

J. NOVO - R. PEREDA
J. SÁNCHEZ CAÑIZARES

**NATURALEZA
CREATIVA**

pensamiento
actual



RIALP

JAVIER NOVO
RUBÉN PEREDA
JAVIER SÁNCHEZ-CAÑIZARES

NATURALEZA CREATIVA

EDICIONES RIALP, S. A.
MADRID

© 2018 by JAVIER NOVO, RUBÉN PEREDA, JAVIER SÁNCHEZ-CAÑIZARES

© 2018 by EDICIONES RIALP, S. A.,
Colombia, 63. 28016 Madrid
(www.rialp.com)

Realización ePub: produccioneditorial.com

ISBN: 978-84-321-4917-7

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del *copyright*. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita reproducir, fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

ÍNDICE

PORTADA

POR TADA INTERIOR

CRÉDITOS

PRESENTACIÓN

I. NATURALEZA

1. UN PASEO POR EL PARQUE
2. SISTEMAS
3. COMPLEJIDAD
4. ESTRATEGIAS
5. A MODO DE RESUMEN

II. VIDA

1. ENERGÍA Y ENTROPÍA
2. CRECER
3. REPRODUCIRSE Y MORIR
4. AUTO-CONSTRUCCIÓN
5. A MODO DE RESUMEN

III. CAMBIO

1. ¿TODO CAMBIA?
2. EVOLUCIÓN Y GENÉTICA
3. MACROEVOLUCIÓN
4. EVO-DEVO-ECO
5. A MODO DE RESUMEN

IV. LÍMITES

1. ADAPTACIONES
2. CONTINGENCIAS
3. RESTRICCIONES
4. A MODO DE RESUMEN

V. FUNCIONES

1. CAUSAS Y RAZONES
2. ¿FORMA O FUNCIÓN?
3. DIRECCIÓN Y ORDEN
4. A MODO DE RESUMEN

VI. CREATIVIDAD

1. LEYES
2. EMERGENCIA
3. A MODO DE RESUMEN

EPÍLOGO

BIBLIOGRAFÍA

JAVIER NOVO, RUBÉN PEREDA Y JAVIER SÁNCHEZ-CAÑIZARES

PRESENTACIÓN

GABRIEL SYME, PROTAGONISTA de la novela *El hombre que fue Jueves* de Chesterton, exclama hacia el final del libro que por fin ha comprendido cuál es “el secreto del mundo”: el secreto es que lo vemos por detrás, por la espalda, y visto así el mundo que nos rodea resulta —en gran medida— indescifrable. Cuando vemos un árbol, dice Syme, en realidad no estamos viendo un árbol sino la parte de atrás de un árbol. Cuando vemos una nube, en realidad es la “espalda” de la nube lo que contemplamos. Todo en la naturaleza parece ocultarnos su verdadero rostro. Si pudiésemos verlo de frente, tal cual es, todo sería mucho más claro. Joseph Ratzinger expresa algo similar cuando escribe en *Jesús de Nazaret*: «Digámoslo tranquilamente: la irredención del mundo consiste precisamente en la ilegibilidad de la creación, en la irreconocibilidad de la verdad; una situación que lleva necesariamente al dominio del pragmatismo y, de este modo, hace que el poder de los fuertes se convierta en el dios de este mundo».

Esta percepción universal se ha expresado en prácticamente todas las culturas de formas muy similares: todos hemos tenido la sensación de que la Naturaleza, —es decir, toda la realidad física que nos rodea— es fascinante, compleja, con un alto grado de organización y llena al mismo tiempo de incógnitas; es verdaderamente una tierra en la que las luces conviven con las sombras. No terminamos de sentirnos completamente a gusto en este cosmos, ya que no nos resulta fácil reconocer la *verdad* que se esconde tras él, si es que hay alguna. Es inevitable experimentar la sensación de que —de algún modo — nuestra alianza con la Naturaleza está rota. Quizás el desgarro no sea tan fuerte como para dar por perdida cualquier posibilidad de reconstrucción, pero es claro que hay piezas que no encajan. George Steiner sintetiza esta misma idea al referirse a la “inhumana otredad de la materia”, ese algo inaccesible y extraño que tiene la Naturaleza cuando la interrogamos en profundidad.

En este libro queremos explorar con el lector este problema: cuando entramos en contacto con la Naturaleza, quizás lo primero que descubrimos es la posibilidad de entablar un diálogo con ella. De hecho, en seguida nos percatamos de que dicho diálogo es absolutamente necesario si queremos entender nuestro lugar en este cosmos y avanzar en la comprensión de quiénes somos. A medida que nos adentramos en ese diálogo la Naturaleza aparece cada vez más como una otredad preñada de significado; lamentablemente, este significado se nos escapa a menudo. Nos encontramos en una relación ambigua: percibimos la capacidad casi inagotable de atraer y revelar que tiene el

cosmos, pero al mismo tiempo no logramos dar sentido a todo lo que tiene lugar en él. Hay una oscuridad básica que oculta la verdad sobre nuestro universo tras un velo de confusión.

Es obvio que avanzar en la solución de este problema ha sido la preocupación de científicos, artistas y filósofos de todos los tiempos. Sin duda alguna, el arte constituye una vía hacia el significado: Steiner habla del “choque estético” que resulta del encuentro con una creación artística, cuando ésta entra en nosotros sin haber sido invitada y satisface necesidades de las que nada sabíamos. Ese carácter sanador del arte reside en que la otredad que entra en nosotros nos transforma.

También las ciencias naturales (física, química y biología) son una vía adecuada para avanzar en la búsqueda de significado en esa otredad; en definitiva, el objeto último de toda actividad científica no es otro que entablar un diálogo con la Naturaleza a distintos niveles. Todo el que intenta desentrañar los procesos que rigen el mundo natural experimenta tarde o temprano una sensación similar al encuentro artístico: se siente interpelado por un “otro” que le supera pero que suscita preguntas sobre el sentido de su propia existencia. Por eso en este libro hemos adoptado la posición de interrogar a la Naturaleza desde la perspectiva de lo que la ciencia actual nos dice sobre ella.

Es ya un lugar común aludir al *dictum* de Max Weber, según el cual con la racionalidad moderna hemos desencantado el mundo. En este sentido, podríamos decir que desde el punto de vista científico, la física de Newton marca el paso a la modernidad. Sin embargo, hoy sabemos que esta física ha sido superada: desde sus inicios el Universo ha dado lugar a una inmensa cantidad de propiedades y estados de la materia cuya existencia hubiera sido difícil de prever hace miles de millones de años. Si pensamos en la Tierra primitiva poco después de su formación y antes de la aparición de cualquier ser vivo, nada hacía presagiar la aparición de la Vida, y mucho menos la de la conciencia. Tal y como la entendemos hoy en día, especialmente desde la aparición de lo vivo, la Naturaleza es algo mucho más complejo y maravilloso de lo que sospechábamos. El mundo se manifiesta como una realidad creativa, de modo que está mucho más encantado de lo que se atrevía a pensar la racionalidad moderna.

La aceptación de la teoría del caos y de los sistemas dinámicos no-lineales como creadores de estructuras novedosas ha llevado a considerar la Naturaleza como un sistema capaz de introducir orden en el caos, y por tanto de *dar significado* a lo que parece no tenerlo. Hoy podemos acercarnos al cosmos como si se tratase de una obra de arte, una singularidad que nos ha sido regalada y que por tanto demanda respeto, asombro, cortesía, reverencia. Desde esta actitud inicial, quizás podamos reconciliarnos con la Naturaleza y reparar de algún modo la alianza rota con un Universo que a menudo resulta incomprensible. Así, en vez de encontrarnos con islas de significado en un océano de sinsentido, quizás podamos contemplar la Naturaleza como un gran mar de significado salpicado por islas de incomprensibilidad.

Estas son las cuestiones que deseamos tratar en este libro. Nuestra intención es hacer lo que en círculos académicos se denominaría “filosofía de la naturaleza” de un modo accesible a todo lector interesado en estas cuestiones. Tres autores procedentes de

distintas disciplinas (la filosofía, la física y la biología) hemos reflexionado juntos acerca de la Naturaleza. Nuestro punto de partida es un día cualquiera en que salimos y nos preguntamos si tiene sentido lo que vemos a nuestro alrededor. Lo cual presupone la pregunta de si la realidad observada es *realmente* así o, por el contrario, es un simple reflejo de nuestra peculiar manera de acceder a ella. Creemos que el modo en que abordamos el problema es en verdad novedoso en virtud del método empleado, porque en este tipo de obras lo habitual es una estructura según la cual cada capítulo es obra de uno de los autores: el físico habla del mundo “micro”, el biólogo habla de lo vivo y el filósofo toca las cuestiones relativas a la causalidad, necesidad, orden o finalidad. A nosotros, en cambio, nos gusta hablar, discutir e *invadir* el terreno del otro, y este libro es fruto de muchas de esas conversaciones. Por eso mismo es un libro en el que todo pertenece, por igual, a los tres autores. Todo ha sido escrito (y reescrito) conjuntamente. Este modo de proceder nos ha permitido pensar sobre cuestiones como el cambio, el orden, la direccionalidad o la información utilizando ejemplos procedentes de cualquiera de las ciencias naturales. Por eso los capítulos llevan títulos que sugieren cuestiones amplias, transversales, que recogen los grandes temas sobre los que se articula nuestra reflexión.

Si decíamos que la ciencia actualmente presenta el Universo como un sistema dinámico cuya característica básica es la creatividad, esto significa que se trata de un proceso todavía inacabado y, por tanto, abierto al futuro. El nuevo paradigma científico en que nos encontramos nos habla de un cosmos que admite cambio y novedad, una “obra en construcción” con un dinamismo excepcional cuyos resultados son impredecibles y que viene, por eso mismo, repleto de promesas. La Naturaleza ha generado infinidad de formas cada vez más bellas y maravillosas, por utilizar la expresión con la que Darwin cierra “El origen de las especies”. Pero lo más importante es que seguirá generándolas. De ahí que podamos ir más allá del mero esfuerzo por desentrañar las estructuras y procesos escondidos en la Naturaleza; podemos vislumbrar el futuro hacia el que apunta el cosmos, un futuro repleto de novedades que ahora mismo es difícil imaginar. Lo crucial, en definitiva, es que podemos albergar la esperanza de que nuestro pacto con la Naturaleza será algún día sanado, la incomprensibilidad será superada y podremos navegar —al fin— en un mar de significado. Quizás, como dice T. S. Eliot en *Little Gidding*, el final de todo nuestro explorar será llegar al lugar de donde habíamos partido y conocerlo por primera vez.

I.

NATURALEZA

1. UN PASEO POR EL PARQUE

Quienes vivimos en ciudades pequeñas con mucha frecuencia tenemos la oportunidad —la fortuna, más bien— de cruzar un parque cuando nos dirigimos al trabajo. Además de estrechar lazos entre quienes nos encontramos cada día en el camino, estos paseos diarios nos permiten establecer un contacto más directo con la naturaleza, es decir, con toda la *realidad física* —tanto inerte como viva— que nos rodea. Este contacto, en el caso de los autores de este libro, ha dado lugar a una serie de interrogantes que son el punto de partida de nuestra reflexión. Supongamos que estamos cruzando el parque una mañana cualquiera. Mientras caminamos, disfrutamos de los primeros rayos del sol. La temperatura es todavía fresca, pero irá en aumento a lo largo de la mañana. Es otoño y algunos robles comienzan a tener un color pardo en sus hojas. Unas urracas ahuyentan a los mirlos que les estaban escamoteando los gusanos e insectos que, escondidos entre la hierba, constituyen su desayuno. Un poco más allá, una mujer lanza una pelota de tenis a su perro, que corre a recuperarla. ¿Qué hay detrás de estas experiencias cotidianas? ¿Podemos extraer de ellas algún concepto general? ¿Qué nos diría acerca del cosmos que nos alberga?

Ante todo, lo primero que descubrimos son los diferentes elementos de la escena: una urraca, otra, y otra más; cada uno de los mirlos; el sol, los árboles, el perro... Son elementos con una actividad propia, de los que esperamos cierto comportamiento y que tienen unas capacidades únicas que les hacen diferentes de los otros elementos. Mantienen cierta unidad pese al transcurso del tiempo y permanecen entre la multitud de cambios que se dan a su alrededor. Además, podemos percibir esos elementos porque nuestros sentidos trabajan en las mismas escalas de energía, espacio y tiempo que son relevantes para su constitución física. Sintonizamos con ellos de manera más directa que con los microbios o los agujeros negros, que no se perciben a simple vista. Tenemos un conocimiento directo de la naturaleza que es cierto, aun pudiendo ser superficial, impreciso y mejorable: la urraca que vemos, que hemos identificado como urraca después de numerosas experiencias, que sabemos que emite un graznido peculiar, es una urraca real, no una proyección de nuestra mente, ni una ilusión. Pero al mismo tiempo

nos damos cuenta de que podríamos saber más: de que la urraca —por seguir con el mismo ejemplo— es mucho más que la imagen que nos formamos de ella, o las memorias que tenemos asociadas. Realmente conocemos la naturaleza que nos rodea, sin que esto impida que podamos buscar un conocimiento más profundo de la realidad física.

De hecho, si nos detenemos a *mirar y considerar* lo que vemos en nuestro paseo matutino por el parque fácilmente nos damos cuenta de que *todo* lo que existe en la naturaleza parece estar *realmente* interconectado, como formando parte de un mismo proceso. Las urracas que ahuyentan a los mirlos, los gusanos que estos se comen, el perro que corre tras la pelota de tenis que lanza su dueña, las nubes y el sol: son elementos individuales, es cierto, pero al mismo tiempo forman parte de un proceso más amplio, en el que cada uno de ellos cumple un papel. En cierto modo, tenemos la intuición de que hay *un todo*, un gran sistema que funciona integrando un sinfín de partes que interactúan entre sí de modos difíciles de imaginar. Es decir, no se trata de un sistema fijo y estático, compuesto de elementos individuales que permanecen encerrados en su propio mundo; al contrario, es un sistema tremadamente dinámico, en movimiento, que constantemente da lugar a una gran variedad de nuevos estados de la materia y en el que todo tiene que ver con todo de maneras diversas.

Surgen así muchas preguntas interesantes. Por ejemplo, podemos plantearnos por qué percibimos dentro de la realidad física elementos que parecen ser independientes del resto: ¿se trata solamente de una particularidad de nuestro modo de conocer o, por el contrario, responde a la estructura del mundo? Considerar estas dos alternativas como excluyentes, lo que sucede con mucha frecuencia, es engañoso: percibimos elementos independientes por una particularidad de nuestro modo de conocer y —a la vez— en respuesta a la estructura del mundo. Las ciencias físicas vienen aquí en nuestra ayuda para decirnos que dichos elementos, que percibimos como individuos dentro del gran sistema dinámico de la naturaleza, tienen sus partes más integradas entre sí —mantienen una relación más fuerte— que con el resto del universo. Se trata de una característica general de todos los objetos individuales que componen la realidad física, desde los átomos hasta las estrellas. Además, se puede decir que hay una jerarquía entre los diversos constituyentes de la naturaleza. La energía típica que mantiene unidos los componentes de cada elemento en un nivel determinado es apreciablemente mayor que la energía con la que interactúan los distintos elementos en ese mismo nivel. Así, por ejemplo, es más fácil fundir un cubito de hielo (relajar las interacciones entre moléculas de agua) que romper cada molécula de H_2O en sus tres átomos individuales (dos de hidrógeno y uno de oxígeno). Es decir, las moléculas de agua se relacionan entre sí para formar un cubito de hielo mediante una energía menor que la que mantiene unidos los átomos en cada molécula. Por eso la molécula de agua tiene una cierta unidad que nos permite distinguirla (aunque forme parte de otros sistemas o elementos más grandes) dentro del gran sistema de la naturaleza. Desde el punto de vista de la física, el mismo razonamiento puede hacerse respecto de un ser vivo y las interacciones que mantiene con su ambiente. Energéticamente hablando, es siempre más costoso destruir al viviente

que simplemente aislarlo de su entorno. Nuestro modo de conocer detecta —en su funcionamiento normal— un nivel de unidad: con la ayuda de instrumentos de medición y el avance del conocimiento podemos descubrir nuevos niveles de unidad, tanto en escalas inferiores como en escalas superiores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, parece que el modo más adecuado de describir cómo está constituida la realidad física es el de considerar cada elemento de la naturaleza como un sistema, que a su vez forma parte de otro sistema mayor, y éste de otro mayor, así hasta llegar al gran sistema que lo englobaría todo. Esta manera de acercarse a la realidad es muy intuitiva, y evita al mismo tiempo una distinción demasiado rígida entre sistemas y elementos de un sistema, que puede ser abrumadora desde un punto de vista puramente lógico o epistemológico. Además, nos ayuda a comprender lo que decíamos antes: hay una cierta jerarquía en la naturaleza. Hay entidades que, siendo sistémicas, son a su vez partes de un sistema mayor. Esta noción nos parece muy importante porque implica un cierto *orden* en la naturaleza. ¿Cómo se ha constituido cada uno de esos sistemas y cómo se han ido integrando en sistemas cada vez mayores y más complejos? ¿Qué características y qué restricciones tiene el proceso (o procesos) que ha generado esa jerarquía de sistemas?

Es importante advertir que esta forma de considerar la naturaleza contrasta con la solución práctica que adoptamos en el día a día: cuando queremos conocer mejor la realidad que nos rodea centramos la atención en el elemento o sistema concreto que tenemos ante nuestros ojos, atendiendo a criterios de interés, finalidad, utilidad... La ventaja práctica de este modo de proceder es evidente: sólo se puede estudiar en detalle una parte de la realidad física, o bien toda la realidad física pero bajo un aspecto determinado. De hecho, el progreso de las ciencias está muy relacionado con esta forma de analizar problemas, delimitando campos de estudio de acuerdo con criterios externos. En este sentido, este libro responde al deseo de los autores de ir más allá de sus respectivas especialidades científicas. Buscamos una visión más completa de la realidad y estamos convencidos de que sólo la podremos encontrar si abandonamos —o al menos suspendemos por un tiempo— la tendencia a centrarnos solamente en una parte del todo.

Esta ruptura con los objetos y los métodos de nuestras ciencias nos ha llevado, en primer lugar, a considerar la realidad como un sistema de sistemas. Pero hay más: si pasamos a menudo por el mismo parque es fácil que advirtamos la existencia de *ciclos* temporales. Descubrimos, de nuevo, las escenas propias de primera hora de la mañana, diferentes de las nocturnas, pero similares a las que tuvieron lugar ayer. El ciclo de días y noches —el ciclo circadiano— es el más evidente (pero a menudo pasa desapercibido porque lo damos por supuesto): unas propiedades físicas muy específicas (la rotación de la Tierra, la presencia de una atmósfera con una composición muy concreta, etc.) afectan a toda la biosfera —el sistema que componen todos los seres vivos— de un modo tremadamente básico, fundamental. Pensemos, por ejemplo, en los períodos de vigilia-sueño de animales o los cambios día-noche en las plantas, y todo lo que eso implica para el comportamiento y las relaciones entre los seres vivos. Hay, además, otros ciclos temporales más largos, como los generados por el movimiento de la Luna, el cambio de

las estaciones provocado por la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la precesión de los equinoccios (debida al cambio de orientación del eje de giro de la Tierra, con un período de 25.000 años), etc. Estos ciclos temporales no son absolutamente perfectos y cerrados en sí mismos. Así, por ejemplo, sabemos que la Luna ha estado antes más cerca de la Tierra y que existe una tendencia en la dinámica del sistema Tierra-Luna que hace que se vayan separando entre sí, lo que afecta evidentemente al período del ciclo lunar que percibimos en la Tierra. La tendencia general del universo no es cíclica: ni la Tierra, ni el Sol ni el resto de las estrellas han existido o existirán siempre. Sin embargo, podemos considerarlos así dentro de las escalas físicas en que se desarrolla la vida. Como veremos en los próximos capítulos, la interconexión de los diversos ciclos temporales —internos y externos— resulta decisiva para el mantenimiento de los sistemas vivos.

En definitiva, los elementos que hemos descubierto en primer lugar, que conforman la naturaleza que nos rodea, están sometido a unos patrones temporales muy concretos y regulares que imponen un tipo de *orden* sobre los procesos en los que participan estos elementos, similar al que hemos mencionado al hablar de los sistemas. Como decíamos, a menudo damos por supuesta la existencia de estas regularidades y no recapacitamos acerca de la importancia radical que ejercen sobre nuestras vidas y sobre el devenir de todo el Universo. Y muy pocas veces nos preguntamos por qué existen estos ciclos, cómo han llegado a fijarse, qué sería del cosmos y de nuestro planeta si no existiesen estos patrones temporales.

No es algo evidente, porque habitualmente consideramos el tiempo como una *flecha* que avanza siempre hacia adelante en un universo que ha tenido un principio (el famoso *Big Bang*) y camina inexorablemente hacia un final que no sabemos cómo será. De hecho, esta es la visión comúnmente aceptada hoy día por los físicos respecto del cosmos en su conjunto: el universo lleva más de trece mil millones de años expandiéndose a partir de un estado inicial que nos resulta desconocido —una *singularidad*, en el lenguaje de los físicos. En esta expansión se han ido originando estructuras y sistemas como los que hemos descrito: primero se formaron los constituyentes básicos de la materia y sus interacciones (quarks, electrones y neutrinos más fotones y bosones como el de Higgs); luego llegaron los núcleos de los átomos, los átomos mismos, las estrellas, las galaxias y los planetas (que pueden destruirse, pero vuelven a aparecer gracias a la fuerza gravitatoria). Por otra parte, al hablar de la expansión del universo hay un hecho muy notable: las leyes microscópicas de la física no distinguen entre tiempo pasado y futuro; sin embargo, sabemos que existe una asimetría básica entre ambos: el calor siempre fluye de un cuerpo caliente a uno frío, y no al revés, aunque esto último no lo prohíba ninguna ley física microscópica. En consecuencia, se puede hablar de un pasado más caliente y un futuro más frío, conforme el Universo se va expandiendo. Esta tendencia general está descrita por la segunda ley de la Termodinámica, que postula el aumento de entropía de un sistema aislado y, como consecuencia, del universo mismo. Hablaremos de esto más en detalle al comienzo del siguiente capítulo.

Y, sin embargo, dentro de este proceso continuo de avance, aparecen ciclos temporales que se repiten con periodos muy concretos y que dotan a la naturaleza de ciertas regularidades básicas. Aparecen “islas de regularidad” en el cosmos. ¿De dónde provienen esas regularidades, cómo se han generado? Sin ellas, ¿habría sido posible la existencia de todo lo que contemplamos hoy en día? El universo ha continuado este proceso hasta dar lugar a las condiciones favorables para la vida. Sabemos que estas condiciones se dan en un planeta: el nuestro. Aunque cada vez se descubren más exoplanetas que podrían ser capaces de albergar vida como la terrestre, ignoramos si de hecho hay vida en algún otro lugar del universo.

