, 288
- preadaptación, 110
- presión de selección, 219
- «Programa de Replicación de Instrucciones Ordenadas» (PRIOR), 303, 314
- pulgas, 264
- pulmón, origen evolutivo del, 111
- pupilas
 - cambio de abertura, 186
 - evolución, 188-190
 - variedad de formas, 5.15, 188-190
- Quiring, Rebecca, 213
- radiolarios, 256, 7.5, 7.6
- Raup, David, 222, 231, 232
- receptáculos
 - de insectos, 25
 - eficiencia de, 19-25
- refracción de la luz, 5.10
 - índice, 174-175
- relajación evolutiva, 156
- Relojero Ciego, programa, 41-44, 260, 262-263
- Relojero ciego*, *El*, 49, 221
- Relojero de color, programa, 1.17
- reproducción
 - herencia y, 102
 - sexual, 98
 - trinquete de Muller, 99
- respiración aérea en animales acuáticos, 150
- retina
 - bastones y conos, 192-193
 - como fotocélula biológica, 5.2
 - evolución independiente, 192
- retorno al agua, 149-152
- Robinson, Michael, 64
- robot(s)
 - autoduplicante, 308
 - caballo como vehículo para el DNA, 9.4
 - definición, 309
 - industrial, 305
 - movimiento de, 305
 - PRIOR, 306

- «tortuga» (*Machina speculatrix*), 307
- Rushmore, monte, 11-48
- saltaciones, 112
- Scyllarus* (como mutante homeótico), 7.16
- seda de arañas, 50, 80
- pegajosidad, 53
- sexo y, 60
- véase también telarañas
- segmentación, 263-279
- selección artificial
- de animales, 1.14
- de artromorfos, 273
- de biomorfos, 41-43
- de conchas, 6.11
- de plantas, 1.13
- y selección natural, 44-45
- selección natural
- «artificial», 83-84
- avispas macho y, 346
- ilusión de designio y, 244
- macromutaciones y, 112, 277
- malentendida, 116
- mimetismo y, 16
- mutación y, 100, 112, 247
- no aleatoria y acumulativa, 89
- presión de selección, 219
- simulaciones de la, 46, 47, 74, 77
- variación y, 184
- y selección artificial, 45
- selección vicaria, 353
- semillas aladas, 8.6
- sexo
- arañas, 60
- DNA recombinante, 104-105
- en NetSpinner, 75
- evolución, 99
- redistribución de genes, 104-105
- trinquete de Muller, 99
- Sherrington, Charles, 356
- simetría, 248-263
- biomorfos, 7.1
- equinodermos, 7.8
- hexarradiada, 258, 7.7
- «Isla de Man», 7.3
- izquierda-derecha, 253
- pentarradiada, 258
- radial, 256
- tetrarradiada, 7.2
- simulaciones informáticas, 80
- caracoles, 6.12
- conchas: selección artificial, 6.11
- semejanza con conchas reales, 6.13
- cría selectiva, 40
- lentes, 5.9
- peces, 81-84
- segmentación de artromorfos, 267
- selección natural, 52
- telarañas, 68-81, 2.13
- véase también biomorfos
- sirenios, ascendencia terrestre, 153
- solleta (*Bothus lunatus*), 4.7
- sopa primordial, 310
- Spirula* (concha), 240
- suerte, «desmenuzamiento» de la, 105
- superposición, 209, 5.27
- supervivencia, contribuciones a la, 46
- tecnologías de percepción remota, 157
- tejedor (nido), 1.7
- tejonera, 1.14
- telarañas, véase arañas, telas
- telescopio kepleriano, 208-209
- tenrec, 1.9, 29
- térmicas, 147
- termitas
- compás, 26-27
- mimetismo, 13
- Terzopoulos, Demetri, 82-84
- Thomas, Keith, 281
- Thompson, D'Arcy Wentworth, 222
- Thompson, William, 90
- tiempo de generación, y tamaño, 4.1
- trampas para insectos, 22-24
- de resorte (arañas), 65
- transparencia (principio de refracción), 174-175
- traquimedusas, 258
- trinquete de Muller (explicación del sexo), 99
- Trivers, Robert, 33

- trompa (de elefante), 12, 106-108
- tubo (conchas), 226, 6.3
 generado por el Caracolero Ciego, 234
- ultravioleta, y visión de las abejas, 284
- Universidad de California, 130
- vacas marinas, 149, 4.6
- variación, y selección natural, 184
- veneno de araña, 64
- verma (conchas) 225, 6.4, 6.5
- Vermeij, Geerat, 239
- vertebrados
 planeo, 4.3
 vuelo, 132-134; *véase también* aves
- vida
 artificial, 81
 en el nanomundo, 324
 en otros planetas, 310
 origen de la, 311-312
 rareza de la, 311
- virus
 de DNA, 303
 informáticos, 295
 propósito biológico de los, 294-298
- Vollrath, Fritz, 52, 70
- Volvox*, representante de la vida primitiva, 315
- von Frisch, Karl, 23
- von Neumann, John, 308
- vuelo, 125
 aleteo, 146-147
 evolución, 130-139
 física del, 125
 origen en aves, 149
 tamaño y, 130
 usos distintos del, 145-146
- Waldorf, Uwe, 213
- Walter, W. Grey, 307
- Watson, J.D., 297
- Wickramasinghe, Chandra, 89
- Williams, George, 321
- Wright, Sewall, 185 .
- Zschokke, Sam, 71