2. SISTEMAS

Muchos autores han hablado en los últimos años sobre la necesidad de una visión *sistémica* de la naturaleza. Como habrá quedado patente en las páginas precedentes, creemos que es la estrategia más acertada. A lo largo de su historia, la ciencia —y en particular la física— ha logrado unificar ámbitos del cosmos que parecían muy distintos entre sí. Quizás la primera gran unificación la llevó a cabo Isaac Newton, al mostrar que la física del mundo “sublunar” (los fenómenos que sucedían en la Tierra y su entorno más inmediato) y la física del mundo “supralunar” (los movimientos de los astros) podía describirse mediante los mismos principios: la ley de gravitación universal y las tres leyes de la mecánica que formuló. A comienzos del s. xx, la teoría especial de la relatividad de Einstein consiguió a su vez una unificación de la cinemática (la parte de la mecánica que estudia el movimiento en sí mismo) y el electromagnetismo. Años después Lee Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg elaboraron una explicación unificada de la interacción electromagnética y la interacción nuclear débil que les valió el premio Nobel en 1979. Incluso el recientemente descubierto bosón de Higgs permite una unificación (aunque un tanto más modesta) de los procesos que hacen que las partículas fundamentales adquieran una masa determinada. No obstante, la unificación de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza —gravedad, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil— sigue siendo hoy por hoy altamente hipotética, por las dificultades especiales de armonizar los presupuestos de la mecánica cuántica con los de la teoría de la relatividad (las dos teorías más fundamentales que utiliza actualmente la física). Desde luego es posible que, en un futuro no muy lejano, una teoría como la de supercuerdas (para la que los objetos fundamentales del universo serían cuerdas unidimensionales vibrando en un espacio más amplio, de 9 o 10 dimensiones más el tiempo) pudiera conseguir una unificación lógica y matemática de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza; pero esta unificación no implicaría que automáticamente conociéramos todas las futuras posibilidades del despliegue del universo, pues desconocemos cuáles son las variables o grados de libertad relevantes a la hora de describir todos los nuevos sistemas que pueden surgir.

A día de hoy no es posible describir totalmente un sistema tan complejo como la naturaleza con las herramientas de la ciencia. A decir verdad, nos resulta muy difícil

concebir un sistema que incluya realmente la *totalidad* de lo físico, desde las galaxias más remotas hasta los microbios que habitan en nuestro intestino (con sus quarks y electrones). Parece que algo tan grandioso escapa a nuestra misma capacidad de analizar, estudiar y comprender la realidad. De hecho, cada vez hay más voces críticas respecto de la posibilidad de llegar a una “teoría del todo” como la que propugna Steven Weinberg, a partir de la cual se pudiera explicar y construir la realidad “de abajo hacia arriba”. La ciencia funciona con ciertos presupuestos básicos, y uno de esos presupuestos fundamentales —al que aludíamos en el apartado anterior— es la posibilidad de distinguir un sistema relevante del ambiente que le rodea. En este sentido, antes de llegar a esa hipotética “teoría del todo” resulta mucho más fácil describir sistemas más asequibles a nuestro modo de conocer, formados por los elementos que conocemos directamente en el contacto con la naturaleza: el Sol y la Luna, las urracas y los mirlos, los insectos que comen y los árboles en los que se posan...

Para explicar mejor lo que estamos diciendo hemos de aclarar algunos conceptos sobre la complejidad y estructura de los sistemas. Un sistema se puede definir de manera muy sencilla como un conjunto de partes que interaccionan y que resulta integrado o unificado desde la perspectiva que estemos usando en ese momento, es decir, según nuestro modo de conocer. El sistema puede constar únicamente de dos elementos que interactúan entre sí. Por ejemplo, si A actúa de algún modo sobre B y a su vez B influye sobre el estado de A, tendríamos un sistema de dos elementos interactuando uno sobre el otro. Todo sistema se puede representar gráficamente mediante una red de nodos —los elementos que constituyen el sistema— unidos por líneas que representen las interacciones entre esos nodos. En el caso de un sistema formado por dos nodos A y B, la siguiente figura muestra una forma muy sencilla de representar esa red con dos posibles topologías o formas de interacción:

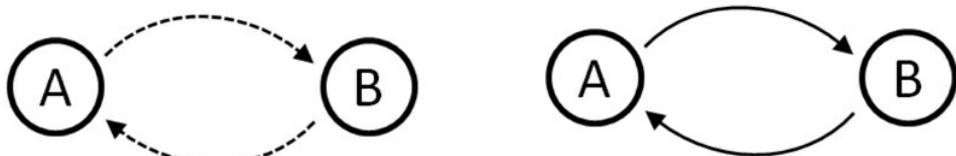


Figura 1

Los círculos representan los nodos mientras que las flechas indican sus interacciones. En la parte izquierda, las líneas discontinuas significan *inhibición* o *inactivación*, una interacción negativa; es decir, que cuando la cantidad de A aumenta, la cantidad de B bajará, y viceversa. Un sistema como éste se estabilizará en torno a dos posibles estados: o A está activo (por encima de cierta cantidad o concentración) y B está inactivo (por debajo de dicha cantidad), o bien A está inactivo y B activo. La parte derecha de la figura muestra este mismo sistema, pero ahora las líneas de interacción son flechas sólidas, lo cual significa *activación*, interacción positiva. Un sistema de estas características también puede adoptar dos estados estables, pero distintos a los del sistema anterior. Ahora, ambos nodos estarán activos o inactivos *a la vez*. Es importante

comprender que las interacciones también forman parte del sistema, ya que sin ellas no habría más que partes aisladas sin ninguna relación.

Los dos tipos de sistemas que hemos presentado son muy esquemáticos pero sirven como ejemplo para explicar algunos aspectos de los procesos químicos. En otros ámbitos podemos encontrar interacciones de otra índole, como las que se refieren a la posición relativa de los elementos (las interacciones entre galaxias o planetas, por ejemplo) o a sus niveles internos de energía (como es el caso de algunos materiales). Sin embargo, en cualquier sistema que consideremos nos encontramos ante algo dinámico, incluso cuando alcanza un punto estable: A y B están continuamente interaccionando y eso hace que el sistema se mantenga como tal a lo largo del tiempo. Por tanto, una característica muy importante del sistema es que puede reaccionar a una influencia externa sobre uno de sus nodos: este *input* provoca la puesta en marcha del sistema para hacer su trabajo; el resultado de esas interacciones será una respuesta de algún tipo: un *output*. Este comportamiento se podría describir de forma matemática si conociésemos a fondo el funcionamiento de cada uno de los nodos y sus respectivas interacciones. Si se conocen las condiciones iniciales de cada elemento y las condiciones de contorno (es decir, los límites o fronteras dentro de los que se mueve ese sistema), los físicos podrán escribir ecuaciones (que se suelen llamar *diferenciales*) para describir el comportamiento de cada una de las flechas del sistema y así predecir lo que va a suceder con el paso del tiempo, cuál será el estado futuro de todo el sistema. Estas ecuaciones conectan la rapidez con la que cambian las cantidades de un sistema (masa, velocidad, etc.) con el valor que dichas cantidades tienen en cada instante. Si resolvemos las ecuaciones, podemos acabar sabiendo cómo cambian las cantidades en *todo momento*. Pensemos por ejemplo en el sistema solar, cuyos nodos son todos los planetas y sus respectivas lunas orbitando en torno a la estrella central, nuestro Sol —que también es otro nodo. Si conocemos la masa, la inercia y otras propiedades de cada nodo, así como las fuerzas mediante las que interaccionan, los físicos podrán desarrollar las ecuaciones diferenciales que describan el comportamiento de todo el sistema de forma muy exacta. De ahí la capacidad, por ejemplo, de predecir cuándo van a ocurrir eclipses de sol o de luna, o la visita de determinados cometas. En el extremo opuesto de la escala de tamaños, la microescala, tenemos sistemas como el átomo, un conjunto de partículas y sub-partículas interaccionando de manera muy específica y, aparentemente, predecible.

Sin embargo, las cosas no son tan sencillas: como veremos en el siguiente apartado, una gran parte de los sistemas naturales son caóticos. Esto significa que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales o en las condiciones de contorno que empleamos para integrar esas ecuaciones diferenciales llevan enormes variaciones en los resultados finales. Es el llamado “efecto mariposa”: el aleteo de una mariposa en cierta zona del mundo podría ser uno de los fenómenos que desencadena una tormenta en otra región. Pero, además, la dificultad de predecir exactamente lo que sucederá no se debe sólo a la limitación de nuestro modo de conocer y a la insuficiencia de los datos de que disponemos: la interpretación más común de la mecánica cuántica —la teoría física más fundamental sobre la materia de que disponemos hoy en día— es que hay una

indeterminación *real* de la misma naturaleza en sus niveles microscópicos. Curiosamente, esta indeterminación en los niveles microscópicos convive, por un lado, con la extremada exactitud de los cálculos y predicciones estadísticas que permite la mecánica cuántica, y, por otro, con la determinación de la naturaleza en las escalas macroscópicas que nos resultan familiares. Acerca de cómo se produce esta determinación todavía no hay un consenso definido entre los expertos, existiendo una pluralidad de interpretaciones de la mecánica cuántica, algunas de ellas extremadamente exóticas, como la de los “muchos mundos”. No obstante, en la actualidad hay un consenso básico entre los físicos acerca de la inexistencia de lo que se conocen como “variables ocultas locales”. La razón es que si existieran unas variables ocultas locales para cada problema, la mecánica cuántica estaría simplemente reflejando nuestro desconocimiento (de ahí el adjetivo de *ocultas*) de las magnitudes físicas que estarían determinando los resultados de las mediciones, de un modo real y circunscrito al lugar concreto donde tiene lugar el fenómeno. La cuestión es que, si dichas magnitudes realmente existiesen, las correlaciones entre ellas deberían verificar ciertas fórmulas matemáticas denominadas “desigualdades de Bell”. Sin embargo, dichas desigualdades han sido violadas en un gran número de experimentos llevados a cabo durante las últimas décadas.

Existen por tanto resultados experimentales que son incompatibles con una determinación previa de las magnitudes que se miden, de modo que cada vez resulta menos sostenible una interpretación determinista de la naturaleza. O bien la naturaleza está realmente indeterminada, como defiende la interpretación estándar de la mecánica cuántica, o bien está determinada de modo no local, sino global y universal; en efecto, los experimentos rechazan la existencia de variables ocultas locales, pero no la posibilidad de un “superdeterminismo” en el universo. Según este superdeterminismo, todo el universo —incluyendo la elección por parte de los experimentadores de qué medir y por supuesto todas nuestras elecciones cotidianas— estaría determinado por variables ocultas *no locales*, cuyos valores en cualquier intervalo espacio-temporal pueden determinar sus valores y las de cualquier magnitud física observable en el resto del espacio-tiempo. Como han puesto de manifiesto los expertos, es muy dudoso que dicho superdeterminismo pueda ser falsable empíricamente y, por tanto, que pueda considerarse como una hipótesis abordable desde la ciencia experimental.

Las dificultades para describir un sistema en su totalidad se agravan aún más al tratar de comprender los sistemas vivos: su flexibilidad es incluso mayor; es decir, el número de nodos es cambiante, el tipo de interacciones es variable, y la magnitud de éstas también crece o disminuye. Son sistemas en los que juega un papel fundamental el *ruido*, tal y como los científicos entienden este término: el ruido, en este sentido, son las pequeñas oscilaciones aleatorias, desprovistas de información, en las interacciones entre los componentes de un sistema. Curiosamente, el ruido es algo real que afecta a todo sistema dinámico: de hecho, su existencia incomoda seriamente a quienes preferirían una naturaleza ajustada al milímetro a sus modelos preconcebidos —muchas veces a partir de unos pocos datos. Por otro lado, la existencia del ruido plantea un interesante reto ya

que a él se debe en buena medida la configuración de la naturaleza tal y como la conocemos; lo más desconcertante es que en principio no tendría por qué ser así: somos perfectamente capaces de imaginar un universo en el que no hubiera ningún ruido que afectase a los diferentes sistemas. Sin embargo, el ruido es el mecanismo que activa nuevas dinámicas y regímenes de funcionamiento en los sistemas para conseguir efectos tan importantes como, por ejemplo, la evolución.

En consecuencia, los sistemas que forman la naturaleza son altamente inestables e indeterminados y se ven afectados por el ruido. Pero todavía hay otro problema —especialmente delicado— que afecta al conocimiento de la naturaleza: la elección “ad hoc” de condiciones de contorno y condiciones iniciales. La dificultad es que estas condiciones no se pueden deducir desde el propio sistema; y, con toda probabilidad, tampoco son predecibles a partir de los sistemas que forman los niveles inferiores. Volveremos a hablar de ello con más detenimiento en el último capítulo.

3. COMPLEJIDAD

Lógicamente, la descripción matemática de los sistemas dinámicos (aquellos en los que tanto los nodos como sus interacciones varían con el tiempo) es todavía más difícil que la de sistemas comparativamente simples y fijos como el sistema solar, aunque la dinámica del sistema solar podría también considerarse para tiempos muy superiores a los de la existencia de la humanidad; por ejemplo, en una escala de miles de millones de años es muy probable que dicha dinámica cambie ostensiblemente. Aun así, para los científicos es relativamente sencillo crear un buen modelo matemático cuando se trata de un sistema dinámico *lineal*, es decir, un sistema en el que la influencia de A sobre B aumenta o disminuye siempre de forma constante. Cuando esta *linealidad* se pierde, en cambio, nos encontramos ante sistemas dinámicos no-lineales, cuyo comportamiento es muy difícil de captar en forma de ecuaciones ya que rápidamente se entra en *régimen caótico*, del que nos ocuparemos a continuación. Los físicos han desarrollado herramientas muy sofisticadas para crear modelos matemáticos bastante fiables, pero no obstante se enfrentan a dificultades que parecen insalvables.

La principal dificultad para describir sistemas —lineales o no— es que un aumento en la cantidad de nodos implica un aumento en la cantidad de interacciones; a esto hay que añadir que estamos muy lejos de tener una comprensión completa de todas las interacciones que pueden darse. Obviamente, esto hace que la descripción de un sistema sea progresivamente más difícil, hasta tal punto que la dificultad en la que se encuentra el científico puede alcanzar proporciones épicas; además, aun en caso de tener éxito lo más probable es que se trate de un conocimiento poco útil: las variables que sirven para la descripción o comprensión de un sistema en un momento determinado ya no sirven para otro momento, que quizás es el que más nos interesa. El ejemplo clásico que ilustra este problema es el de pretender determinar las posiciones y velocidades de las partículas de un gas en un volumen de dimensiones apreciables. El gas está compuesto por un número enorme de moléculas (del orden del número de Avogadro, es decir, $\sim 10^{23}$), por lo

que el conocimiento preciso del comportamiento de cada molécula no nos aportaría mucho para la comprensión de lo que realmente está sucediendo desde el punto de vista de nuestros intereses. Resulta mucho más informativo introducir magnitudes macroscópicas, como el volumen, la presión o la temperatura, y obtener la ecuación de estado de dicho gas, que nos permitirá saber cómo evolucionará entre diferentes estados de equilibrio.

Pero en el caso del gas aún sería posible suponer que las moléculas interaccionan muy poco entre sí, de manera que podría tratarse cada una de ellas de modo independiente de las demás y llevar a cabo en nuestros cálculos una suma ponderada que nos permitiese obtener los valores de las magnitudes macroscópicas referidas. Sin embargo, no resulta así en situaciones más complejas, como es el caso del clima, probablemente uno de los procesos que mejor ilustran la visión sistémica de la realidad física y —por eso mismo— uno de los ejemplos más recurrentes para ilustrar la dificultad que señalamos: todavía no somos capaces de obtener buenos modelos matemáticos que permitan describir adecuadamente el comportamiento del clima con semanas o meses de antelación. ¿Por qué? La respuesta, básicamente, es que se trata de un sistema complejo con un número tremadamente alto de posibles nodos, muchos todavía desconocidos, y con interacciones no-lineales que difícilmente serán captadas por ecuaciones matemáticas. Incluso si conseguimos identificar todos los nodos y sus interacciones para un determinado fenómeno —la tormenta de ayer—, las aproximaciones y simplificaciones que habremos tenido que hacer no nos servirían para predecir si habrá otra tormenta dentro de unas semanas o meses.

El panorama que se presenta a quien quiera entender completamente el comportamiento del clima es, por tanto, muy complicado. Pero el problema no ha hecho más que empezar: a lo señalado hay que añadir una propiedad de la naturaleza que los físicos están estudiando desde hace décadas y que hace que la construcción de un modelo matemático fiable sobre el comportamiento del clima sea una empresa poco menos que desesperada; esta propiedad es el *caos*. Como apuntábamos en el apartado anterior, el significado preciso que los físicos dan al caos es el de un proceso que, si bien está regido por leyes conocidas, es intrínsecamente impredecible porque es muy sensible a pequeñas diferencias en las condiciones iniciales, es decir, el punto de partida del sistema. El clima es tan difícil de predecir a largo plazo porque se trata de un sistema complejo no-lineal y caótico: contiene un número altísimo de nodos cuyas interacciones apenas conocemos y que son sumamente sensibles a cualquier alteración en el punto de partida. Dicho de otro modo, probablemente nunca seamos capaces de predecir el clima a largo plazo ya que es *intrínsecamente* impredecible. La pregunta que surge, en consecuencia, es cómo es posible que estos sistemas complejos no-lineales y caóticos hayan llegado a existir y a configurarse de esta manera en nuestro universo. ¿Cómo han llegado a organizarse e integrarse las partes de sistemas tan complejos a lo largo de la historia del cosmos y del planeta? ¿Es imaginable un universo completamente lineal, un universo sin caos? ¿Son la no-linealidad y el caos características intrínsecas del universo que nos alberga?

Como vimos al principio, nuestro paseo por el parque nos deparaba muchos otros ejemplos de sistemas: la bandada de urracas, el grupo de árboles, la hierba —¡toda la hierba que cubre el parque!—, el ciclo de la lluvia... o sistemas formados por la suma de estos y otros elementos, lo que comúnmente se conoce como *ecosistemas*. De nuevo nos encontramos ante una realidad sistémica y por tanto compleja, difícil de describir y probablemente impredecible. De hecho, el conocimiento más seguro que tenemos de los ecosistemas es que las consecuencias de alterarlos pueden resultar desastrosas, como ilustran numerosos ejemplos de la literatura científica. Mencionaremos solo uno bien conocido, la introducción del sapo de la caña de azúcar en Australia. Este batracio, originario de América Central y del Sur, se introdujo artificialmente en el continente australiano en 1935 para combatir una plaga de escarabajos que destruían las cosechas de caña de azúcar. Aparte de comer escarabajos, el sapo de la caña de azúcar emplea mecanismos de defensa ante posibles depredadores: genera toxinas venenosas mediante unas glándulas situadas en el lomo. En las regiones de América de donde proviene, sus depredadores naturales se han adaptado a estas toxinas, de tal forma que el número de sapos se mantiene dentro de unos márgenes estables: se alcanza una situación de equilibrio. En Australia, los potenciales depredadores resultaron ser muy sensibles a las toxinas del sapo de la caña de azúcar, ya que era algo a lo que nunca se habían visto expuestos y, lógicamente, no habían desarrollado los mecanismos necesarios para contrarrestarlas. El resultado fue una gran mortalidad entre los posibles depredadores, lo que condujo a que el sapo de la caña de azúcar, sin depredadores eficaces que controlasen su número, se haya multiplicado desde 1935 sin freno. Actualmente se estima que hay unos doscientos millones de sapos de la caña de azúcar en Australia, alcanzando dimensiones de plaga. El ejemplo adquiere tintes dramáticos si consideramos que, además, su introducción en el continente no ha conseguido exterminar los escarabajos que tenía que combatir.

El caso de la introducción del sapo de la caña de azúcar en Australia es sólo uno entre los muchos que se podrían presentar para ilustrar el delicado equilibrio en el que se encuentran los ecosistemas, formados por tal cantidad de nodos y de interacciones que resulta difícil predecir lo que pasará si se quita o introduce un elemento. La cuestión de fondo es que, nunca mejor dicho, la naturaleza es compleja. Una pequeña variación en un estado de equilibrio puede tener consecuencias imprevisibles, pues desconocemos todos los entresijos que acaban llevando a una respuesta u otra ante una perturbación concreta. La física ya conoce la existencia de diversos regímenes de comportamiento de los sistemas que estudia, dependiendo de los rangos de valores que puedan tomar algunas variables que los controlan. A presión atmosférica, por ejemplo, el agua se comporta como un líquido entre 0 y 100 °C, pero solo un poco por debajo de 0 °C se convierte totalmente en hielo y solo un poco por encima de 100 °C pasa a ser vapor. Se produce una transición de fase, ya que el sistema se comporta de una manera radicalmente distinta ante pequeñas perturbaciones externas. Este tipo de comportamientos no son la excepción sino más bien la norma en el universo, resultando casi siempre imposibles de predecir antes de que se produzcan: pensemos por ejemplo en

las avalanchas, en los terremotos, en los huracanes o en el final de una estrella que se convierte en un agujero negro. Hay además diferentes tipos de transiciones de fase en la naturaleza, dependiendo del grado de discontinuidad que se da en la transición de un régimen a otro.

Sin embargo, esto no es todo: ya nos hemos referido antes a la *jerarquía* que caracteriza todo lo sistémico; esta jerarquía se refleja en que, de hecho, cada nodo de un ecosistema es —muchas veces— otro sistema más reducido. Cada una de nuestras urracas, mirlos o robles, cuando los estudiamos en detalle, es una maravillosa red de partes que interactúan formando un pequeño “todo”. ¿Cuál es el sistema más pequeño, el más sencillo, dentro del gran ecosistema que representa nuestro parque?, ¿puede ser una bacteria que vive dentro del intestino de una urraca?, ¿una brizna de hierba?, ¿un microbio del suelo donde se esconden los insectos que son el alimento de los mirlos? Si estudiamos todos los genes y proteínas que forman una de estas bacterias veremos *miles* de nodos conectados en las formas más diversas y extraordinarias.

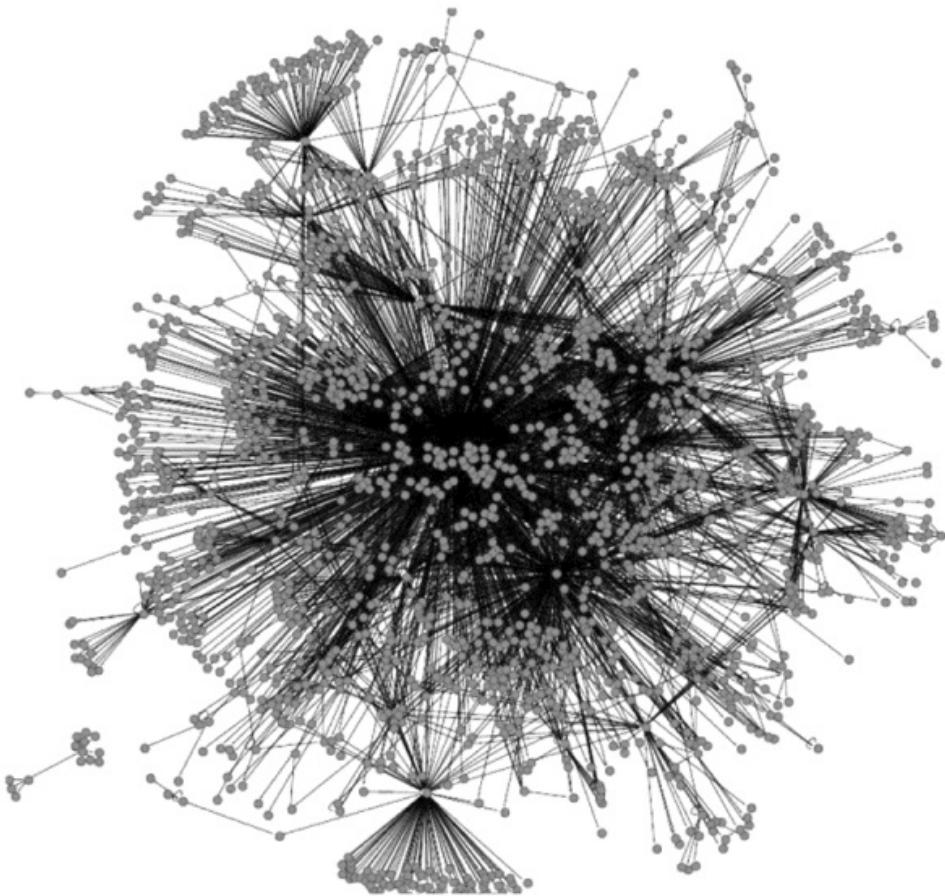


Figura 2

La figura 2, por ejemplo, muestra una red con las interacciones que se dan entre todos los genes de una bacteria (representados por los pequeños círculos de la red). El resultado es una intrincada maraña que ni siquiera nos da una visión completa del

funcionamiento de ese microorganismo. Surge, además, la siguiente pregunta: conociendo todos los genes y sus interacciones, ¿es predecible el comportamiento completo de la bacteria? La respuesta, muy probablemente, es negativa. El comportamiento de la bacteria se da en un nivel de descripción que no se explica completamente a partir de los niveles inferiores: se trata de una realidad emergente en sentido fuerte, como discutiremos en la última parte del libro. Baste decir por ahora que la pretensión de describir el comportamiento de un ser vivo, aún uno de los más sencillos, como si se tratase de un sistema (campo científico que se conoce hoy en día como *Biología de Sistemas*) es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la ciencia actual.

4. ESTRATEGIAS

Analizar, estudiar y caracterizar *a la vez* la totalidad de un sistema complejo, dinámico y no-lineal parece algo imposible con las herramientas actualmente disponibles. Al mismo tiempo no hay duda de que es el camino adecuado para describir la realidad física de modo fiable. Para lograr algún avance contamos con una estrategia de probada utilidad frente a problemas muy complejos y difíciles: descomponerlos en problemas más sencillos y simples e intentar resolverlos por partes; es decir, emplear la *reducción científica*. Según Frank Wilczek, premio Nobel de física, “un objeto complejo ha sido reducido a algo más sencillo cuando se ha mostrado o hecho plausible que lo más complejo puede analizarse en partes más simples y su comportamiento se puede sintetizar a partir del comportamiento de las partes”. Como señala el filósofo van Fraassen, se trata de recuperar cómo se nos aparece la naturaleza —su comportamiento — a partir de algo más profundo o fundamental, que incluso puede estar oculto. Este método, si bien no tiene porqué ser extrapolable al estudio de toda la realidad, es legítimo y necesario para poder hacer ciencia.

En el caso de los sistemas, el uso de esta estrategia viene facilitado por el hecho de que muchas de estas gigantescas redes sean modulares, es decir, formadas por sub-redes más pequeñas (módulos) a las que se puede asignar un papel concreto que ayuda a mantener el comportamiento global del sistema. Una de las desventajas de adoptar esta táctica de descomponer una gran red en módulos es que los módulos a menudo están formados por módulos más pequeños, que a su vez están formados por módulos más pequeños, que a su vez... Es muy difícil establecer cuáles son los límites dentro de esta jerarquía, si es que hay algún límite. En el trabajo científico lo habitual es tratar de identificar un módulo básico, es decir, uno que ya no puede descomponerse en otros menores, y estudiar su comportamiento. Los resultados son bastante sorprendentes, porque muchos de estos módulos básicos se comportan de un modo altamente sofisticado: funcionan como relojes, termostatos, osciladores...



Figura 3

Supongamos que un módulo está formado únicamente por nuestros dos viejos conocidos, los nodos A y B, que interaccionan entre sí tal y como se representa en el gráfico que aparece en la figura 3 en el que las líneas continuas indican activación y la línea discontinua indica inhibición. A y B pueden ser dos moléculas activas cualesquiera, dos genes o dos proteínas. Como se puede ver, en este modelo la molécula A estimula la producción de B, mientras que B rápidamente provoca la desaparición de A; además, A estimula su propia producción (la pequeña flecha circular encima de A).

El comportamiento de esta red, mostrado en la figura 4, refleja que se trata de un oscilador; es decir, el sistema fluctúa regularmente entre dos estados: un estado con alta cantidad de la molécula A (cada uno de los picos que aparecen sucesivamente a medida que avanza el tiempo) y baja cantidad de B (lo cual no se representa en la gráfica para facilitar su comprensión), y un estado con la situación contraria (baja cantidad de A y alta cantidad de B). Nos encontramos nuevamente con una regularidad temporal, como tantas que tienen lugar en la naturaleza, que ahora podemos explicar mejor mediante el funcionamiento de una sencilla red.

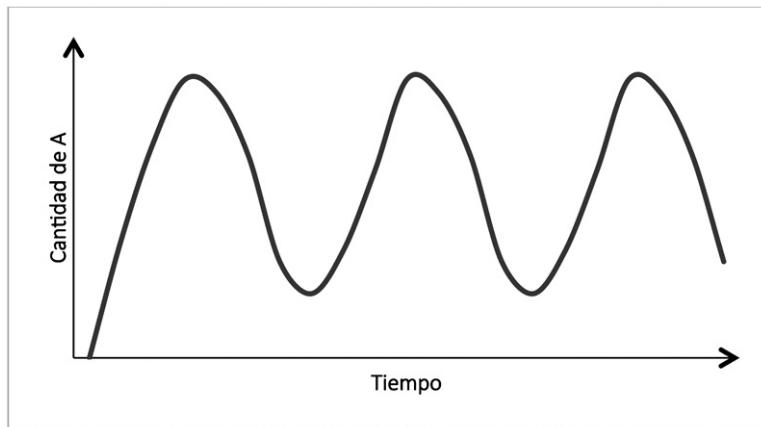


Figura 4

Otros tipos de módulos básicos, como los formados por tres nodos con relaciones de retroalimentación positiva y negativa, dan lugar a comportamientos todavía más sofisticados, a pesar de su escasa complejidad. Y decenas o cientos de módulos como estos combinados en grandes redes pueden originar procesos altamente sofisticados. Por

ahora todavía no es posible predecir mediante estas técnicas el comportamiento de sistemas dinámicos no-lineales y caóticos muy complejos, y no sabemos si algún día nos lo permitirán. Lo que sí se puede hacer, a fecha de hoy, es vislumbrar una estructura común a toda la realidad física circundante: la característica más notable de esta estructura es que genera diferentes grados de orden a distintas escalas, hasta alcanzar la totalidad de lo que nos rodea.

5. A MODO DE RESUMEN

En nuestro paseo por el parque —el encuentro con la naturaleza— hemos descubierto que la realidad física en la que estamos inmersos muestra un cierto grado de orden, unas regularidades y patrones que están de algún modo presentes en todo el universo. Estas regularidades son tanto cíclicas —repeticiones de procesos similares a lo largo del tiempo— como estructurales —sistemas complejos, dinámicos y no-lineales organizados en módulos que se van integrando a diferentes niveles. El funcionamiento de las regularidades da lugar a comportamientos muy específicos que introducen, a su vez, nuevas regularidades.

En varios momentos nos hemos preguntando por qué todo esto es así. No hay una respuesta fácil y unívoca a esta pregunta, y la que se dé depende de una cuestión previa y fundamental: toda esta estructuración u orden que vemos, ¿es una construcción mental del ser humano superpuesta a la realidad o es la respuesta de nuestro modo de conocer a algo que se da *realmente* en la naturaleza? Se trata de una de las preguntas básicas de la filosofía y, como todas las preguntas básicas de la filosofía, a lo largo de la historia pueden encontrarse respuestas muy diferentes. Nosotros estamos convencidos de que la naturaleza tiene realmente una estructura que el ser humano descubre cuando entra en diálogo con ella. Las estrategias científicas contemporáneas consideran la realidad física como un sistema de sistemas: un todo formado por partes que son —a su vez— “todos” formados por partes. Este modo de proceder ha permitido entrever niveles de organización en la realidad que hasta ahora pasaban desapercibidos. Al mismo tiempo, nos confirma en el convencimiento de que conocemos estructuras que se dan realmente en la naturaleza. Ahora bien, la constatación de numerosos errores en el conocimiento de la naturaleza a lo largo de la historia —y de las consecuencias que se han derivado de estos errores— nos tiene que llamar a la cautela en los juicios que hagamos sobre nuestro propio conocimiento.

Hay un nivel de estructuración de los sistemas complejos que es especial. En nuestra primera aproximación al mundo natural vimos sistemas cuya descripción mediante ecuaciones es relativamente sencilla —hemos puesto de ejemplo nuestro sistema solar— o extremadamente compleja —el clima. De entre todos los sistemas que conocemos, sin embargo, hay unos que resultan especialmente esquivos a la hora de describirlos mediante ecuaciones, por su naturaleza cambiante y dinámica: el ejemplo eran las bacterias del suelo de nuestro parque o los insectos y los mirlos. Algunos sistemas, en definitiva, se caracterizan por una propiedad muy peculiar: la vida. Es una propiedad

peculiar que captamos intuitivamente pero que nos resulta muy difícil definir con precisión. Porque la distinción entre lo vivo y lo inerte es sumamente compleja: eso es, precisamente, lo que intentaremos hacer en el siguiente capítulo.

II. VIDA

1. ENERGÍA Y ENTROPÍA

La primera reflexión que surgió de nuestro paseo por el parque, al principio del capítulo anterior, fue la existencia de ciclos y regularidades temporales. Decíamos que estas regularidades se inscriben dentro de un proceso temporal unidireccional que avanza siempre hacia el futuro. Esta direccionalidad del tiempo, en gran medida, es el resultado de la segunda ley de la termodinámica.

La termodinámica estudia el comportamiento de la energía en el universo, especialmente a nivel macroscópico, es decir, a escalas visibles al ojo humano. La observación de partida es que cuando dos sistemas aislados con distintas energías entran en contacto, sus energías tienden a igualarse hasta alcanzar un equilibrio. Por eso, la termodinámica es la parte de la física que describe los estados de equilibrio energético. A lo largo de la historia se han formulado varias leyes de la termodinámica, como la que sostiene que la energía de un sistema aislado se mantiene siempre constante —la famosa ley de conservación de la energía. La segunda ley es muy importante, porque establece que los procesos termodinámicos siempre van en una dirección: la que conducirá al estado final de equilibrio del sistema. Así, si en una habitación que está a una temperatura ambiente de 22 °C ponemos un café muy caliente, con el tiempo tanto el café como la habitación estarán a la misma temperatura (ligeramente superior a los 22 °C iniciales de la habitación, si la habitación estuviese totalmente aislada del resto del universo). Es muy importante entender que esta ley excluye una posibilidad: si partimos de la situación final —el café y la habitación a la misma temperatura— el café *nunca* se calentará espontáneamente extrayendo calor de la habitación. Las implicaciones de estas leyes son múltiples. Por ejemplo, cuando llenamos con gas una cavidad en la que había vacío, las moléculas del gas terminarán por distribuirse homogéneamente dentro de la cavidad. O, con un ejemplo más cotidiano, si ponemos una gota de leche en el café, las moléculas de leche terminarán por dispersarse totalmente entre las moléculas de café hasta formar una mezcla homogénea. Pero a partir de un café con leche ya mezclado, las moléculas de leche *nunca* se agruparán espontáneamente para formar una gota.

La segunda ley de la termodinámica establece, por tanto, que el universo avanza siempre desde situaciones de desequilibrio, caracterizadas por configuraciones físicas poco probables (cuando todas las moléculas del gas están agrupadas en un rincón o la gota de leche localizada en un lugar de la taza de café) hasta situaciones de equilibrio, que se caracterizan como configuraciones físicas muy probables porque son compatibles con una multitud de estados internos del sistema; independientemente de las posiciones y velocidades precisas de cada una de las moléculas del gas o de la leche, lo más probable es que tanto uno como otra se encuentren dispersos en la cavidad y en el café, respectivamente. En consecuencia, la segunda ley marca la dirección física de avance del tiempo, permitiendo la distinción física entre pasado y futuro; es lo que se llama la *flecha del tiempo* termodinámica; por flecha se entiende que es una dirección orientada. Esto, en definitiva, es lo que hace que el tiempo siempre avance en una sola dirección y que viajar al pasado sea considerado imposible (es decir, nunca pasará de ser ciencia ficción). La opinión común entre los físicos es que en el *Big Bang* el universo nació en un estado de muy baja entropía, sin que nadie sepa muy bien por qué. A partir de este estado altamente improbable, muy alejado del equilibrio, el cosmos va avanzando hacia su estado de equilibrio.

Todos los sistemas naturales que nos rodean siguen necesariamente los principios de la termodinámica. En nuestro paseo diario probablemente veremos algunas piedras, colinas o alguna montaña en la distancia, o quizás un pequeño riachuelo. La piedra y el agua son realidades sistémicas, como explicábamos en el capítulo anterior, pero son sistemas naturales *inertes*: siguen irremisiblemente los principios generales de la termodinámica del universo y decaen hacia su equilibrio termodinámico a no ser que reciban energía desde una fuente externa. Esto se ve muy bien en el caso de sistemas inertes estáticos, como es el caso de la piedra: permanece inmóvil hasta que un agente externo haga algo con ella. En cambio, sistemas inertes pero aparentemente más activos, como el agua del río o un volcán, se mantienen en movimiento porque están recibiendo aportes externos de energía: la lluvia embalsada en puntos altos contiene una energía que le lleva a descender por la ladera; en el caso de la actividad volcánica, la energía acumulada en una cámara de magma se escapará a través de una grieta en la corteza terrestre. De no ser por eso, el agua del río dejaría de correr y el volcán terminaría apagándose. Dicho de otra forma: todo lo inerte, el mundo inorgánico, tiende a decaer y descomponerse en su imparable avance hacia el equilibrio termodinámico final.

Sin embargo, la baja entropía inicial del cosmos —a la que ya hemos hecho referencia — permite que aparezcan estructuras capaces de persistir lejos del equilibrio sin alterar la tendencia general del universo. Entre los sistemas que hemos observado en nuestro paseo se encuentran algunos que desafian la *despiadada* dictadura de lo inorgánico: pájaros, árboles, insectos o bacterias se distinguen claramente de lo inerte, formando la clase de los *sistemas vivos*. La distinción, desde un punto de vista físico, es que estos sistemas *crean* energía; ahora bien, esto sólo es una apariencia: la energía no se puede crear. Propiamente, lo que hacen los *sistemas vivos naturales* es obtener energía del exterior y utilizarla para mantener su estructura interna y su propio funcionamiento

desprendiéndose de lo que sobra. Es decir, los seres vivos obtienen energía de buena calidad del entorno que les rodea —y por buena calidad queremos decir que es energía con baja entropía— para mantenerse con baja entropía y expulsar la misma energía que reciben en un formato de baja calidad —energía con alta entropía. En último término, la fuente de energía de buena calidad para todos los seres vivos es la luz del sol, cuyos fotones tienen baja entropía. La energía de baja calidad, la que se expulsa, es habitualmente calor.

¿Cómo logran los seres vivos aprovechar la energía que les rodea? Una condición indispensable es un cierto aislamiento del exterior que, al mismo tiempo, deje entrar energía de baja entropía y expulse la energía de alta entropía; es decir, algún tipo de membrana o barrera que controle el tráfico de energía. Podemos comparar este comportamiento con el de una piedra, que descansa sobre la tierra y recibe la luz del sol, tal vez la piedra se caliente, pero la energía que recibe no sirve para frenar su lenta e imparable descomposición. Un sistema vivo, por el contrario, utiliza esa misma tierra y esa misma luz para mantener su orden interno y mantenerse alejado del equilibrio termodinámico. Hay quien ha calificado este singular comportamiento de *egoísta*: en efecto, todo lo vivo parece centrarse en sí mismo, de tal forma que se aprovecha de la energía de calidad (de baja entropía) presente en su entorno para mantener su estructura sistémica y sobrevivir. ¿Por qué se dan en el cosmos estos sistemas egoístas, que parecen comportarse al margen de la norma general? ¿Existe alguna ley que explique la formación de estas estructuras vivas, que justifique su operación interna en estados muy alejados de su situación de equilibrio termodinámico?

Algunos científicos, como Stuart Kauffman, han llegado a postular la existencia de una cuarta ley de la Termodinámica que pudiera dar explicación a esta tendencia que parece existir en el universo en favor de la aparición y la persistencia de lo vivo. Es importante notar aquí que la aparición de la vida no parece ser simplemente una cuestión local o marginal en el universo en que vivimos. Ciertamente, hoy por hoy solo tenemos datos de la existencia de vida en nuestro planeta y, concretamente, en una franja muy pequeña por encima y por debajo de la superficie terrestre. Sin embargo, ninguna ley física prohíbe que pueda existir vida en otros lugares del universo. Por otro lado, la presencia de la vida (tal y como la conocemos) parece implicar que las constantes físicas universales que rigen la evolución del cosmos en su conjunto han de tener valores muy precisos. Es lo que se conoce como “ajuste fino” del universo. Una pequeña variación en dichos valores haría que nuestro universo fuera muy distinto del que conocemos. Por ejemplo, si la constante de gravitación universal G (a la que se asigna un valor de $6.674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2}$) fuera ligeramente superior, el universo colapsaría convirtiéndose en un gran agujero negro; y si fuera ligeramente inferior, no habría podido dar lugar a las condensaciones de masa que forman las estrellas, en donde se producen los elementos necesarios para la vida (carbono, nitrógeno y oxígeno, principalmente) ni, por supuesto, a planetas como la Tierra. Nos hallaríamos en un universo de partículas fundamentales y radiación en absoluta dispersión.

Quizás la característica más importante del universo en el que nos encontramos es que se halla en expansión y se va enfriando, evitando así que la fuerza gravitatoria domine todo el espacio. Esto permite, en general, la diferenciación entre diversos tipos de partículas, interacciones y objetos. La cuestión de fondo a la que aquí nos enfrentamos es que la fuerza de la gravedad es singular desde el punto de vista de la termodinámica. Hemos dicho que la entropía es la tendencia al desorden y a la dispersión de un conjunto grande de partículas que se observa en los estados macroscópicos. Así, por ejemplo, un gas encerrado en un globo aumenta su entropía si el globo se pincha y el gas puede difundirse y ocupar todo el volumen que tenga a su disposición (la habitación entera donde estaba el globo). El gas aumenta su entropía porque cada una de sus partículas tiene muchas más posibilidades de hallarse en un lugar o en otro, con una velocidad u otra, cuando el gas está ocupando un volumen mayor.

Sin embargo, esta visión intuitiva de la entropía cambia cuando tenemos en cuenta la interacción gravitatoria y la entropía específica que genera. La gravedad es una fuerza de largo alcance que es siempre atractiva y se opone a la dispersión de las partículas del universo. Cuando tenemos un conjunto grande de partículas que interactúan solo gravitatoriamente, la situación “normal”, más probable (y por eso con mayor entropía), sería que todas se unieran, se juntaran entre sí, formando un nuevo objeto que tuviera toda la masa disponible. La situación menos probable (y de menor entropía) sería la de tener partículas repartidas de modo prácticamente equidistante, uniforme, en el espacio disponible. Entonces, las fuerzas gravitatorias se equilibrarían entre ellas y las partículas no llegarían a poder agruparse.

Pues bien, esta es en cierto modo la situación inicial del universo en el Big Bang y la responsable última de su bajísima entropía. La fuerza gravitatoria se hallaba inicialmente en un sutil equilibrio. Ningún grupo de partículas estaba más cerca entre sí que otras, de manera que pudiesen constituir la semilla inicial a partir de la que la gravedad formara las grandes estructuras que hoy día conocemos. Solo las pequeñas fluctuaciones iniciales en las distancias relativas entre las partículas fueron permitiendo paulatinamente que algunos grumos de partículas se fueran destacando de los demás por efecto de la gravedad y rompieran la gran simetría inicial del Big Bang, dando lugar con el tiempo a la formación de galaxias, estrellas y planetas. Toda esta formación de objetos ligados por la interacción gravitatoria supone un enorme aumento de entropía respecto a la situación inicial. La entropía generada por la gravedad es mucho mayor que la asociada a las otras interacciones fundamentales, a causa del dominio gravitatorio del universo a gran escala. De hecho, las estructuras con mayor entropía en el universo son los agujeros negros, pues son los objetos donde la gravedad campa a sus anchas, sin ninguna otra fuerza que pueda hacerle de contrapeso. Por eso, se puede decir que la situación del universo en las proximidades del Big Bang es opuesta, termodinámicamente hablando, a la de un agujero negro. Se trata de una situación de mínima entropía frente a otra de máxima. Esta es una de las razones por las que hoy en día tiene poco soporte científico la hipótesis de un universo oscilante, en el que cada Big Bang provendría de un agujero negro en el que habría implotado el universo anterior. Es muy difícil conciliar la segunda

ley de la Termodinámica con un universo cíclico. El hecho es que los estados iniciales del universo tenían una entropía muy baja porque los objetos ligados por las fuerzas gravitatorias eran aún inexistentes: la gravedad entonces se estaba solo “despertando”.

El enfriamiento del universo y la particularidad termodinámica de la interacción gravitatoria favorecen la formación de estructuras individuales en el universo a diversas escalas, en línea con la tendencia general de aumento de la entropía que establece la segunda ley. Pero no dan razón aún del fenómeno de la vida. La propuesta de una cuarta ley de la termodinámica pretendería explicar la tendencia *negantrópica* de los sistemas vivos, es decir, la tendencia a mantener una entropía propia baja. Algunas propuestas postulan un máximo en la producción de entropía a la hora del intercambio energético que los seres vivos realizan con el ambiente. No es solo que el viviente aumente la entropía del universo (en consonancia con la segunda ley) para mantener baja su propia entropía, sino que, además, lo haría de forma máxima o extrema, según sus circunstancias concretas. ¿Serviría tal caracterización para definir la vida de un modo termodinámico? Como veremos a lo largo de este libro, tal caracterización resulta muy interesante, pero no parece suficiente. Por otro lado, el mismo concepto de entropía puede definirse desde distintas perspectivas, dependiendo del problema concreto que estemos estudiando. Por este motivo, la caracterización de la supuesta cuarta ley difícilmente tendría un carácter universal.

Quizás el cosmos simplemente tolere lo vivo como una aberración o una fluctuación estadística, o tal vez los seres vivos sean la excepción que confirma la regla de un universo mayormente inerte. No tenemos una respuesta definitiva, pero a juzgar por la historia de nuestro planeta parece claro que cuando la vida se instala en algún rincón del cosmos, su permanencia y progresión son imparables. En buena medida, esto se debe a otra característica que distingue a los sistemas vivos del mundo inerte: la reproducción, es decir, la capacidad de hacer una copia de sí mismo, generando otra entidad sistémica de características similares y con existencia propia e independiente. Este proceso requiere mucha energía, tanta que —de hecho— todo sistema natural vivo dedica a la reproducción buena parte de la energía que obtiene del medio externo. Esto no debe extrañarnos, ya que la reproducción es un mecanismo muy eficaz para asegurar que un sistema concreto, con la estructura interna y la funcionalidad que lo caracterizan, perdurará a lo largo del tiempo. La tendencia del universo a decaer y descomponerse es tan fuerte que nada puede mantenerse vivo eternamente; ante este panorama, la solución que han encontrado los sistemas vivos es replicarse y pasar el testigo a nuevos ejemplares, evitando así la extinción total del sistema. Dicho de otro modo, si no fuese por la reproducción, la vida habría desaparecido del universo hace mucho tiempo.

El precio a pagar es muy alto, porque no sólo hace falta energía: también es necesario encontrar el modo de almacenar *toda* la información relevante acerca del sistema, es decir, su estructura interna, sus interacciones, su dinamismo, sus estados... y utilizar esa información para generar copias que a su vez la transmitan a copias futuras. Expuesto sobre el papel puede parecer muy fácil, pero supone un auténtico reto para cualquier sistema natural. Precisamente la información que poseen los seres vivos explica por qué

se hallan en estados particulares de baja entropía: su organización interna no es una simple acumulación de datos desorganizados. Al contrario, la información que posee un ser vivo contiene patrones de funcionamiento que se transmiten mediante la reproducción: al hacer una copia de sí mismo, el sistema vivo deposita en ella esta información, estos patrones, y así perduran en el tiempo.

No vamos a entrar ahora en cómo pudo aparecer en el cosmos algo tan sofisticado como lo vivo. Existen teorías muy buenas al respecto y en general los científicos están de acuerdo sobre las líneas generales de la transición desde sistemas inorgánicos a los primeros sistemas vivos en nuestro planeta. Lo que nos interesa ahora es examinar con detalle nuestro mirlo, nuestra bacteria, nuestra brizna de hierba y encontrar en ellos las características básicas de todos los sistemas vivos, de los sistemas que “nacen, crecen, se reproducen y mueren”.

2. CRECER

Todos tenemos experiencia de que crecer no es sólo aumentar de tamaño, sino sobre todo *madurar*; de hecho, cuando una persona engorda no decimos que crece, aunque aumente de tamaño. Del mismo modo, si notamos algún tipo de cambio que le prepara para su vida futura —aunque no crezca en tamaño— decimos que ha madurado, que ha crecido. Tal vez los que nos dedicamos a la enseñanza notamos esto con mucha frecuencia: un alumno, un profesor joven, está creciendo mientras se prepara para el futuro. Algo similar sucede en los sistemas vivos: la maduración es el proceso que los prepara para hacer aquello que garantizará su pervivencia futura; y, como hemos visto, la pervivencia de los sistemas vivos se garantiza por la reproducción. Así, un pájaro, una planta, se desarrollan desde sus estadios iniciales hasta el momento en que están capacitados para generar nuevos individuos similares a ellos. Este proceso de crecimiento y maduración requiere un gran consumo de energía para que todo el sistema se mantenga en funcionamiento: todos tenemos experiencia de cuánto necesita comer alguien que está creciendo. El sistema vivo obtiene la energía presente en el medio externo y la procesa en su interior mediante el *metabolismo* —del griego *metabolé*, cambio: un conjunto de reacciones químicas en las que intervienen diversas moléculas que contienen, entre otras cosas, átomos de carbono. Por esto se suele decir que la vida, al menos en la Tierra, está basada en el carbono.

Algunos sistemas vivos son capaces de captar el carbono presente en el aire en forma de CO₂ y fijarlo en las moléculas que intervienen en los procesos metabólicos. Estos seres vivos se denominan, en consecuencia, *autótrofos*, es decir, “los que se alimentan a sí mismos”: son todos los organismos que utilizan la luz solar, o en ocasiones alguna sustancia química, para fijar el carbono de la atmósfera y así fabricar las moléculas necesarias para la vida (azúcares, lípidos o proteínas). En nuestro paseo nos hemos encontrado con diferentes sistemas autótrofos: el árbol o la brizna de hierba emplean la fotosíntesis para fijar el carbono gracias a la energía presente en la luz del sol.

Otros organismos vivos no pueden fijar el carbono presente en el aire, por lo que han de obtener directamente las moléculas energéticas ricas en carbono para después convertirlas en energía propia: son los sistemas *heterótrofos*, “los que se alimentan a partir de otros”. Ejemplos que podemos encontrar en nuestro paseo son los mirlos, un perro, o nosotros mismos: nos alimentamos de otros seres vivos para obtener de los nutrientes moléculas ricas en átomos de carbono. En cualquier caso, tanto sistemas autótrofos como heterótrofos dependen radicalmente de la luz solar: todos los vivientes que conocemos se aprovechan, directa o indirectamente, de la misma fuente energética de baja entropía.

La distinción entre sistemas autótrofos y heterótrofos no es trivial: de hecho, determina muchas de las características más básicas de los sistemas vivos como son el movimiento, la percepción y su actividad sobre el entorno. En efecto, cuando la energía escasea y el organismo vivo ve amenazada su supervivencia, el resultado suele ser algún tipo de *reacción* en busca de nuevas fuentes de energía. Las plantas, por ejemplo, cambian su orientación a lo largo del día para maximizar la cantidad de luz que reciben del sol, y en ocasiones hacen auténticas proezas lanzando pequeñas ramillas trepadoras que suben hasta alcanzar una zona bien soleada. Nuestro mirlo se pasará la mayor parte del día hurgando en la tierra en busca de insectos y gusanos con los que obtener los nutrientes que pueda transformar en energía; incluso utilizará algo tan sofisticado como el vuelo para cubrir grandes distancias si es necesario. Hasta formas de vida tan primitivas como las bacterias, al menos las que son heterótrofas, tienen sensores que detectan las condiciones externas y les permiten moverse hacia la luz o hacia zonas donde los nutrientes son más abundantes.

El sistema vivo, por tanto, tiene dos campos de actividad estrechamente relacionados: interior y exterior. La actividad interior la forman las reacciones químicas que constituyen el metabolismo; la exterior la componen todas sus respuestas a los cambios en el entorno. Mediante ambos tipos de actividad los sistemas vivos mantienen su estabilidad interna y conservan su funcionamiento, con cierta independencia de las condiciones externas. El nombre técnico de esta estabilidad interna es *homeostasis*, que significa más o menos “permanecer igual”, y es otra de las señas de identidad de los seres vivos. Uno podría preguntarse si, al final de todo, la homeostasis no es una mera cuestión de perspectiva. Dependiendo de la intensidad de la perturbación externa y de la estabilidad inicial del sistema, la perturbación modificará o no radicalmente la estructura de dicho sistema. De hecho, hay algunas perturbaciones externas tan extremas que el viviente que se encuentra con ellas es incapaz de reaccionar y mantener su homeostasis; la dramática consecuencia de este encuentro es el final de ese ser vivo, la muerte.

Sin embargo, a pesar de la muerte, podemos decir que los seres vivos funcionan en un rango de variables físicas dentro del cual usan su metabolismo para mantener sus patrones de funcionamiento. Son capaces de asumir o amortiguar las alteraciones exteriores en beneficio propio, integrándolas en los diversos niveles de funcionamiento con que cuentan al servicio del todo que forman. Por ello, su intercambio energético con el exterior se encuentra *altamente orientado*: energía de baja entropía y buena calidad

hacia su interior y energía de alta entropía y poca calidad hacia el exterior. El sistema solar, el átomo o la piedra de nuestro parque carecen de homeostasis en este sentido “fuerte”: no tienen metabolismo ni reaccionan para mantener su estructura interna cuando un cambio exterior los altera. Si un asteroide gigante choca con Marte, el sistema solar se puede reorganizar siguiendo leyes muy precisas o quizás deje de existir como tal sistema, pero en cualquier caso no *reaccionará activamente* para recuperar y mantener la estructura que tenía antes del impacto como lo haría un ser vivo. Simplemente, no podemos esperar que lo haga, como tampoco lo esperamos de nuestra piedra si se resquebraja como resultado de un impacto.

3. REPRODUCIRSE Y MORIR

Todo ser vivo es un sistema natural que intenta perpetuarse. Para lograr esto tiene dos medios: la alimentación y la reproducción. La reproducción permite la pervivencia del sistema a muy largo plazo mediante copias de sí mismo. Estas copias tienen existencia independiente y se generan mediante la transmisión de información relativa a la estructura, el dinamismo interno, las estrategias de supervivencia y los modos de reaccionar a cambios externos que son propias de cada sistema vivo. Así, un ser vivo pervive en el tiempo mediante el almacenaje y la transmisión de información. A pesar de lo increíblemente complejo que parece este proceso, todos los sistemas naturales vivos que hay en nuestro planeta son capaces de almacenar y transmitir información con gran eficacia. El secreto de esta eficacia es un secreto a voces, ya que todos utilizan la misma estrategia: una molécula llamada ADN, que además es relativamente sencilla.

El ADN es una larga cadena constituida por unidades más sencillas, los eslabones, que reciben el nombre de *nucleótidos*. En cualquier cadena de ADN, por larga que sea, sólo hay cuatro tipos distintos de nucleótidos, representados habitualmente con letras: A, C, G o T, correspondientes a las moléculas adenina, citosina, guanina y timina. El ADN de un ser vivo, por tanto, se puede representar como una larga secuencia compuesta por repeticiones de estas cuatro letras en un orden concreto, algo así como “...AATGCGCGCTTAAGT...” La longitud de esta cadena cambia en cada ser vivo, pero suele ir desde varios miles de letras en las bacterias más sencillas hasta miles de millones en otros seres vivos más complejos, como los seres humanos. Dentro de esa larga secuencia se pueden distinguir secciones en las que la combinación de letras tiene *sentido*: los genes. Cuando hablamos de sentido, en el contexto de los genes, queremos decir que la secuencia concreta de letras forma un código que posteriormente se interpreta en la fabricación de proteínas. Esto es muy importante, ya que las proteínas son biomoléculas fundamentales para construir y mantener la vida. De modo que los sistemas vivos leen su código genético para fabricar proteínas: de hecho, el mecanismo de lectura es una maquinaria molecular tan importante que está presente en todos los sistemas vivos naturales conocidos.

Durante la existencia de un ser vivo, el ADN se lee siempre que hace falta fabricar alguna proteína para mantener el funcionamiento del sistema o para reaccionar a

estímulos externos; para su homeostasis, en definitiva. En consecuencia, precisamente la lectura del ADN permite que un sistema vivo natural sobreviva. Por eso mismo, tan importante como leer correctamente las instrucciones contenidas en el código genético es asegurarse de que éste se transmite correctamente a las nuevas copias que asegurarán la pervivencia de ese ser vivo. Es decir, durante la reproducción el sistema replica su manual de instrucciones para que cada nueva copia funcione de forma similar. Esta es la razón por la que a menudo se compara el ADN con un “programa”, un libro de instrucciones o los planos para la construcción de una casa: la versión concreta de ADN que lleva y transmite un sistema vivo contiene todas las claves para su pervivencia futura. El ADN tiene, por así decirlo, la misión de guiar y seleccionar todo el desarrollo químico del ser vivo: en este sentido, consideramos que el *programa* contenido en el ADN es “mayor” que el mero resultado de agregar unos componentes químicos.

La reproducción, por tanto, se relaciona con la supervivencia de un sistema vivo. Pero esta relación es sólo una cara de la moneda: la otra es, precisamente, la muerte. En efecto, reproducción y muerte están estrechamente vinculadas: en algunos seres vivos este vínculo se percibe de forma dramática, ya que mueren inmediatamente después de reproducirse. Pero incluso en aquellos seres vivos que no mueren tras reproducirse —y que incluso pueden vivir muchos años después— reproducción y muerte están relacionadas: el hecho de que los seres vivos sean capaces de reproducirse garantiza que la vida seguirá adelante aunque el sistema decaiga y termine por dejar de existir como sistema vivo. Como ha sugerido algún autor, la única ley de la biología es, precisamente, que todo ser vivo ha sido engendrado. Es cierto que a veces se dice que un volcán o una galaxia “nacen”, o que hemos asistido a la “muerte” de una estrella, pero “nacer” y “morir” se usan aquí con un sentido metafórico y, desde luego, muy diferente de lo que sucede en el ámbito de los sistemas vivos.

Cuando observamos este proceso a lo largo del tiempo vemos que reproducción y muerte forman un *ciclo vital*: períodos regulares de reproducción, muerte, reproducción, muerte... una *regeneración* recurrente, una especie de “empezar de cero” de nuevo con cada ciclo. Esta configuración peculiar de lo vivo tiene además otra consecuencia muy importante, ya que permite distinguir los sistemas según el lado del ciclo en el que se encuentran. Así, en un lado del ciclo está el sistema que se ha reproducido y que más tarde desaparecerá, y al otro lado se encuentra un nuevo sistema que es copia del anterior y que seguirá su propia dinámica. Dicho de otro modo: los ciclos de reproducción y muerte son una de las formas de distinguir *individuos*.

Las distinciones precedentes señalan una frontera relativamente clara entre lo inerte y lo vivo. Sin embargo, el límite es más difuso de lo que podría esperarse, sobre todo si se tiene en cuenta la posibilidad de construir sistemas *vivos* artificiales que imitan las propiedades de los seres vivos, posibilidad que está cerca de convertirse en una realidad. En diferentes laboratorios se han construido sistemas vivos artificiales para tratar de recrear de algún modo el origen de lo vivo a partir de lo inorgánico. Estos sistemas vivos artificiales son sistemas químicos mínimos cuyo funcionamiento es muy similar al de un ser vivo, como por ejemplo los llamados *conjuntos auto-catalíticos colectivos*: varias

reacciones químicas que funcionan en serie, concatenadas, y son por tanto auto-contenidas. La Figura 5 representa esquemáticamente el funcionamiento de un conjunto auto-catalítico en el que dos elementos, A y B, pueden reaccionar entre sí por dos vías distintas: por un lado (la que podríamos llamar vía 1, a la izquierda) dan lugar al compuesto C; reaccionando de otra manera (la vía 2, a la derecha) darán otro producto diferente, el compuesto D. Si además resulta que C (una vez que se ha formado) facilita la formación de D, y a su vez D facilita la formación de C, tenemos un ciclo cerrado en el que basta con que la reacción entre A y B comience para que todo el ciclo se sostenga en el tiempo mientras A y B no se agoten. El ciclo se llama conjunto auto-catalítico ya que las reacciones que tienen lugar en su interior proporcionan los catalizadores necesarios para que se mantenga en funcionamiento (un catalizador es una sustancia que facilita una reacción química, como hacen C y D en el ejemplo). En este caso, C y D se auto-mantienen gracias al aporte de A y de B.

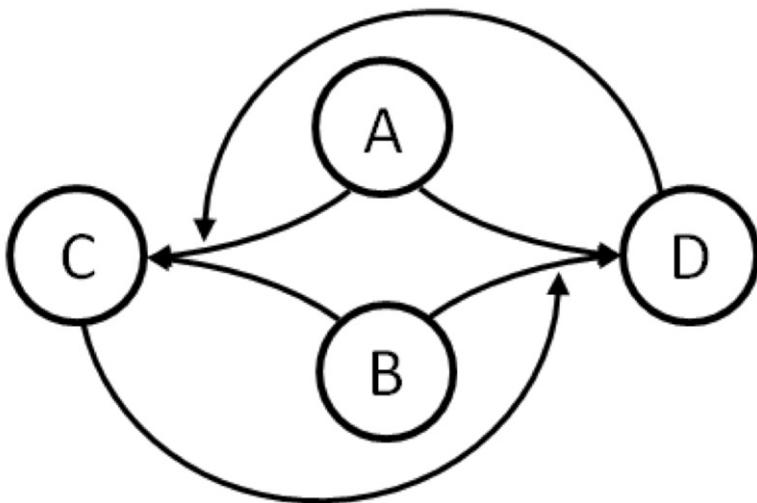


Figura 5

Estos sistemas pueden funcionar en un tubo de ensayo, en el laboratorio. Pero también podríamos encontrar este tipo de ciclos en condiciones naturales, aunque para eso todos los elementos que reaccionan deberían estar confinados en un espacio reducido. Los científicos, por ejemplo, han atrapado algunos de estos conjuntos de reacciones dentro de vesículas, pequeñas estructuras huecas de tamaños microscópicos que son muy fáciles de fabricar en el laboratorio. Un conjunto auto-catalítico atrapado en el interior de una vesícula es algo bastante parecido a una célula, el elemento básico de lo que hemos descrito como sistemas vivos naturales. De hecho, se ha visto que estos sistemas artificiales pueden “reproducirse” de forma sencilla mediante la simple división de la vesícula que los contiene en dos vesículas más pequeñas. Si cada una de las vesículas “hijas” lleva los componentes necesarios, los ciclos de auto-catálisis seguirán funcionando dentro de cada una de ellas. Todo ello pone de relieve otro aspecto muy importante: un sistema vivo tiene que estar delimitado claramente del exterior. En la naturaleza esta delimitación se hace mediante una membrana. En este sentido, el sistema vivo se “aisla” de su entorno mucho más de lo que puede hacerlo cualquier ser inerte:

este aislamiento se debe a que la unidad del sistema vivo es mayor que la de lo inerte. Esta unidad es el resultado de su organización interna: la necesidad de un flujo ordenado de energía que garantice el mantenimiento de unos patrones de funcionamiento hace que todo el metabolismo del viviente funcione al unísono.

Aun así, estos sistemas auto-catalíticos carecen de algo que hemos considerado crucial y universal a todos los sistemas vivos naturales: la molécula portadora del programa o conjunto de instrucciones que permitirán generar una copia del sistema. Ya hemos explicado cómo el ADN es la herramienta que emplea cualquier sistema vivo natural para asegurar su pervivencia, tanto durante su vida como en la generación de copias de sí mismo. Algunos investigadores, en el intento de reproducir el origen de la vida, han construido sistemas auto-catalíticos en los que las moléculas que reaccionan químicamente son, precisamente, moléculas portadoras de este tipo de instrucciones. En sus experimentos emplean moléculas con ARN, un ácido nucleico similar al ADN (con ácido ribonucleico en vez de ácido desoxirribonucleico). Por ejemplo, se han creado conjuntos auto-catalíticos formados por dos fragmentos de ARN que reaccionan para dar un fragmento mayor —llámemosle X— el cual tiene la propiedad de hacer reaccionar esos mismos fragmentos iniciales de ARN y producir otra molécula diferente —llámemosle Y. A su vez, Y es el catalizador de la reacción que genera X, y así se cierra el ciclo. Si este sistema auto-catalítico, portador de un metabolismo (las reacciones químicas) y de una molécula con capacidad de almacenar y transmitir las instrucciones necesarias (los ARN X e Y), queda delimitado por una membrana dentro de una pequeña vesícula, tenemos algo muy parecido a lo que probablemente sirvió como base para la aparición de los primeros sistemas vivos naturales: una *proto-célula* (o sea, el germen de lo que podría llegar a ser una auténtica célula viva).

En la proto-célula que acabamos de describir se integran todos los elementos básicos que forman parte de un sistema natural vivo: un *programa*, un *metabolismo* y un *contenedor*. Efectivamente, las moléculas portadoras de instrucciones ofrecen el programa, la información necesaria para que se mantenga una cierta identidad en el conjunto de todas las posibilidades; las reacciones químicas generan la energía necesaria para mantener la homeostasis del sistema con sus estructuras básicas, y la membrana funciona como una barrera física que separa el sistema del exterior. Con más o menos complejidad, esta configuración se encuentra en todas las formas de vida que se dan sobre la Tierra, y las mismas biomoléculas cumplen en todas ellas los distintos papeles de programa, metabolismo y contenedor. Es más, podemos aventurar que si nos encontrásemos sistemas naturales vivos en otro lugar o momento del Universo, probablemente tendrán una configuración parecida, aunque los elementos que los componen —las moléculas— puedan ser diferentes.

4. AUTO-CONSTRUCCIÓN

En el apartado anterior hemos hecho referencia a la auto-catalisis, el proceso mediante el cual un proceso químico se mantiene *por sí mismo*. También hemos hablado de que un

sistema natural vivo hace copias de sí mismo, o que *genera* su propia energía... esta referencia constante a lo que los sistemas vivos hacen por sí mismos y en su propio beneficio se refleja mediante una partícula muy recurrente en la bibliografía sobre la vida: el término griego “auto”. Esta partícula es la misma que aparece en automóvil o autógrafo — lo que se mueve por sí mismo, y lo escrito por mano del propio autor— y recoge una idea fundamental: los seres vivos se construyen y se mantienen “a sí mismos” merced a un dinamismo interno. Tal vez este sea uno de los puntos más complicados y que más se presta a confusiones a la hora de entender qué es un ser vivo, ya que podemos caer fácilmente en una visión simplista de la auto-construcción. Todo ser vivo es un sistema muy complejo, cuya *construcción* exige fabricar y ensamblar una enorme cantidad de moléculas en configuraciones muy precisas y sofisticadas. Pero esta fabricación y ensamblaje de piezas es muy diferente de otros modos de construir que conocemos.

De hecho, el término “ensamblaje” es muy útil para explicar lo que un ser vivo *no* es. En la naturaleza inerte hay muchos ejemplos de auto-ensamblaje, piezas que se acoplan espontáneamente para formar una estructura concreta. Por ejemplo, las piezas que forman las cápsides que encierran el material genético de los virus —que no son parte de la vida celular— se auto-ensamblan dentro de las células infectadas mediante un proceso dinámico pero pasivo. Los científicos han imitado este proceso, por ejemplo, mediante sistemas mecánicos compuestos por numerosas piezas iguales que se atraen unas a otras gracias a imanes. Al agitar estas piezas dentro de un tubo a la velocidad adecuada se forma una estructura similar a un balón de fútbol. Sólo hace falta algo de energía externa (la agitación) y la estructura se ensamblará “por sí sola”. Otro ejemplo de auto-organización muy conocido son las estructuras que se forman al calentar algunos líquidos en un recipiente: cuando se supera cierto límite en el gradiente de temperatura al que se somete el líquido, no es suficiente con que sus moléculas transmitan la energía por los choques que se producen entre ellas (lo que se conoce como *conducción*). En ese instante es necesario pasar a un régimen de *convección* donde se generan unas corrientes de líquido que suben y bajan entre la superficie y el fondo de la sartén; esas corrientes forman estructuras similares a un panal de abejas, con celdillas regulares y perfectamente organizadas (es el fenómeno conocido como células de Bénard).

¿Qué les falta a estos ejemplos de auto-ensamblaje para formar un sistema vivo? En el caso de un sistema vivo se da un proceso de diferenciación y jerarquización; en un ser vivo unas partes del sistema están al servicio de otras partes: así, hemos visto que el metabolismo está al servicio de la homeostasis, las instrucciones al servicio de la reproducción... Las células de Bénard pueden crecer, pero sólo en el sentido de hacerse más grandes. En el ser vivo, el crecimiento que encontramos tiene más que ver con los diferentes niveles de integración entrelazados: el sistema vivo crece en complejidad, se desarrolla a medida que sus partes y funciones se organizan. En este sentido, los procesos de auto-ensamblaje que encontramos en los seres inertes carecen de la estructura y complejidad que muestra un ser vivo.

La auto-construcción de los seres vivos, incluso la reproducción de una simple bacteria, es muy distinta a la construcción de una casa, por más automática que esta sea —no está lejos el día en el que los muebles de IKEA se ensamblen solos. No es cuestión de encajar unas piezas en otras, siguiendo a ciegas un plan predeterminado según el cual al final todo estará en su sitio y, casi sin darnos cuenta, tendremos la casa ante nosotros. Los seres vivos construyen un “todo”, un sistema dinámico completo, mediante un proceso de carácter informacional que garantiza la homeostasis y la futura posibilidad de reproducción. Dicho proceso se conoce como *desarrollo*. Esta diferencia puede explicarse si consideramos que la casa sólo es una casa cuando se ha terminado el proceso de auto-ensamblaje. El ser vivo, por el contrario, es un ser vivo desde que comienza su proceso de desarrollo.

Así pues, el desarrollo de los seres vivos es un proceso muy complejo, que se diferencia claramente de otras formas de organización de la naturaleza. Durante la reproducción, por ejemplo, los seres vivos no se limitan simplemente a ensamblar piezas para fabricar copias semejantes al original. Esto se ve especialmente bien en la reproducción de seres vivos formados por muchas células individuales, que son ejemplos claros de “sistemas de sistemas”. En estos seres vivos, las células se organizan e interactúan para formar un “todo” que funciona como una entidad independiente y se reproduce mediante un proceso de desarrollo que culmina con la aparición de otro “todo” con sus partes perfectamente integradas. Algunos experimentos con esponjas, los seres vivos multicelulares más sencillos que existen, son realmente sorprendentes y pueden ilustrar muy bien esta idea. Al separar todas las células de una esponja haciéndola pasar por un colador y dejarlas reposar en un plato se observa que, con el paso del tiempo, las células vecinas contactan y comienzan a formar agregados. Pero estos grumos, formados cada uno por varias células, no se siguen agrupando hasta reconstituir la esponja inicial, como sucedería con un típico proceso de auto-ensamblaje. Al contrario: por sorprendente que parezca, cada uno de los pequeños agregados celulares comienza a desarrollarse independientemente de los demás, hasta dar lugar —cada uno de ellos por separado— a *una nueva esponja completa*. Ningún sistema inerte tiene semejante capacidad.

Lo que sucede es que para construir una casa son tan necesarios los ladrillos como el albañil y los planos a partir de los cuales éste pueda trabajar. Los sistemas naturales vivos se reproducen mediante un proceso auto-dirigido: los ladrillos incluyen tanto las instrucciones que detallan los planos como la habilidad del albañil, o, si queremos verlo de otro modo, el albañil lleva integrados los planos y es capaz de extraer los ladrillos de sí mismo. E incluso podríamos decir que los planos tienen la capacidad de generar ladrillos que se organizan conforme al plan detallado: el filósofo Tomás de Aquino empleaba el ejemplo del constructor de barcos que hace que los troncos de madera puedan moverse por sí mismos para tomar la forma del barco. Esta característica es quizás lo que más claramente distingue lo vivo de lo inerte, e incluso de aquello que está a mitad de camino, como los conjuntos auto-catalíticos. La vida, ese fenómeno extraño de nuestro cosmos, es sobre todo un *proceso auto-dirigido de desarrollo* que usa energía

de buena calidad y baja entropía y disipa energía de mala calidad y alta entropía, escapando así, al menos por un tiempo, del inexorable final termodinámico que aguarda a lo inerte.

5. A MODO DE RESUMEN

En la realidad física que nos rodea hay dos tipos fundamentales de sistemas: inertes y vivos. Los sistemas naturales inertes, aun pudiendo mantener cierta estructura interna distinta del ambiente circundante, avanzan de modo imparable hacia su equilibrio termodinámico. No logran propiamente asimilar las perturbaciones a las que resultan sometidos: su interacción con el universo va erosionando su propia identidad. Los sistemas naturales vivos, en cambio, son capaces de zafarse local y temporalmente de la tiranía global de la segunda ley de la termodinámica, generando gracias a su metabolismo la energía necesaria para conservar un estado altamente ordenado y dinámico. Estos sistemas vivos pueden, además, responder a cambios externos y conservar su estructura y dinámica propias, su homeostasis.

Lo vivo se caracteriza además por la capacidad de generar copias de sí mismo mediante la reproducción, durante la cual se transmite toda la información necesaria para constituir una réplica autónoma. Este proceso garantiza la regeneración y continuidad de lo vivo a pesar de la desaparición de seres vivos individuales. En los sistemas vivos, la reproducción no es mero ensamblaje de piezas, sino un proceso de desarrollo. Lo inerte, en cambio, carece de esta capacidad de reproducción y desarrollo. Si una piedra tuviese en sí misma la virtualidad de reorganizarse y mantener su estructura tras recibir un impacto, o si pudiese dejar una nueva piedra (no un fragmento, sino una réplica de la anterior con todo su dinamismo propio) antes de sucumbir a causa de la erosión, no dudaríamos en catalogarla como un sistema natural vivo. Sin embargo, lo inerte carece de estas virtualidades. Aun poseyendo cierta complejidad, no alcanza a tener la jerarquía e interconexión de niveles que caracteriza la complejidad del viviente.

Cuantitativamente, lo inerte parece dominar el cosmos; sin embargo, la dinámica propia de los sistemas naturales vivos, que les lleva a reaccionar frente a los estímulos externos debidos a cambios ambientales, indica que lo vivo, una vez que se ha instalado en un lugar del universo, tiende a propagarse de forma imparable. En el caso de la Tierra, esta capacidad de propagación ha dado lugar a una gran variedad de formas vivas con capacidades muy diversas. En el siguiente capítulo, veremos en detalle este proceso de cambio y transformación que es tan característico de los sistemas naturales vivos.

III. CAMBIO

1. ¿TODO CAMBIA?

Desde su comienzo, el cosmos está en continuo cambio. Asumiendo que el universo que nos alberga tuvo su inicio en la gran explosión conocida como *Big Bang*, la inmensa mayoría de las partículas que han existido en estos casi catorce mil millones de años han cambiado de lugar, se han fusionado con otras, se han transformado en energía. Las galaxias no han cesado de moverse al tiempo que el universo continúa su expansión, los planetas orbitan alrededor de sus estrellas... Todo cambia, todo se mueve.

El cambio incessante que se da en el universo, además, no es un simple cambio de posiciones de los constituyentes fundamentales de la materia (quarks y leptones) a causa de las cuatro interacciones fundamentales de la física (gravedad, electromagnetismo, nuclear fuerte y nuclear débil). Los físicos sostienen que en los primeros instantes del *Big Bang* ni siquiera existía la materia y las fuerzas que conocemos hoy. En la sopa cósmica primordial, como se le llama en ocasiones, el universo se encontraría en un estado con muy altas temperatura y energía. En esta situación no habría mucho lugar para las distinciones entre partículas e interacciones que conocemos actualmente. A medida que el universo se ha ido expandiendo —vertiginosamente rápido en los primeros instantes— y enfriando, la indiferenciación y las simetrías iniciales se han perdido y comenzaron a aparecer las partículas y las interacciones fundamentales de la materia que nos resultan familiares y que somos capaces de producir y detectar en los grandes aceleradores de partículas, como el CERN de Ginebra.

Pero el tipo de cambio que se observa en los sistemas naturales vivos, merced a su peculiar dinamismo, es distinto de la evolución cósmica general que observamos en la actualidad. Los movimientos galácticos no dan lugar a *novedades* reales, en el sentido de que aparezcan nuevos modos de relacionarse unas partes del universo con otras. Los sistemas vivos, en cambio, muestran una increíble capacidad de diversificarse en formas y estructuras difficilmente imaginables. Si no hubiese aparecido la vida en nuestro planeta, los únicos cambios en los últimos cuatro mil millones de años habrían sido provocados por la actividad volcánica, por los movimientos de las placas continentales o por impactos de meteoritos. Pero desde que los primeros seres vivos hicieron su

aparición sobre la Tierra, concretamente en el fondo de los océanos, lo vivo se ha diversificado enormemente: han aparecido sistemas capaces de utilizar la luz del sol o el azufre para fabricar moléculas energéticas, sistemas formados por una célula o por muchas, sistemas con órganos altamente sofisticados para detectar luz, color, sonidos u olores, con variadísimos sistemas de locomoción, sistemas que incluyen procesos neurales de control... La diversidad de vida que ha proliferado en nuestra biosfera habría resultado imposible de concebir para cualquiera que hubiese visitado la Tierra hace cuatro mil millones de años y encontrarse un planeta sin vida sometido a una intensa lluvia de asteroides.

Aun así, dentro de esta enorme diversidad se puede apreciar una cierta unidad básica, unas características más o menos comunes a todos los sistemas naturales vivos; de no ser así, no podríamos agruparlos en la gran categoría de “lo vivo”. E incluso dentro de lo vivo algunas entidades son más parecidas entre sí que otras. Hay sistemas naturales vivos que comparten una misma estructura y forma externa, unos procesos metabólicos similares, unos modos de locomoción o de reproducción casi idénticos. Son precisamente estas similitudes y diferencias lo que ha llevado a los naturalistas a fijarse en ellas para agrupar todas las formas de vida en “clases” formadas por aquellos individuos —sean muchos o pocos— que comparten un mayor o menor número de rasgos.

Estos intentos de clasificación siempre utilizan distintos niveles de organización, yendo desde lo más general hasta lo más específico o viceversa. Por ejemplo, en nuestro paseo encontrábamos dos sistemas vivos muy parecidos, los mirlos y las urracas. Ambos comparten una morfología externa similar, así como la capacidad de vuelo y unos hábitos alimenticios semejantes. El perro y su dueña, por el contrario, tienen diseños corporales diferentes al de los pájaros, con extremidades anteriores muy distintas a las alas, una boca con dientes en vez de pico, o pelo en vez de plumas. La brizna de hierba y los árboles, a su vez, están anclados al suelo, se nutren por las raíces y usan la luz solar para fijar carbono mediante la fotosíntesis, lo que provoca su color verde. Y respecto a las bacterias del suelo, bajo el microscopio parecen pequeños bastoncillos que se multiplican rápidamente dividiéndose por la mitad. Si tenemos en cuenta todas estas características, podríamos agrupar los sistemas vivos de nuestro parque en función de las características que comparten. Al representar esta hipotética clasificación en forma de árbol, tendríamos algo similar a lo que se representa en la Figura 6:

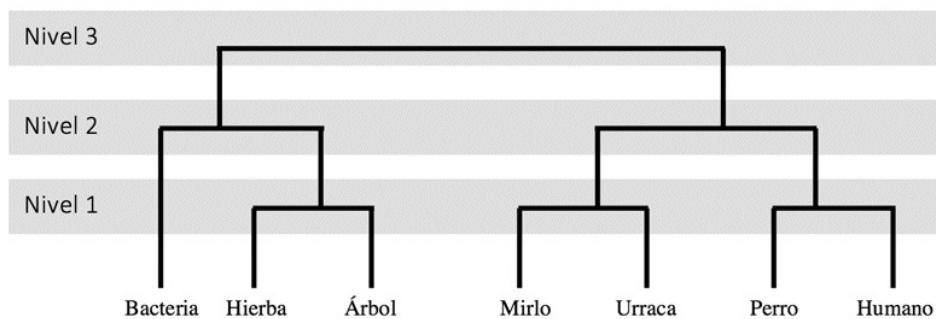


Figura 6

Vemos que hay varios niveles posibles de agrupamiento, en este caso tres. Primero están los grupos o clases que incluyen a los organismos más parecidos entre sí: las dos aves, los dos mamíferos, las dos plantas. Sobre este primer nivel podemos crear un nivel superior que agrupe conjuntamente a pájaros junto a mamíferos, ya que comparten más características entre ellos que con las plantas o bacterias. En el caso hipotético de que nuestra bacteria fuese capaz de realizar la fotosíntesis, podríamos agruparla en este mismo nivel junto con las dos plantas. Finalmente, todas estas formas de vida se unirían en un nivel más alto, ya que en definitiva se trata, en todos los casos, de sistemas vivos naturales.

Es fácil imaginar la gigantesca tarea que supone agrupar así todos los seres vivos del planeta, presentes y pasados. Muchos naturalistas lo han intentado desde la antigüedad, pero el procedimiento que ha tenido más éxito y que pervive hasta nuestros días es el ideado por Linneo (1707-1778). Según esta forma de clasificación, hay varios niveles de agrupamiento como especie, género, familia, orden, clase y reino (yendo desde lo más específico a lo más general). Todo ser vivo, según sus características propias, será miembro de un reino, de una clase, de un orden, de una familia, de un género y de una especie concreta.

Lógicamente, esta manera de organizar entidades es en cierto modo arbitraria ya que depende en gran medida de las características en las que uno se fije para determinar lo que es “propio” o “parecido”, específico o genérico. De hecho, los sistemas de clasificación empleados hoy en día por los científicos incluyen también datos genéticos que han llevado a estrategias algo diferentes de agrupar los seres vivos, con nuevas categorías como los *dominios*. En cualquier caso, de nuevo encontramos que *hay un cierto orden* en la naturaleza. Quizás parece evidente que se trata de un orden arbitrario que ponemos nosotros en nuestro afán por clasificarlo todo, pero hay que tener en cuenta que los rasgos en los que se basan las categorías taxonómicas son diferencias y parecidos *reales*. La pregunta fundamental que hemos de hacernos, por tanto, es cómo se ha llegado a esa gran diversidad de formas de vida y por qué, siendo diversas, comparten características que permiten agruparlas. Desde los filósofos griegos hasta el siglo XIX, a esta pregunta se le daba una respuesta relativamente clara y sencilla: simplemente son así porque *siempre han sido así* desde que comenzaron a existir. Nuestras clasificaciones no harían sino recoger un dato de la realidad y ordenarlo.

Durante los siglos XVIII y XIX, en cambio, los observadores de la naturaleza fueron acumulando evidencias de que esta explicación no era del todo satisfactoria. Por un lado, la clasificación de Linneo apuntaba una primera idea fundamental: si todo lo vivo puede agruparse en niveles cada vez más altos de organización, quizás cada uno de los cinco grandes reinos comenzó con unos pocos ejemplares que después se fueron diversificando. O, incluso, quizá toda la vida tenga un mismo tronco común. Si cada ser vivo hubiese aparecido con independencia de los demás, ¿por qué hay tantas semejanzas entre ellos? Además, en esos años hubo una auténtica explosión en los hallazgos de fósiles de animales y plantas que habían existido mucho tiempo antes pero después habían desaparecido, fósiles similares a los seres vivos existentes entonces. La conclusión

a la que apuntaba todo esto era que, quizá, no todos los seres vivos *habían sido siempre así*, tal y como los conocemos hoy.

Con el paso de los años fue cuajando una corriente de pensamiento que proponía una explicación alternativa: la *transformación* de unas formas de vida en otras a lo largo del tiempo. Esta corriente culminó en 1859 con la publicación de *El origen de las especies* por Charles Darwin (1809-1882). Además de reunir una ingente cantidad de evidencias tomadas de sus estudios, de sus propios viajes y de los ejemplares que le llegaban de otras partes del mundo, Darwin propuso un nuevo modo mucho más sencillo de entender las relaciones entre los seres vivos, que podría explicar mejor el por qué y el cómo de las diferencias y parecidos que permiten agrupar todo lo vivo en distintas categorías. En concreto, llegó a la conclusión de que la explicación más plausible era la *descendencia, con modificación, a partir de un ancestro común*: al igual que los que se dedican a cruzar razas de perros consiguen gran variedad de formas y colores, según los rasgos que quieren seleccionar, la naturaleza habría estado operando de forma similar durante millones de años, seleccionando rasgos diversos y dando lugar a la exuberante diversidad de seres vivos del planeta.

La Teoría de la Evolución propuesta por Darwin rompía con explicaciones previas —como la de Lamarck (1744-1829)— según las cuales algunos individuos pertenecientes a una especie concreta *evolucionan* de modo que a lo largo de su vida adquieren alguna modificación morfológica o funcional en respuesta a las necesidades que impone el ambiente. La idea auténticamente revolucionaria de Darwin fue que, en realidad, sucede al revés: no se produce una modificación en respuesta a una exigencia ambiental, sino que existe previamente una *variación* dentro de una población de individuos, a partir de la cual se selecciona una de las variantes existentes (precisamente aquella que resulta más beneficiosa según las condiciones ambientales). El punto de partida esencial es, pues, la variación.

Todos tenemos constancia que los individuos de una misma especie, aun siendo muy parecidos, no son absolutamente iguales: una multitud de pequeñas diferencias en muchos rasgos permiten identificar a cada individuo como tal. Estas diferencias no siempre son meramente identificativas: algunas de ellas se traducen en mayor probabilidad de supervivencia. En concreto, las diferencias que marcan el éxito (en cuanto a supervivencia se refiere) son aquellas que aumentan la viabilidad de un organismo ante exigencias ambientales concretas. Como los organismos que sobreviven mejor son los que dejarán más descendientes, las características ventajosas se extienden en esa población. Los individuos que carecen de ellas, en cambio, estarán cada vez menos representados. En consecuencia, la *transformación* o evolución tiene lugar sobre todo mediante la desaparición progresiva *en una población* de las variantes menos ventajosas y el aumento en frecuencia de las formas beneficiosas. Este es el proceso que hoy en día conocemos como *selección natural*: la selección actúa sobre individuos, haciendo así que evolucione la población.

2. EVOLUCIÓN Y GENÉTICA

Para que este proceso funcione debe suceder algo fundamental: la transmisión de información durante la reproducción. La idea de Darwin sólo se explica si todo ser vivo lleva dentro de sí las instrucciones sobre cómo generar sus variaciones morfológicas y funcionales, y después transmite esas instrucciones a su descendencia. Sólo así, a medida que sobreviven o desaparecen individuos concretos, se podrán eliminar las variaciones menos ventajosas en las sucesivas generaciones de esa población, favoreciendo a las más ventajosas en el proceso. En la época de Darwin todavía no se conocían los mecanismos de transmisión de información genética, por lo que la selección natural como explicación del hecho evolutivo no pasaba de ser una teoría fascinante, pero difícil de contrastar.

Esta situación cambió durante la primera mitad del siglo XX: en esos años cristalizó la Genética a raíz del descubrimiento de los trabajos de Mendel (1822-1884) sobre las leyes de la herencia. Y gracias a la nueva Genética fue posible explicar la aparición de variaciones en poblaciones naturales y predecir los cambios que esas variaciones irán sufriendo en sucesivas generaciones a lo largo del tiempo. Con el paso de los años, estos nuevos conceptos dieron razón de los mecanismos que explican el funcionamiento de la selección natural: la evolución —es decir, el proceso mediante el cual una población de individuos experimenta cambios que son transmitidos a generaciones sucesivas— se explica por la presencia de variantes genéticas que serán heredadas por la descendencia de acuerdo a unas reglas bastante precisas. Para entenderlo mejor, hemos de explicar brevemente cómo funciona la herencia.

Ya quedó claro en el capítulo anterior que toda la información genética está codificada en el ADN. Decíamos también que un gen no es más que una sección concreta de la secuencia del ADN, un fragmento con *sentido* que contiene las instrucciones necesarias para fabricar una proteína u otro tipo de producto funcional. Pero no todos los genes *iguales* son *idénticos*. Es decir, el gen responsable de fabricar la proteína X (una hipotética proteína que determinaría, por ejemplo, la probabilidad de calvicie prematura) estará presente en los tres autores de este libro, como es lógico, pero no será necesariamente idéntico en los tres. El conjunto de nucleótidos —la sucesión de letras A, C, G, T— que conforman la secuencia del gen en un orden concreto puede variar ligeramente sin dejar de producir la misma proteína X. Por ejemplo, puede cambiar una letra, dando lugar a dos *versiones* del gen y, en consecuencia, a dos versiones de la proteína X. Solo una de esas dos versiones será la responsable de la calvicie prematura que —por el momento— exhibe solamente uno de los autores de este libro. Las versiones de un gen se denominan técnicamente *alelos*: en las poblaciones humanas, por tanto, el gen X aparecerá en dos alelos diferentes, alelo “calvicie” y alelo “no calvicie”.

Esto no es algo que afecte exclusivamente a genes humanos, por supuesto. Todos los genes aparecen en diferentes formas alélicas en las poblaciones naturales de seres vivos. Una buena pregunta es de dónde surgen todas esas variantes genéticas y por qué existen. ¿No sería mejor que todos los miembros de una población de mirlos, por ejemplo, tuvieran en todos sus genes exactamente la misma versión, y así *exactamente* el mismo color negro, o picos de *exactamente* la misma longitud? Teóricamente, si lo que se transmite es el código genético que mejor puede hacer frente a los cambios ambientales,

es lógico pensar que esto conducirá a individuos cada vez más optimizados y parecidos, hasta ser prácticamente iguales. Sin embargo, una uniformidad radical no es tan buena como podríamos pensar: quizás en especies cuyas poblaciones están formadas por millones o miles de millones de individuos, como las bacterias, podría subsistir una población formada por clones básicamente idénticos. Pero en el caso de especies con tamaños de población más reducidos, la supervivencia pasa por la adaptación al ambiente en que viven, que frecuentemente sufre oscilaciones. A su vez, para poder adaptarse a esas oscilaciones ambientales es imprescindible que exista la posibilidad de cambiar a alguna otra alternativa ya existente. Por eso mismo, una especie constituida únicamente por individuos clónicos sería tremadamente frágil y probablemente estará abocada a la extinción, ya que las posibilidades de cambio se habrán limitado enormemente: la diversidad de variaciones que se ofrecen a la selección natural se verá muy reducida. De ahí la importancia de asegurar un cierto grado de variación genética. En el mundo de los seres vivos, la misma reproducción asegura que se introducirán pequeños cambios en el ADN, o *mutaciones*. Muchas de estas mutaciones desaparecerán —principalmente por selección natural— pero unas pocas persistirán en la población dando lugar a los diferentes alelos de los distintos genes.

Estos pequeños cambios en el ADN presentan también un inconveniente: si una población sufriese mutaciones con demasiada frecuencia tendría muy poca estabilidad y la información genética acabaría siendo una mera aglomeración de rasgos sin una utilidad real para la supervivencia del sistema. El físico Schrödinger se preguntó precisamente por la frecuencia y la razón de las mutaciones, señalando en su conocido libro *What is Life?* que las fluctuaciones termodinámicas no sirven para explicarlas, pues estas fluctuaciones son demasiado grandes y provocarían especies altamente inestables. Dicho de otro modo, las consideraciones de tipo estadístico o termodinámico no explican por sí solas el sutil equilibrio entre permanencia y variabilidad de la información, necesario para que se dé la evolución de las especies tal y como la conocemos. Una de las explicaciones más en boga en la actualidad apunta a dar mayor protagonismo a la mecánica cuántica en los procesos de transmisión y variabilidad genética, aunque hoy por hoy es un campo pendiente de desarrollo.

Esta reflexión acerca de las mutaciones en el ADN es muy importante para entender correctamente el proceso evolutivo. En las primeras décadas del siglo XX se establecieron las reglas que rigen los cambios en la frecuencia de los distintos alelos en las poblaciones naturales. Como resultado de esas investigaciones se observó que cuanto mayor es la cantidad de variación genética en una población —siempre que esta variación esté dentro de unos límites—, mayor es su capacidad para adaptarse a los cambios ambientales. Como hemos visto, esto se explica porque la selección natural se encuentra con más variantes a su disposición, de tal forma que puede favorecer una que realmente aumente la viabilidad de los individuos que la posean.

Pero, además, nos podemos encontrar en ocasiones con otras circunstancias en las que una población evoluciona sin necesidad de presiones ambientales o selección natural. Un caso paradigmático es el de una población de pequeño tamaño, o que ve reducido

drásticamente su número, como sucede tras un desastre natural o al aislarse de un grupo mayor —por ejemplo, al colonizar una isla: en estos casos la frecuencia con la que se da un alelo u otro puede cambiar rápidamente en muy pocas generaciones, en un proceso que se llama *deriva genética* porque recuerda al rumbo que sigue un barco que va a merced de los elementos: fluctuaciones rápidas y aleatorias en función de los vientos y mareas. Los cambios de frecuencias alélicas debidos a la deriva genética, por tanto, no están dictados por la selección natural sino por otras condiciones, como las que provoca una reducción rápida del número de individuos que se van a reproducir para originar a la siguiente generación: esta reducción puede deberse, por ejemplo, a una sequía, un fuego o un derrumbe que acaba con todos menos unos pocos, o la migración de un pequeño número de ejemplares para colonizar otro territorio.

La síntesis entre las ideas de Darwin y la genética de poblaciones que acabamos de explicar de modo muy resumido se conoce como *neodarwinismo*. Sus postulados básicos son dos: la selección natural es la principal —si no la única— fuerza evolutiva (lo que en ocasiones se denomina *panselecciónismo*); y el *gradualismo*, es decir, la noción de que todo el proceso evolutivo es el resultado de cambios muy pequeños que conducen, por acumulación sucesiva, a las diferencias que nos permiten hablar de distintas especies. El neodarwinismo ha sido la explicación más habitual de la evolución de los seres vivos durante la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, los avances científicos de los últimos decenios han cuestionado la suficiencia de las explicaciones neodarwinistas.

A finales del siglo XX los avances en biología molecular hicieron posible el estudio directo del ADN de muchas poblaciones de distintos seres vivos. Como parte de este estudio se compararon las secuencias genéticas para ver cómo han aparecido los distintos alelos durante los cambios evolutivos. Curiosamente, se observó que la mayor parte de los cambios moleculares en el ADN son “neutros” desde el punto de vista de la selección natural: es decir, son cambios que no afectan a los genes o, si lo hacen, cambian nucleótidos que no alteran la proteína codificada por el gen. Esto dio lugar a la llamada teoría “neutral” de la evolución, según la cual el ritmo del cambio evolutivo —al menos a nivel molecular— está determinado principalmente por la velocidad a la que se introducen nuevas mutaciones, independientemente del tamaño que tenga la población. Una de las predicciones de la teoría neutral es que estas mutaciones neutrales aparecen a una velocidad relativamente constante en cada línea evolutiva, puesto que la selección natural no influye sobre ellas. La confirmación posterior de esta predicción dio lugar al concepto de “reloj molecular”, tan importante en los estudios actuales de evolución molecular: esa velocidad constante con la que aparecen mutaciones serviría como un reloj que permite calcular el tiempo transcurrido. Para saber cuándo se separaron dos linajes, por tanto, podemos comparar sus secuencias genéticas y ver la cantidad de mutaciones que han acumulado independientemente desde su divergencia inicial. Después, el reloj molecular nos permitirá convertir esas diferencias genéticas en años, precisamente porque sabemos cuánto tiempo ha de transcurrir para que se acumule una mutación neutral.

La aceptación de la teoría neutral y su comprobación empírica, al comprobar el buen funcionamiento de estos relojes moleculares, debilitó el primero de los postulados del neodarwinismo: el papel casi exclusivo de la selección natural como motor del cambio evolutivo. En este sentido, se ha pasado de considerar que las mutaciones se quedan fijadas en una población de forma casi exclusiva por acción de la selección natural, a sostener que muchas de las mutaciones determinantes para delimitar dos especies se deben a cambios neutrales provocados por deriva genética. Es decir, la selección natural es sólo uno de los mecanismos que intervienen en la evolución. Importante, sí, pero no el único y en ocasiones ni siquiera el principal.

Junto a lo anterior, en la actualidad estamos presenciando cómo los estudios de genética evolutiva se centran cada vez más en leer la secuencia completa de genomas de distintas especies y compararlos. Esta comparación permite analizar lo que ha sucedido a estos genomas a lo largo del tiempo, y, sobre todo, permite concluir que el principal motor de grandes transiciones evolutivas no han sido las pequeñas mutaciones acumuladas poco a poco. En ocasiones, se observan reorganizaciones más drásticas del material genético: grandes segmentos que se han duplicado una o varias veces, fragmentos que han cambiado de posición, etc. En otros casos importantes, ni siquiera se trata de mutaciones que afecten a la secuencia de los genes, sino de cambios que afectan a la intensidad, o al momento (o al lugar del cuerpo) en que se activan. Estos estudios han hecho necesario matizar otro de los principales postulados del neodarwinismo, el gradualismo. La cuestión de fondo es delimitar cuál es el nivel importante en que los cambios originados en niveles inferiores —atómicos o moleculares— pasan a ser realmente relevantes para el funcionamiento y la supervivencia del individuo. En este contexto no está de más considerar que los sistemas vivos naturales son sistemas caóticos, en los que pequeños cambios en un nivel inferior pueden provocar un gran cambio en un nivel superior. En la evolución, estos pequeños cambios se pueden ver como momentos “privilegiados” —la gota que colma el vaso— que desencadenan una reorganización drástica del sistema a partir de cambios genéticos acumulados en niveles inferiores.

3. MACROEVOLUCIÓN

Estos cambios en la visión científica del proceso evolutivo son especialmente importantes a la hora de explicar lo que habitualmente se denomina *macroevolución*. Las variaciones en las frecuencias de los distintos alelos en poblaciones naturales pueden explicar pequeños cambios en el tamaño del pico de un pájaro, en el color de las alas de una mariposa, u otros más importantes, pero todavía pequeños, como la modificación de la hoja de una hierba para adaptarse a condiciones de aridez o modificaciones de procesos metabólicos internos que no se observan desde el exterior. Pero en el árbol de la vida vemos también grandes transiciones, como la aparición de animales con columna vertebral, el paso de la vida en el mar a la vida terrestre, la modificación de las extremidades superiores en alas, etcétera, que reflejan cambios anatómicos importantes.

Según el neodarwinismo clásico, todos estos cambios se explicarían, en última instancia, por el mismo proceso gradual de selección de pequeñas mutaciones ventajosas. Por improbable que parezca, se decía, podemos escalar la cima de una gran montaña a base de pequeñísimos pasos, uno tras otro, centímetro a centímetro siempre cuesta arriba, en la misma dirección, durante millones de años.

Pero la visión moderna del proceso evolutivo, especialmente a nivel genético, muestra claramente que éste no es el caso. Muchas de las grandes transiciones macroevolutivas se pueden explicar mejor mediante otros procesos. Al final del apartado anterior apuntábamos que en estos grandes cambios es donde cobra especial relevancia la descripción de los sistemas dinámicos. Los sistemas vivos parecen encontrarse en la frontera crítica entre un régimen físico ordenado y suave y el régimen físico caótico, de manera que, en algunas ocasiones, pequeños cambios a nivel molecular o genético pueden provocar grandes cambios a nivel morfológico o funcional. La perspectiva actual nos enseña que los seres vivos son sistemas dinámicos complejos organizados como grandes redes de interacción: no hay proceso metabólico y de desarrollo que no implique numerosas relaciones y dependencias entre genes y proteínas. La evolución está estrechamente relacionada con las modificaciones de estas redes a lo largo del tiempo, de tal forma que quien quiera explicar correctamente cómo han aparecido los seres vivos actuales tendrá que explicar cómo estas redes han ganado o perdido nodos, o han establecido nuevas interacciones entre los nodos existentes. La respuesta a esta cuestión ha cambiado radicalmente la comprensión actual del proceso evolutivo.

Seamos más concretos. En redes genéticas, como la que veíamos en la figura 2 del capítulo 1, es relativamente fácil identificar los genes que se encargan de controlar el comportamiento global de la red, los *genes reguladores*. Suelen ser nodos con muchas interacciones, es decir, nodos altamente conectados con otros elementos de la red. Estos genes controlan el comportamiento de la red codificando proteínas que regulan la actividad de otros genes, “encendiéndolos” o “apagándolos”. Las proteínas que desempeñan este papel regulador reciben el nombre genérico de *factores de transcripción*. Es muy importante comprender la manera en que actúan, porque eso nos ayudará a explicar la evolución de la anatomía, de la forma y de la función de los seres vivos.

Para ejercer su acción, un factor de transcripción debe “tocar” al gen al cual va a “encender” o “apagar”, interaccionando físicamente con él. Recordemos que los factores de transcripción son proteínas; de hecho, pertenecen a una clase de proteínas con la increíble capacidad de *buscar* en el ADN de las células una secuencia concreta de letras y unirse físicamente a ella de manera transitoria. Como se ve en la Figura 7 (en la parte superior), un gen X estará inactivo hasta que el factor de transcripción no se adhiera a una pequeña región en el ADN (las nueve letras grandes en negrita). Esa unión es muy específica (parte inferior de la figura), y provoca la activación del gen en un momento o en un tejido concreto (flecha más gruesa). Dado que esa corta secuencia de letras puede estar repetida en varias regiones distintas del mismo genoma, un mismo factor de transcripción puede regular la actividad de varios genes a la vez, de ahí que en la red de

interacciones genéticas el gen que codifica este factor de transcripción aparezca enlazado con todos esos otros genes “diana”.

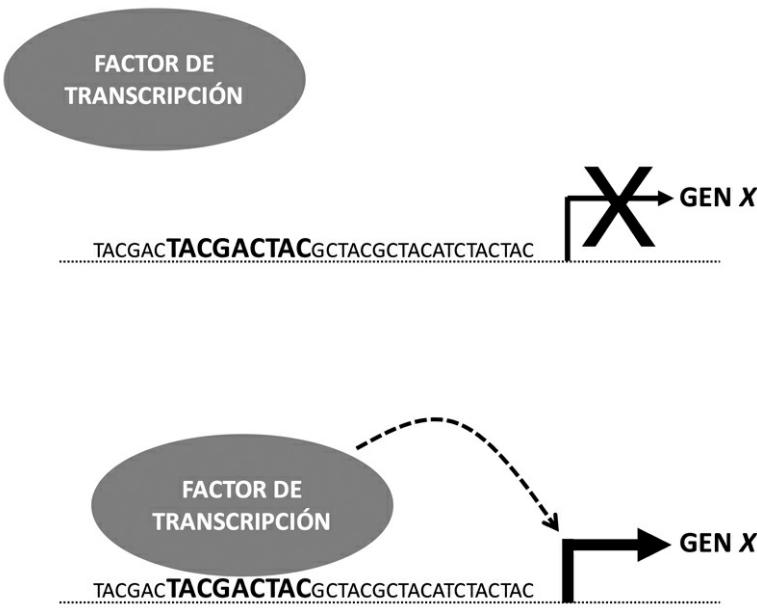


Figura 7

Al hablar de los factores de transcripción es bastante frecuente recurrir a la metáfora del director de orquesta, ya que en el fondo son los encargados de indicar a otros genes cuándo tienen que activarse para entrar en acción. Pero en una orquesta hay un director que interpreta la misma partitura que leen los músicos. En el genoma, en cambio, hay cientos de factores de transcripción diferentes, ninguno de los cuales es el director de orquesta global porque ninguno tiene la visión de conjunto, así que sería más adecuado imaginar una orquesta *democrática* en la que todos los instrumentos leen una misma partitura y ésta lleva “dentro de sí” su propia dirección. La ejecución de la sinfonía vendrá dirigida desde dentro y se desarrollará de forma progresiva, con distintos niveles de integración, con algunos instrumentos actuando a su vez como directores que dan la entrada a otros en el momento oportuno.

Cuando concebimos un sistema vivo funcionando así, resulta claro que no es estrictamente necesario inventar genes nuevos, o eliminarlos, o mutarlos, para modificar el funcionamiento global de la red. De hecho, cambios drásticos como la eliminación de un gen central (muy interconectado) pueden resultar fatales para la subsistencia de la red, lo cual explica que los factores de transcripción hayan sufrido pocas mutaciones a lo largo de millones de años de evolución. Pero hay una forma más sutil de reconfigurar levemente la estructura y funcionamiento de la red: variando ligeramente la fuerza de las interacciones entre los distintos nodos, o estableciendo contactos nuevos entre nodos que ya existían. Para esto, que equivaldría a tocar una sinfonía distinta partiendo de la partitura anterior, lo único necesario —a nivel genético, al menos— es modificar esas regiones del ADN a las que se adhieren los factores de transcripción: si estas pequeñas secuencias cambian ligeramente haciéndose más o menos atrayentes, o se mueven de un

lugar a otro dentro del genoma de modo que pasen a regular genes diferentes, tendremos una melodía bastante novedosa partiendo de una partitura relativamente similar.

Hace ya más de cuarenta años se hizo por primera vez la propuesta de que los cambios evolutivos que afectan a la anatomía, es decir los cambios macroevolutivos, se deben preferentemente a innovaciones en la manera de controlar la actividad de los genes, por modificaciones en las secuencias a las que se unen los factores de transcripción. Gracias a los estudios genómicos realizados en los últimos años, hoy contamos con algunos ejemplos impresionantes de este proceso y su importancia en la evolución. Por ejemplo, se ha identificado una pequeña región del ADN de ratón que regula la actividad del gen de un factor de transcripción fundamental para el desarrollo embrionario de las extremidades. De hecho, ese gen se activa precisamente en la zona del embrión donde se está formando la pata del ratón y lo hace en el momento adecuado; de este modo organiza —como parcial director de orquesta— el encendido y apagado preciso de los genes que finalmente formarán la pata del animal. Todo esto, recordemos, es posible gracias a la pequeña secuencia de ADN que determina cuándo y dónde debe activarse este “gen director de orquesta”. Cuando esa misma secuencia se trasplanta al lugar correcto del genoma de embriones de pez, sucede algo asombroso: ese mismo gen se activa ahora en la región homóloga del embrión, es decir, aquella donde se está formando el esbozo de la aleta. Como consecuencia, se produce el factor de transcripción correspondiente y éste pone en marcha su pequeña orquesta, con el resultado de que la formación de las aletas se ve alterada y da lugar a estructuras embrionarias semejantes a las que aparecen durante el desarrollo de las patas del ratón. Es decir, un cambio evolutivo de millones de años, como es el paso de aletas a patas, pudo haber sido el resultado de cambios en la activación de unos pocos genes que codifican factores de transcripción muy importantes durante el desarrollo embrionario de las extremidades.

Otros investigadores hicieron algo similar con una pequeña secuencia del genoma humano que controla la actividad de un gen de gran relevancia en el desarrollo del cerebro (que también codifica un factor de transcripción). Cuando los científicos insertaron ese pequeño fragmento de ADN humano en el genoma de ratones de laboratorio, los embriones de ratón mostraron un aumento considerable en el tamaño del cerebro (hasta un 12%). El gen del factor de transcripción se había activado en el lugar y momento oportuno (equivalente a lo que sucede durante el desarrollo del cerebro humano) y había desencadenado la respuesta celular que más tarde desembocaría en un cambio morfológico sorprendente.

De manera que no es tan difícil generar alteraciones morfológicas importantes en un periodo de tiempo relativamente corto, al menos en la escala de tiempos que se manejan en evolución. Basta con *tocar* algo *crítico* en una red de regulación genética, especialmente si lo que alteramos tiene que ver con el funcionamiento de factores de transcripción, para generar nuevos estados de la red sobre los que la evolución pueda actuar. Hoy en día se habla del “re-cableado” de redes de regulación genética, usando una imagen bastante apropiada. Cambios en las secuencias a las que se adhieren factores de transcripción concretos, que se encuentran dispersas por el genoma, pueden

reconfigurar las redes de regulación que controlan los principales procesos de un sistema vivo, dando origen a una gran variedad de posibles configuraciones.

En cualquier caso, nos falta todavía dar un paso más para avanzar en la comprensión de los procesos evolutivos que generan grandes cambios anatómicos. Hemos visto en el capítulo 2 que la reproducción de un sistema vivo se puede definir como un proceso auto-dirigido de desarrollo: esto significa, en concreto, que para mantener la transformación de la aleta del pez en pata, o la pata en ala, el proceso de desarrollo embrionario tiene que reconfigurarse de modo que esos cambios queden almacenados en el genoma para después ser transmitidos a generaciones futuras. ¿Cómo se consigue esto? Hoy en día creemos que el secreto está, precisamente, en el proceso que acabamos de describir: el re-cableado de redes de regulación génica que controlan los procesos del desarrollo en plantas y animales. Los estudios que se están realizando en los últimos años apuntan a que el re-cableado de algunas de estas redes —mediante cambios genéticos en las secuencias a las que se unen los factores de transcripción— puede estar en la base de las grandes transiciones evolutivas.

Todo esto no hace sino apuntar en la dirección de una dinámica crítica —en torno a la delgada línea que separa el orden y el caos— en el funcionamiento de las redes de regulación genética. De alguna forma, el ser vivo necesita un mínimo de orden y estabilidad, pero también requiere una cierta capacidad de explorar nuevas posibilidades de manera óptima. La región crítica de funcionamiento de dichas redes parece ofrecer esa optimización en la evolución.

4. EVO-DEVO-ECO

La parte de la biología que estudia el desarrollo embrionario se llama “biología del desarrollo”; en inglés, *developmental biology*. Por eso, los científicos que intentan explicar la evolución mediante cambios en los procesos de desarrollo han acuñado para su disciplina el término “Evo-Devo”, un campo que en los últimos años ha experimentado enormes avances gracias al mayor conocimiento de los mecanismos genéticos que intervienen en el desarrollo embrionario.

La lectura de la secuencia completa de los genomas de muchas especies diferentes combinada con los estudios del desarrollo embrionario ha deparado muchas sorpresas. Uno de los conceptos más interesantes es el de “homología profunda”. En evolución, una *homología* es una estructura similar en dos especies distintas, debido a que ambas han heredado esa misma estructura de un ancestro común y después, con el tiempo, cada una la ha modificado por separado. El brazo de un primate, la aleta pectoral de una ballena o el ala de un murciélagos son estructuras homólogas porque todas ellas representan modificaciones de una configuración original que estaba presente en el ancestro común a todos los mamíferos.

También en el caso de los genomas se pueden observar homologías, es decir, genes que realizan una misma función en distintas especies. En muchos casos, estas homologías genéticas se extienden hasta muchos millones de años atrás. Por ejemplo, la

red genética que determina el plan básico del ojo está centrada en torno al mismo gen en insectos, calamares y ratones, cuyos ojos son muy distintos tanto en su estructura como en la manera en que se forman durante el desarrollo embrionario. Todos ellos poseen en sus genomas versiones diferentes de este mismo gen, que precisamente codifica uno de esos factores de transcripción de los que hablamos más arriba, un “director parcial de orquesta”. Por tanto, este gen controla una red génica que, activada en un momento concreto del desarrollo embrionario y en un lugar específico del embrión, es la responsable de la formación del ojo precisamente ahí, donde se supone que *deben* estar los ojos.

La presencia de versiones similares de un mismo gen en especies que están separadas millones de años se denomina *conservación*: en cierto sentido, la secuencia de letras de ese gen se ha conservado relativamente intacta. Recordemos que según el reloj molecular, una secuencia de ADN irá acumulando mutaciones a lo largo del tiempo; en los millones de años que pueden separar dos especies, la secuencia ancestral habrá cambiado tanto independientemente en cada una de ellas que resultará prácticamente irreconocible. Pero cuando se trata de secuencias que tienen una función importante — como un gen — la selección evitará que se introduzcan muchas mutaciones, precisamente para preservar la función de ese gen a lo largo del tiempo en cada una de esas especies. El resultado es que podremos reconocer que se trata de dos versiones de un mismo gen (una en cada especie) aunque hayan transcurrido millones de años. Es decir, la secuencia de ese gen se ha *conservado*. En el caso del gen que estábamos comentando, tan importante en el desarrollo de los ojos, el grado de conservación de la secuencia es muy fuerte; tanto, que cuando los científicos activan la versión de ratón de este mismo gen en un embrión de rana, en las células que darán lugar a la piel, éstas empieza a transformarse en algo similar a la retina del ojo de un ratón. O sea, que este factor de transcripción, en su versión de ratón, es capaz de activar la red genética responsable de la formación del ojo en la rana. Ejemplos como este son muy abundantes en la literatura científica.

La Evo-Devo, por tanto, sostiene que la evolución tiene lugar sobre todo a través de cambios en las trayectorias que sigue el desarrollo embrionario en distintos seres vivos, cambios que exigen una reconfiguración y un re-cableado de las redes de regulación genética implicadas en procesos de desarrollo. En líneas generales, este re-cableado puede hacerse de tres modos principales. Por un lado, una red de regulación puede modificarse de manera que algunos genes se activen antes o después durante el desarrollo embrionario de distintas especies, fenómeno que se conoce con el término de *heterocronía*. Otra posibilidad es que se activen los mismos genes pero en otro lugar del embrión, lo que recibe el nombre de *heterotopia*. Finalmente, la red puede reconfigurarse si uno o varios genes se activan en el momento y lugar correctos, pero con más o menos intensidad de la normal. Se han documentado numerosos ejemplos de cada uno de estas alteraciones; en conjunto, constituyen un complemento indispensable a la explicación clásica (neodarwinista) de la evolución, especialmente en lo que se refiere a transiciones en la anatomía y en los planes corporales básicos de los seres vivos, ya

que permiten vislumbrar cómo modificaciones genéticas leves pueden provocar cambios relativamente severos en un tiempo evolutivo corto.

Llegados a este punto, todavía falta una pata importante para ofrecer una explicación sólida del hecho evolutivo. Tenemos por un lado la genética de las poblaciones y los estudios más recientes que comparan genomas completos. Junto a esto, la biología del desarrollo evolutiva que acabamos de describir. Pero estos dos elementos están incompletos si no se considera un tercero, que hasta tiempos recientes ha estado relegado a un segundo plano: el ambiente. En la época en que Darwin escribió *El Origen de la Especies* los cambios ambientales recibían un papel primordial como motores de la evolución. Era aquella idea de que “la función crea el órgano”, una visión un tanto inocente según la cual un animal desarrollaría alas si tuviese la *necesidad* imperiosa de volar. Pero el ambiente pasó a jugar un papel más secundario cuando la genética de poblaciones comenzó a explicar los cambios evolutivos a nivel molecular, quedando como un simple telón de fondo en el que surgen las adaptaciones mediante selección natural.

Hoy en día, en cambio, el papel del ambiente ha vuelto a cobrar un gran protagonismo en la moderna teoría evolutiva. Los sistemas vivos naturales no evolucionan ni en el laboratorio ni en la imaginación de los científicos, sino que forman parte de *ecosistemas*, “sistemas de sistemas” que incluyen diferentes seres vivos. La ecología es la parte de la biología que se ocupa precisamente de las relaciones de unos organismos con otros y con el medio físico en el que se encuentran. En el fondo, viene a definir el *contexto* en el que tienen lugar los cambios evolutivos, y sin conocer el contexto es imposible explicar algo adecuadamente. Dicho de otro modo, el papel primordial de los cambios genéticos en el proceso evolutivo no excluye que alteraciones en las condiciones ambientales pueden en ocasiones ser el motor o el desencadenante de dichos cambios.

Un ejemplo especialmente ilustrativo de esto lo encontramos en un experimento realizado por Martin Boraas y sus colaboradores hace veinte años, en el que los investigadores propagaron un alga unicelular durante mil generaciones, nada menos. Después de este período los científicos introdujeron en el experimento otro organismo unicelular que actuaba como depredador de las algas. El resultado fue que en menos de doscientas generaciones las algas iniciales habían adoptado un comportamiento curioso: se agrupaban en grumos formados por unas doscientas células. Con el tiempo, esos agregados fueron reduciéndose hasta estabilizarse en colonias de ocho células que se comportaban coordinadamente, de manera similar a como lo hace un organismo multicelular. Incluso después de retirar el depredador, las algas continuaron reproduciéndose como organismos formados por ocho células. Un cambio ecológico relativamente sencillo (la introducción de un depredador) había provocado una transición evolutiva notable. En general, las situaciones de estrés —la reacción ante un depredador, en este caso— son un claro ejemplo de cómo el contexto favorece ciertas innovaciones genéticas que permiten a esa población superar unas condiciones desfavorables.

Antes de la revolución de la biología molecular, en torno a los años 40, se denominó *epigénesis* a la influencia que ejerce el ambiente sobre el desarrollo embrionario y sobre

la especialización celular que tiene lugar durante éste. Hoy en día hemos tomado prestado este término para hablar de cambios epigenéticos siempre que nos referimos a modificaciones químicas que alteran el funcionamiento de los genes sin cambiar su secuencia de letras. Estos cambios tienen distintas causas, pero muchas veces responden a estímulos externos muy variados, desde el simple contacto entre células hasta diferencias en la temperatura ambiental. Incluso situaciones como el estrés dejan su huella en los genes, tanto en bacterias o plantas como en el cerebro de ratones de laboratorio o en el mismo cerebro humano. Habitualmente, estas modificaciones epigenéticas no se heredan, por lo que no jugarían un papel relevante en la evolución. Algunos científicos, sin embargo, aseguran que algunos cambios epigenéticos sí podrían pasar a las siguientes generaciones y así posibilitar que en ocasiones el ambiente dicte la orientación de algunos cambios evolutivos. Esto supondría una cierta resurrección del lamarckismo, al menos en una versión mitigada, pero por el momento no hay un consenso unánime sobre este tema entre los científicos.

Por otro lado, es evidente que muchos seres vivos aseguran su supervivencia a fuerza de modificar el ambiente para hacerlo más favorable: desde las sustancias que emite una bacteria para ahuyentar depredadores hasta los sofisticados diques que construyen los castores, hay ejemplos abundantes de adaptaciones evolutivas mediante las cuales un ser vivo modifica su hábitat para crear las condiciones que le permitan sobrevivir con más eficacia. En ecología este fenómeno se llama “construcción de nicho”, ya que el ser vivo en cuestión adapta el nicho ecológico en que se encuentra para hacerlo más favorable a su propia supervivencia. Lógicamente, cada especie de un mismo ecosistema intentará modificar ese nicho en su propio beneficio, en ocasiones perjudicando a especies vecinas. Esto crea unas dinámicas que pueden tener una importancia decisiva en las trayectorias evolutivas de todo el ecosistema.

Todo esto enriquece aún más nuestra metáfora de la orquesta, ya que el ambiente también puede modificar o matizar el modo en que los seres vivos interpretan la partitura. Podríamos imaginar que nuestra orquesta está dando un concierto en una plaza pública y que los oyentes puedan acercarse e indicar a uno de los músicos que improvise un pequeño pasaje, o que uno de los músicos aproveche un sonido de fondo —el viento silbando entre los árboles— como base para crear una nueva melodía (en este sentido, nuestra orquesta es más bien una *Big Band* de jazz). Pero para que esta metáfora funcione bien en el contexto del cambio evolutivo, hay que añadir algo más. Está muy bien que la orquesta se pueda adaptar a los gustos del público y a la improvisación de los músicos, pero esto sólo pasará a la historia si los cambios introducidos quedan reflejados en las partituras que interpretan todos los instrumentos de la orquesta. Esto es lo que hacen los seres vivos en esta interacción entre genes, ambiente y desarrollo: con cada innovación la partitura se modifica y se auto-interpreta con los mismos músicos, pero en diferente orden y con otros tiempos. Cuando se constituya una nueva orquesta, sus partituras llevarán el registro histórico de todos los cambios acumulados en cada interpretación desde el inicio de los tiempos.

Todo parece indicar que la genética, la biología del desarrollo y la ecología se hallan inextricablemente unidas en un proceso de evolución de los seres vivos que resulta altamente singular: por así decirlo, estos tres elementos se combinan para formar la historia de cada viviente. De alguna manera, esta historia de cada viviente es incorporada en la herencia genética que transmite. El hecho de que la historia sea un factor decisivo en la evolución apunta en la misma dirección que el universo en que nos encontramos: se trata de un universo nacido con muy baja entropía y, por tanto, muy lejos del equilibrio; esto hace que las configuraciones globales no se repitan, de tal forma que cada una de ellas es distinta, nueva. Este universo, capaz de generar novedad es, sobre todo, capaz de albergar vida. La vida no parece ser un fenómeno anecdótico y local del universo, sino más bien una de sus posibilidades globales más profundas.

Por otro lado, en esta visión sistémica del funcionamiento de los procesos evolutivos que hemos esbozado aparecen algunas propiedades o características básicas sobre las que vale la pena reflexionar. Vemos, por un lado, la enorme *plasticidad* que muestran los sistemas naturales vivos. Dependiendo del contexto en que se encuentren, un sistema podrá reorganizarse de manera que el resultado (el color, la forma, alguna función concreta) sea ligeramente distinto. Estas adaptaciones, como hemos visto, son el resultado de la reconfiguración y re-cableado de redes de regulación genética que afectan a los procesos de desarrollo embrionario, por lo que pueden quedar registradas en la información genética y ser transmitidas a generaciones futuras. Este grado de plasticidad que caracteriza lo vivo añade nuevas e interesantes posibilidades evolutivas.

Pero esta flexibilidad no es absoluta, evidentemente. Unos sistemas naturales excesivamente plásticos darían lugar a configuraciones demasiado inestables que provocarían la rápida extinción. Para compensar esta plasticidad los seres vivos tienen otra característica que hace que las trayectorias evolutivas discurran por caminos de moderación. Hace falta que los sistemas naturales vivos presenten cierta resistencia al cambio, cierta estabilidad, es decir, lo que se conoce como *resiliencia*. La *resiliencia* de los seres vivos significa que a lo largo de los procesos evolutivos un sistema mantiene sus propiedades sin modificarse radicalmente al mismo tiempo que puede reorganizarse para responder a las demandas de un contexto ambiental cambiante. En el fondo, estas dos fuerzas opuestas —resiliencia y plasticidad— y la tensión que hay entre ellas es el resultado del dinamismo propio de las redes de regulación génica que rigen los procesos de desarrollo de los seres vivos. También es una característica de las redes que se hallan en el régimen crítico, entre el orden y el caos. Como vimos, esas redes corresponden a sistemas dinámicos que están constantemente reconfigurándose y alcanzando nuevos equilibrios. El sistema es el mismo, pero se mueve ligeramente en respuesta a diferentes estímulos, buscando nuevos puntos óptimos de equilibrio. Mientras la red no cambie, no habrá grandes innovaciones evolutivas en la forma o función, de ahí la resiliencia. Pero cuando la red encuentre una nueva configuración mejor, esto se traducirá en cambios externos que quedarán integrados en el programa de desarrollo de ese ser vivo, y así podrán pasar a la descendencia.

5. A MODO DE RESUMEN

La contemplación de la naturaleza nos muestra que está dotada de una extraordinaria capacidad de cambio; esto es más notable todavía cuando centramos la atención en los seres vivos. Las transformaciones experimentadas por los vivientes a lo largo de los últimos tres mil millones de años son la evidencia de lo que hoy llamamos evolución.

Pero la visión sistémica que hemos adoptado desde nuestro primer paseo por el parque, la visión que nos ofrece la ciencia actual, permite explicar el proceso evolutivo de un modo mucho más rico y sugerente de lo que hacía el neodarwinismo de mediados del siglo xx. Hoy sabemos que la evolución es la respuesta a cambios genéticos, ambientales y ecológicos mediante la reconfiguración de las redes de regulación genética que controlan los programas de desarrollo embrionario de los seres vivos. La estructura y dinámica propias de estas redes permite explicar su plasticidad y robustez. Y al mismo tiempo, hemos aprendido cómo algunas alteraciones genéticas pueden modificar la estructura de estas redes y dar lugar así a cambios evolutivos relativamente importantes en poco tiempo.

Esta visión nueva, más rica, de los mecanismos evolutivos supone desprenderse de algunos de los supuestos centrales del neodarwinismo clásico, especialmente el gradualismo ingenuo. Hoy sabemos que la metáfora de escalar la cima de la montaña, milímetro a milímetro, pero siempre subiendo, es errónea. De hecho, no tiene por qué haber una única cima que escalar, ni está claro qué significa exactamente eso de ir siempre *hacia arriba*. Más bien, la evolución discurre como nuestro mismo paseo, moviéndose por un paisaje formado por colinas y hondonadas, subiendo unas veces, bajando otras, e incluso saltando de una roca a otra en ocasiones. Evidentemente, las estrategias adaptativas exitosas serán diferentes en función de si nos hallamos ante un paisaje más o menos ordenado o estamos más bien ante un paisaje rugoso y abrupto, con muchas cimas y valles que impiden que pasemos de un sitio a otro con facilidad.

Además el paisaje también varía con el tiempo, de tal modo que la plasticidad en las mismas estrategias de cambio es necesaria para sustentar el fenómeno de la vida. No siempre se alcanzarán las soluciones óptimas, a veces será suficiente con algo que ayude a *salir del paso*, dar con una solución que funcione razonablemente bien de entre todas las posibilidades que ofrece la estructura misma del sistema vivo. Si esas posibilidades son muchas o pocas, si podrían ser casi infinitas o por el contrario están muy limitadas, es una cuestión muy debatida entre los pensadores que han reflexionado sobre el alcance de las ideas evolutivas. Esa es, precisamente, la cuestión de la que nos ocuparemos en el siguiente capítulo.

IV. LÍMITES

1. ADAPTACIONES

Recientemente uno de nosotros visitó una exposición llamada “Camouflages”, del fotógrafo Joan Fontcuberta. En ella el artista intenta ilustrar que no todo lo que vemos es como parece: en ocasiones nos dejamos engañar por los sentidos o por lo que otros nos cuentan como cierto. Para lograr este propósito, en la exposición alterna especímenes reales de plantas y animales con otros imaginarios, pero descritos con un grado de detalle y verosimilitud tan altos que la mayoría de los visitantes los toman como reales sin cuestionar su autenticidad. Así, uno de los ejemplares de la exposición era realmente peculiar, un animal peludo del tamaño de una marmota pero con un larguísimo apéndice nasal (totalmente peludo también) al final del cual se encontraba una enorme pinza de cangrejo. A pesar de contar con un nombre científico ciertamente sonoro y evocador de la voracidad que le otorga su serpenteante y peluda trompa, el *Piluserpens edax* no existe, no ha existido nunca y es muy probable que nunca sea descubierto en nuestro planeta. Las dos primeras negaciones son fácilmente asumibles, pero la última puede parecer demasiado fuerte a algunos lectores: en concreto, a aquellos que piensen que es imposible descartar *a priori* que algo vaya a aparecer en nuestra biosfera, tanto en un futuro próximo como dentro de mil millones de años. La experiencia de George Shaw, responsable del Departamento de Historia Natural del *British Museum* de Londres en 1799, tendría que habernos enseñado algo: cuando recibió el primer ejemplar disecado de un ornitorrinco, enviado por el capitán John Hunter desde Australia, reaccionó con incredulidad: ¿un topo peludo semi-acuático con cola de castor, pico de pato y garras de nutria?, ¿un mamífero que pone huevos? No podía tratarse más que de una broma pesada, y de hecho durante algún tiempo se creyó que era una falsificación. Pero al final resultó que en la costa este del continente australiano vive un animal que reúne todas esas características.

Si el ornitorrinco y las otras especies semejantes que posteriormente se descubrieron son animales reales, ¿por qué afirmamos con tanta contundencia que *Piluserpens edax* nunca hará su aparición en nuestro planeta? ¿No es verdad que probablemente hay cientos o miles de especies viviendo en la Tierra que todavía no hemos descubierto? ¿No

podría ser *Piluserpens edax* una de ellas? Las cuestiones que abordaremos en este capítulo nos ayudarán a entender por qué la respuesta más probable es “no”. Otro modo de plantearse esta misma pregunta, pero a un nivel más general, sería la reflexión sobre cuáles *soluciones* biológicas no se han dado nunca: si determinadas configuraciones concretas de los sistemas naturales no han sido favorecidas por la evolución hasta ahora, es poco probable que las veamos en el futuro.

Habitualmente, los esfuerzos de los taxonomistas se centran, como es lógico, en lo contrario, en catalogar las formas de vida conocidas con todas las adaptaciones que llevan consigo. En este contexto, *adaptación* se refiere a cualquier estructura o función de un sistema natural vivo que aumenta su viabilidad en un contexto ecológico determinado, de modo que el ser vivo en cuestión está mejor adaptado a esas condiciones que si no poseyese esas características. Las espinas de los cactus son una adaptación de las hojas de las plantas, típica de ambientes muy áridos. El pico largo de los colibríes es una adaptación que les permite obtener el néctar de flores alargadas. Y así un largo etcétera. Los seres vivos, plantas y animales, pueden considerarse, en cierto modo, como una colección de rasgos adaptativos. Algunos son más comunes y nos llaman menos la atención precisamente por su alta frecuencia, mientras que otras combinaciones pueden resultar sorprendentes, como en el caso del ornitorrinco.

Llegados a este punto hay dos cuestiones básicas que hemos de abordar. La primera tiene que ver con lo que acabamos de decir: la frecuencia y tipos de adaptaciones que encontramos en la naturaleza. ¿Existen adaptaciones realmente únicas, evolucionadas una sola vez en los últimos tres mil millones de años? Y si existen, ¿son la norma o, más bien, la excepción? La otra reflexión fundamental tiene que ver con la prevalencia e importancia de la adaptación durante el proceso evolutivo. ¿Existen rasgos físicos, estructuras o funciones, que hayan evolucionado sin tratarse de auténticas adaptaciones, es decir, sin aumentar la viabilidad de los seres vivos que las llevan?

No olvidemos por último que responder a ciertas preguntas en términos de probabilidades siempre conlleva un riesgo. En general, es difícil, y con frecuencia imposible, conocer el conjunto de todas las posibilidades a partir del que se puede definir rigurosamente la probabilidad o la frecuencia de ocurrencia de un determinado rasgo o adaptación en los seres vivos. Tendremos que ser, por tanto, muy cautos en nuestras afirmaciones. Vayamos por partes.

2. CONTINGENCIAS

Es difícil encontrar adaptaciones que sean realmente únicas. Podemos considerar estructuras como alas, ojos, órganos concretos, espinas, tentáculos... podemos pensar en funciones específicas, medios de locomoción, modos de desarrollo embrionario. La inmensa mayoría de los rasgos que tienen un cierto carácter adaptativo han aparecido varias veces a lo largo de la evolución de la vida en nuestro planeta. Quizás esto podría resultar sorprendente, pero pensándolo bien no tiene nada de particular. Si las condiciones ambientales en las que se desenvuelven los sistemas vivos, aun siendo

cambiantes, aparecen de forma cíclica y en diversos lugares del planeta, es lógico pensar que las formas de vida —que se adaptan a condiciones ambientales equivalentes— hayan desarrollado estrategias parecidas para aumentar su probabilidad de sobrevivir. Esto ha dado como resultado la aparición de estructuras o funciones similares en diferentes momentos y lugares. Dada la evidente ventaja que supone la visión, por ejemplo, no tiene nada de especial que órganos comparables a los ojos hayan aparecido en multitud de linajes evolutivos, tanto acuáticos como terrestres, tanto en insectos como en vertebrados. El vuelo, como estrategia de locomoción que requiere la presencia de alas, está presente en insectos, pájaros y mamíferos. Y así un largo etcétera. Incluso algunas *rarezas* de la naturaleza, como la trompa de los elefantes o el cuello de las jirafas, podrían no ser realmente únicas.

El cuadro general que vemos en la naturaleza, por tanto, es el de una gran mayoría de adaptaciones que han aparecido muchas veces, unas pocas adaptaciones únicas o muy raras, y otras que no se han dado nunca, al menos que sepamos. La imaginación podría pensar estructuras o funciones que hoy nos resultan desconocidas o incluso extrañas: de hecho, no es raro encontrar en películas de ciencia ficción especies alienígenas con adaptaciones que no se corresponden con las que conocemos en nuestro planeta. Obviamente, la existencia de estas especies se limita a la mente de esos creativos, por lo menos hasta que se encuentre algún ejemplar. Mientras tanto, hemos de admitir que ningún ser vivo conocido es capaz de lanzar rayos por los ojos o tiene órganos para detectar las ondas de radio. ¿Qué nos dice esto acerca de los procesos que rigen la naturaleza?

Una conclusión bastante evidente tiene que ver con la contingencia histórica de los procesos evolutivos y de los sistemas vivos en general, tema que es objeto de debate entre los expertos desde hace algunas décadas. En principio, la consideración de la historia de la vida en nuestro planeta durante los últimos tres mil millones de años está plagada de *casualidades*, eventos que podrían haber sucedido de otro modo y que, tal y como sucedieron, han tenido una trascendencia enorme en los acontecimientos futuros. Quizás el más citado es el famoso meteorito de diez kilómetros de diámetro que cayó sobre la península de Yucatán hace 66 millones de años liberando una cantidad de energía equivalente a mil millones de bombas atómicas como las de Hiroshima y Nagasaki: a este meteorito se atribuyen diversas alteraciones climáticas que tuvieron como consecuencia la desaparición de los dinosaurios. Esta aniquilación masiva de vida vegetal y animal, la última de las grandes extinciones, dejó gran cantidad de nichos ecológicos disponibles para ser ocupados, y fueron precisamente los mamíferos los que mejor se adaptaron a las nuevas condiciones ambientales. La aparición de una multitud de nuevas formas y estilos de vida de los mamíferos haría posible, sesenta millones de años más tarde, la aparición de primates hominoideos en África de los que procedemos los humanos. La conclusión a la que habitualmente se llega es que si el asteroide hubiese tenido una trayectoria levemente distinta, menor tamaño o hubiese impactado de forma diferente, probablemente los humanos no estaríamos aquí. Nuestra presencia en el planeta es *pura casualidad*, se dice.

La conciencia de que todo lo que hay en este universo, tal y como lo conocemos, depende de innumerables factores que podían haber sido de otro modo permite plantearse en profundidad lo que entendemos por *necesario*: por un lado, constatamos que ningún proceso cósmico aislado es absolutamente predecible, tal y como sucede en nuestro día a día, repleto de sucesos que podrían haber tenido lugar de otro modo o en otro momento. Probablemente no estarías leyendo este libro en este preciso instante si hace media hora el cartero te hubiese traído ese otro paquete que estabas esperando; si esa gacela no hubiese buscado pasto ese día a esa hora, el león quizás habría quedado en ayunas; ese salmón concreto podría haber subido a desovar en un momento en que el oso no estaba en el río, y toda su progenie se habría desarrollado... Todas estas contingencias podrían no haber tenido lugar y los eventos posteriores habrían cambiado. Pero al mismo tiempo es muy probable que el oso capture un salmón diferente, el león busque y encuentre otra gacela para comer y tú, de hecho, estás leyendo estas páginas en este momento y no en otro (y todavía no has abandonado la lectura, para nuestra alegría). El aspecto contingente de muchos sucesos se hace más evidente cuando se trata de hechos relevantes desde el punto de vista histórico, pero aun así es posible que se hubiese llegado a situaciones similares por caminos diferentes: el viaje de Colón a las Indias podía haberlo financiado el rey de Aragón, en vez de la reina de Castilla. Probablemente para Colón hubiese sido un cambio importante, así como para el rey Fernando y la reina Isabel, pero desde un punto de vista histórico la situación final probablemente fuese la misma: Colón nunca llegaría a las Indias, encontrándose con América por el camino. Incluso si nadie finanziase el viaje, es muy improbable que América permaneciese ignorada por la cultura europea eternamente. La vida no sería exactamente igual, es cierto, pero sería bastante parecida. Es decir, nos cuesta ver la contingencia como *absoluta*: se trata de un rasgo que afecta el decurso de la historia en cuestiones menores o superficiales. Al mismo tiempo que afirmamos la contingencia de cada hecho concreto, tendemos a identificar constantes universales, eventos que no podrían haber sido de otro modo y patrones que se repiten en sus aspectos básicos, aunque cambien los detalles.

Esto nos lleva a preguntarnos si habrá algo absolutamente necesario, que no pueda ser de otro modo. Es una pregunta que el hombre siempre ha tenido presente, y a la que de hecho ha dado respuesta de muy diferentes formas a lo largo de la historia: desde la negación radical de cualquier tipo de necesidad, hasta el más estricto necesitarismo que sostiene que todo es del modo que tiene que ser. No es nuestra intención resolver en estas páginas este problema: simplemente apuntaremos que, desde el estricto punto de vista empírico, es muy difícil mantener que algo es necesario —lo que percibimos por los sentidos siempre podría haber sido de otro modo. Pero el estricto punto de vista empírico no es el punto de vista que adopta la ciencia: por una parte, toda recogida de datos empíricos se hace siguiendo algún modelo de referencia, que permite colocar e interpretar los resultados obtenidos dentro de un marco teórico; por otra, la reflexión sobre lo que percibimos y sobre nuestro modo de conocerlo nos lleva a aceptar algunas tesis como prácticamente definitivas, precisamente porque son las únicas en las que tiene

cabida esa contingencia que descubrimos a nuestro alrededor. Siempre cabe la posibilidad de aferrarse a algún tipo de empirismo radical y absoluto, pero incluso el más acérrimo empirista toma algunas tesis como definitivas y fuera de discusión. En la historia de la filosofía el positivismo lógico es tal vez la apuesta más radical por el estricto punto de vista empírico, expresado con dos principios fundamentales: 1) todo conocimiento no analítico —es decir, que no depende de la relación entre los elementos del enunciado, como sucede en lógica y matemáticas— depende de la experiencia, y 2) un enunciado tiene significado sólo si es analítico o puede ser verificado experimentalmente. Es igualmente bien conocida la crítica a estos principios: ni pueden ser verificados experimentalmente ni son analíticos, de tal forma que aceptarlos es tomarlos por definitivos y fuera de discusión.

La evolución de la vida muestra que también hay ciertas constantes: las mismas adaptaciones, o muy similares, han aparecido en diferentes ocasiones, separadas a veces por millones de años. Vemos sistemas naturales tan lejanos como insectos y aves que *convergen* hacia una estrategia similar, el vuelo. O bien líneas evolutivas diferentes que desarrollan en paralelo, de forma totalmente independiente, una misma adaptación. Incluso en la evolución de las moléculas nos encontramos con un grado tan alto de convergencia que resulta difícil de creer hasta que no se lleva a cabo un estudio detallado de lo que ha sucedido. La convergencia y el paralelismo que se dan en la evolución muestran claramente que algunas *soluciones* biológicas son más probables que otras, e incluso permiten afirmar que algunas son tremadamente improbables; aunque es difícil estar seguro de que alguna sea totalmente imposible, es una opción que no se puede descartar. La lista de ejemplos podría ser muy larga —y realmente fascinante—, desde proteínas con actividad anticongelante (una adaptación muy útil en ambientes extremadamente fríos) hasta proteínas necesarias para el correcto funcionamiento de los procesos digestivos. En muchos de estos casos, los cambios a nivel molecular tienen lugar exactamente en los mismos genes en especies muy alejadas evolutivamente, y a veces incluso las mutaciones son idénticas. La evolución humana reciente (aproximadamente durante los últimos 10.000 años) es un buen muestrario de lo que estamos diciendo. La conocida persistencia de la lactasa, que permite a los adultos digerir la lactosa de la leche, se debe a mutaciones que se concentran en una región de 100 nucleótidos del genoma humano. Esa misma región ha mutado repetida e independientemente en poblaciones de África (hace unos 5.000 años) y de Europa (hace 7.500 años), siempre con el mismo resultado: la persistencia de la actividad de lactasa. Otro ejemplo bien documentado es el de los humanos que han debido adaptarse a vivir en grandes altitudes: tanto las poblaciones tibetanas como las del altiplano andino muestran ciertas variantes en un mismo gen (EGLN1) que tiene relación con la respuesta del organismo a los bajos niveles de oxígeno en el aire.

La otra cara de la moneda de esta tendencia a *repetir* algunas innovaciones evolutivas en la naturaleza es que otras son tremadamente infrecuentes. De hecho, muchas de las variantes obtenidas mediante selección artificial llevada a cabo por humanos, “dirigiendo” o forzando la evolución en un sentido concreto, nunca se han dado

espontáneamente por selección natural. Existen abundantes ejemplos, porque los humanos llevamos miles de años seleccionando determinadas adaptaciones naturales de plantas y animales mediante cruzamientos selectivos, llegando incluso a obtener variedades nuevas (casi podríamos decir *artificiales*), que resultan ventajosas para nosotros: el trigo que se cultiva hoy en todo el mundo para hacer pan, por ejemplo, o las innumerables razas de perros de formas y rasgos tan variados, que tan bien se adaptan a intereses —o caprichos— humanos muy concretos. A nivel molecular sucede lo mismo: en laboratorios especializados en “evolución dirigida” de proteínas se han llegado a obtener moléculas con actividades que nunca se habían encontrado en la naturaleza: enzimas capaces de reconocer nuevos sustratos, nuevos biocatalizadores...

Sin embargo, tampoco deberíamos subestimar las posibilidades de la naturaleza, porque nos podemos llevar sorpresas. Recientemente, por ejemplo, se ha encontrado una bacteria capaz de alimentarse de electricidad, cosa inaudita hasta el momento. O, más curioso aún, otros científicos han analizado unos extraños microbios que crecen en las fuentes termales de Islandia y han descubierto una proteína que es capaz de unir carbono con silicio. Lo cual es intrigante porque, evidentemente, estas bacterias no se alimentan de silicio. Pero lo fascinante del asunto es que los científicos tomaron el gen que codifica esa proteína, lo introdujeron en otras bacterias y lo mutaron hasta conseguir una proteína que favorece la creación de enlaces entre carbono y silicio con mayor eficacia que cualquier otro catalizador artificial conocido hasta el momento. En cualquier caso, a pesar de que hallazgos como éste siempre serán posibles, podemos concluir que no todo lo que *puede* existir, tanto en lo que se refiere a formas y funciones como a actividad molecular, ha existido de hecho alguna vez de forma natural. ¿Por qué? La respuesta fácil sería que, dadas las condiciones ambientales por las que ha atravesado nuestro planeta, ciertas adaptaciones nunca han sido necesarias o ventajosas, por lo que la selección natural no las ha favorecido. Pero se puede profundizar un poco más en esta explicación, añadiendo algunos matices interesantes.

Es poco probable que la mera contingencia sea la mejor explicación. De hecho, los procesos evolutivos parecen estar sujetos a algún tipo de *restricción* que canaliza el abanico de posibilidades evolutivas haciendo que se llegue a algunas soluciones o adaptaciones con mayor facilidad que a otras. ¿Por qué sucede esto? ¿Qué tipo de restricción es ésta? Para entenderlo, vendrá bien repasar la metáfora del paisaje, una de las imágenes preferidas por los teóricos de la evolución y de la adaptación. En un paisaje con colinas y hondonadas, los picos representarían los grandes avances evolutivos o las soluciones más ventajosas (siguiendo con la analogía, serían las posiciones del terreno que ofrecen mejor vista, dominio del paisaje y protección ante eventuales tsunamis). La presión evolutiva para alcanzar buenas adaptaciones funciona como el alpinista que busca siempre posiciones de alta cota para mejorar la visibilidad (pero claro, sin conocer el mapa del terreno). Ahora bien, en nuestro paisaje de adaptaciones o soluciones evolutivas, algunas son visitadas con más frecuencia porque es más fácil alcanzarlas teniendo en cuenta la posición de partida y, una vez allí, es difícil encontrar o divisar una cima más alta que lleve a proseguir la ascensión. Otras adaptaciones, en cambio,

exigirían unos cambios tan profundos en el camino que conduce a ellas que solo se alcanzan raramente, cuando se dan condiciones que hacen que sea prácticamente la única posibilidad de supervivencia: esos son los picos escarpados y raramente visitados. Podemos incluso concebir algunas adaptaciones tan complejas que —de hecho— no se han dado, aunque en teoría son posibles: estas son las cimas más abruptas de nuestro paisaje; ignoramos si algún día se alcanzarán y, sobre todo, cómo podrían conquistarse. Por último, también hay algunas alturas que son, simplemente, mitológicas: el monte Olimpo de nuestro paisaje lo forman todas esas “posibles” evoluciones que podemos estar seguros que no se darán —al menos de forma natural; a pesar de todos los relatos sobre dragones que salpican las historias de muchas civilizaciones es altamente improbable que aparezca una especie terrestre capaz de escupir fuego. De igual modo, podemos estar prácticamente seguros de la imposibilidad de que en nuestra biosfera evolucione la habilidad para congelar los objetos al tocarlos. Y así un largo etcétera.

Es un hecho que no todos los picos adaptativos han sido ocupados: hay alturas que parecen reales, asequibles, pero que no han sido conquistadas —al menos por ahora. Esto nos lleva a preguntarnos por qué existe ese paisaje concreto, con esas elevaciones y hondonadas, y qué le ha dado esa forma precisa: si hay alturas que no se han conquistado, ¿a qué se debe?, ¿son también alturas mitológicas, que nunca se alcanzarán? O, dicho de otro modo, ¿cuál es el origen de las restricciones de los procesos evolutivos?, ¿por qué estas restricciones limitan algunas posibilidades y permiten otras? ¿Podemos saber exactamente cuál es el abanico de posibilidades permitidas? Baste decir en este momento que quizás la respuesta esté en la naturaleza de los sistemas vivos y en su necesidad de salir adelante en un contexto ambiental cambiante y a menudo agresivo. Para sobrevivir hay que estar dotado de unas funciones básicas que a su vez exigen unas estructuras adecuadas. Para que una adaptación tenga éxito en términos evolutivos en primer lugar tiene que ser posible, debe formar parte de las variantes sobre las que pueda *escoger* la selección natural; después, si resulta seleccionada en circunstancias diversas, será una de esas adaptaciones probables, con mayor éxito evolutivo. En las páginas siguientes discutiremos qué es lo que determina la posibilidad y probabilidad de los cambios adaptativos. En primer lugar, hemos de tener en cuenta que la historia evolutiva juega un papel esencial a la hora de delimitar lo que, en un determinado momento, resulta posible. Dicho de otro modo, no todas las mutaciones y adaptaciones son posibles en general y en cualquier momento. La situación evolutiva actual funciona como una restricción o restricción acerca de lo que es posible que cambie en un futuro próximo. El pasado evolutivo determina de forma apreciable el presente y el futuro, aunque no totalmente. Veamos esto con más detalle.

3. RESTRICCIONES

Un problema con las adaptaciones es la dificultad de saber si un rasgo que ha evolucionado en un momento y lugar concretos es realmente adaptativo o no. Es fácil caer en el error de hacer un razonamiento que va al revés, comenzando por el final y

después reconstruyendo el hipotético camino que se ha recorrido para llegar hasta ahí. Por ejemplo, vemos un cactus en el que las hojas se han modificado en espinas, comprobamos que eso supone una ventaja para retener la humedad en ambientes secos y áridos, y concluimos que se trata de una adaptación: las espinas han prevalecido porque tener espinas es una ventaja para los sistemas portadores de esa adaptación en ese contexto concreto. Como decíamos, esta forma de razonar tiene un problema básico: partir de la premisa de que *todos* los rasgos físicos de un ser vivo en un momento y lugar dados son adaptaciones; de lo contrario, no habrían sido seleccionados. Pero para ser seleccionadas, han de ser ventajas adaptativas, y si concluimos que son ventajas adaptativas es porque se han seleccionado. El razonamiento es claramente circular: los rasgos físicos actuales de un ser vivo son ventajas adaptativas, ¿por qué? Porque de lo contrario no habrían sido seleccionados. Y ¿por qué han sido seleccionados? Porque son ventajas adaptativas. ¿Por qué? Porque se han seleccionado...

Por otro lado, es una argumentación que hay que ejercer con cuidado para evitar ciertas soluciones *fáciles* que a veces rozan el simplismo. En su *Cándido*, Voltaire creó la figura del profesor Pangloss para ridiculizar a quienes siempre encuentran explicaciones *perfectas* para todo. En un pasaje, Pangloss afirma que la figura de la nariz humana se debe a que tenemos que apoyar las gafas sobre ella. Aunque efectivamente las gafas se apoyen sobre la nariz y permitan mejorar la visión defectuosa —algo claramente favorable para la supervivencia del miope—, el profesor Pangloss confunde el orden de los factores: la figura de la nariz permite entender por qué tienen esa forma las gafas, y no al revés. El mismo peligro acecha cuando intentamos explicar rasgos biológicos como adaptaciones, sin estar suficientemente apoyados por datos empíricos que demuestren la ventaja para la supervivencia que supone tener un rasgo concreto. Datos que, a poder ser, deberían estar confirmados por estudios moleculares que expliquen cómo se ha llegado a desarrollar ese rasgo. Obviamente, no siempre es posible alcanzar este grado de certeza, pero eso no es excusa para no aspirar a ello.

Un conocido teórico de la evolución, Stephen J. Gould, expuso este problema en varios artículos publicados en los años setenta y ochenta del siglo pasado, utilizando un ejemplo tomado de la arquitectura: las pechinas de la catedral de San Marcos en Venecia. El tambor de cada una de las cinco cúpulas de la catedral descansa sobre cuatro arcos dispuestos en planta cuadrangular. Esta disposición (una cúpula circular apoyada sobre el cuadrado que forman los cuatro arcos) hace que parte de la cúpula quede en el aire y se formen unos espacios triangulares entre el tambor y los arcos, con el riesgo que esto supone para la estabilidad del edificio, aparte del hecho de que no se cierra totalmente. Para solucionar este problema arquitectónico, se construyen “pechinias”, triángulos invertidos que, por un lado, dirigen el peso de la cúpula hacia los pilares y, por otro, terminan de cerrar el edificio. Las pechinas suelen decorarse profusamente, ya que ofrecen una gran superficie lisa y muy visible: en concreto, en la catedral de San Marcos de Venecia las pechinas contienen elementos decorativos importantes y de gran valor simbólico y artístico. Gould se sirve de este ejemplo para criticar la tendencia a dar explicaciones fáciles para adaptaciones biológicas, comparándola con la actitud del que

se fijase únicamente en lo bien *adaptadas* que parecen estar las pechinas a la estructura de la catedral: si no se evalúan correctamente los datos y no se sopesa bien la argumentación, partiendo de la extraordinaria adaptación de las pechinas al conjunto de la catedral, se podría llegar a afirmar que *la razón de ser* de los arcos y cúpulas —es decir, la estructura principal del edificio— es precisamente generar unos espacios —las pechinas— que permitan albergar creaciones decorativas concretas.

Obviamente, sabemos que lo que realmente sucede es que hay un plan constructivo que incluye unos arcos y una bóveda, y esto es lo que determina dónde irá todo lo demás, incluidos los adornos. El ejemplo, aplicado a lo biológico, quiere decir que existen unos principios de construcción de los seres vivos que marcan las líneas generales de los planes corporales básicos. Sobre estos planes constructivos se superponen distintas adaptaciones en función de las condiciones ambientales, que respetan y mejoran en la medida de lo posible el funcionamiento global de ese sistema vivo. En vez de considerar aisladamente las adaptaciones concretas, otorgándoles el papel principal a la hora de explicar por qué un ser vivo es como es, hemos de descubrir los principios constructivos básicos y las restricciones que imponen al sistema, tratando de entender cómo están codificados en la estructura misma del ser vivo. Con este planteamiento se advierte que algunos cambios evolutivos podrían no ser necesariamente adaptativos, en el sentido de llevarnos a alcanzar una de las cumbres de nuestro paisaje. Quizás simplemente nos mantienen a la misma altura, sin caer al fondo del valle, o quizás nos hagan incluso bajar un poco, si el conjunto de todos los cambios que experimenta ese ser vivo mantiene la línea ascendente.

Esos principios constructivos básicos aparecieron hace bastantes millones de años, coincidiendo con la emergencia de los grandes órdenes y clases de los seres vivos, y a lo largo de la historia de la vida en nuestro planeta han mantenido su estabilidad y capacidad para albergar nuevos cambios. Como hemos señalado antes, todos los procesos fundamentales que determinan el funcionamiento y la construcción de las estructuras de un ser vivo se organizan en forma de complejas redes de interacciones entre genes y proteínas, redes formadas por módulos que se combinan de distintas maneras. Si un ser vivo es un sistema en desarrollo, la evolución de los planes corporales requerirá la reorganización y re-cableado de las redes biológicas que determinan los procesos de desarrollo embrionario, como hemos visto al hablar de Evo-Devo. Uno de los campos más fructíferos para comprender cómo tuvo lugar esta reorganización es el estudio de los sistemas y módulos que han hecho posible la aparición de los seres vivos multicelulares, hace por lo menos quinientos millones de años.

El paso de la vida unicelular a la vida multicelular es tremadamente complejo, principalmente por el cambio que supone en la manera de reproducirse. Mientras que los seres unicelulares utilizan mecanismos de reproducción bastante sencillos que consisten, por ejemplo, en la división de la célula originaria para dar dos células hijas, los seres vivos multicelulares siguen un procedimiento mucho más complicado que incluye la formación de agregados celulares y la aparición de algunas células especializadas en llevar a cabo el proceso reproductivo. Los agregados celulares están sometidos a fuerzas

físicas (la tensión, la viscosidad, la adhesión de unas células a otras, etcétera) cuyo resultado es la aparición de ciertos patrones básicos de desarrollo que observamos repetidamente en los animales: formación de cavidades en el interior de una bola de células, elongación y partición del conjunto de células en varios segmentos, formación de dos o tres capas celulares yuxtapuestas, aparición de apéndices... Algunos de los módulos y redes genéticas que ya existían en sistemas unicelulares fueron utilizados y reconfigurados para sustentar estas funciones básicas que requiere el estado multicelular, de ahí que esos mismos circuitos estén presentes, con ligeras variaciones, en todos los animales multicelulares; así se explica cómo ha surgido la *homología profunda* de las redes genéticas que regulan el desarrollo embrionario.

El conocimiento que tenemos de la “caja de herramientas” genética de los seres vivos, de la que se han extraído los mismos instrumentos una y otra vez a lo largo de millones de años para poner en marcha patrones de desarrollo semejantes, nos permite comprender por qué estos circuitos genéticos, establecidos en función de las fuerzas físicas que determinan el comportamiento de los agregados celulares, ya no pueden cambiar de forma drástica: una mutación que alterase significativamente alguno de los procesos fundamentales que guían el desarrollo de seres vivos multicelulares tendría como resultado la aparición de formas incompatibles con la supervivencia. Por tanto, las posibilidades de mutar de estos circuitos quedaron muy limitadas con la aparición de la vida multicelular. A pesar de que en principio no hay ninguna razón para que un gen determinado regule en exclusiva un proceso de desarrollo concreto, ya hemos visto que esto sucede con frecuencia, como en el ejemplo los genes que dirigen la formación de ojos en todos los animales. Lo que sucedió es que una vez reclutada para este proceso la red genética controlada por un factor de transcripción llamado Pax6, dar marcha atrás a esa estrategia evolutiva implicaría el pago de un altísimo coste. En ese sentido, podemos decir que la restricción impuesta por el desarrollo determina las trayectorias evolutivas posibles; así, observamos que la conquista de una ventaja evolutiva acota las amplias opciones sobre las que puede operar la selección natural. Un cambio evolutivo es, también, un límite en el terreno de juego, tanto para ese ser vivo como para toda su descendencia. De alguna manera, la aparición de novedades evolutivas se convierte en un nuevo nivel de andamiaje necesario para la construcción de la vida tal y como la conocemos hoy. La evolución, como regla general, debe tener en cuenta lo previamente evolucionado.

Por tanto, podemos entender el viaje de la vida como un camino en el que van apareciendo sucesivos cruces, bifurcaciones y atajos, o como un árbol donde crecen nuevos brotes y ramas. En el caso del camino, la única regla es que la vuelta atrás es tremadamente difícil: una vez elegida una senda, no se puede desandar el trayecto y ensayar una nueva posibilidad; sólo cabría volver al punto de partida después de un largo camino. En el caso del árbol, el tronco y las ramas más viejas y sólidas permanecen —y sostienen el árbol— aunque aparezcan novedades en las ramas más jóvenes y en los brotes más alejados del tronco. Estos ejemplos sirven para ilustrar la idea de que el pasado evolutivo de cualquier ser vivo es una *historia* que condiciona su desarrollo: la

trayectoria que sigue un ser vivo restringe las posibilidades evolutivas de esa especie, en qué puede y no puede llegar a transformarse. Los chimpancés (y lo mismo cabe suponer de los humanos) no evolucionarán hacia el vuelo porque los circuitos genéticos que regulan la formación de las alas durante el desarrollo embrionario de los mamíferos quedaron fijados en una línea evolutiva —la de los murciélagos— que se había separado del tronco general mucho antes de la aparición de los grandes simios. Obviamente, esto no excluye la posibilidad de que, algún día, un chimpancé concreto nazca con una malformación de sus extremidades superiores que las haga similares a un ala: se trataría de aberración puntual, incompatible con la vida y que no pasaría a generaciones futuras.

Estos límites y restricciones existen, son reales, pero tampoco hay que exagerarlos: de lo contrario, la evolución estaría prácticamente cerrada. Y sabemos que no es así: la evolución de la vida es un proceso que sigue en marcha y que, como hemos indicado, combina resiliencia y plasticidad. La historia evolutiva indica donde están los límites que proporcionan estabilidad a los seres vivos, pero, al mismo tiempo, las redes y circuitos genéticos pueden cambiar, reconfigurarse y recablearse. En estos cambios se mantiene una misma configuración general de la red —es decir, se controlan los mismos procesos de desarrollo— pero sobre ella se incorporan nuevas conexiones; el resultado son estructuras anatómicas o funciones levemente distintas. La investigación más reciente en este campo ha puesto de manifiesto la importancia de los cambios genéticos en las secuencias a las que se unen los factores de transcripción: si bien estos no han cambiado mucho en cientos de millones de años, no puede decirse lo mismo de los fragmentos de ADN a los que se unen. A lo largo de la evolución, la variedad de mutaciones en las secuencias genéticas que atraen los factores de transcripción es muy amplia; precisamente estas mutaciones en el ADN han provocado la aparición y desaparición de interacciones en las redes genéticas que regulan el desarrollo.

En conjunto, todo lo que hemos aprendido en los últimos años apunta a que la estructura de las redes genéticas responsables de orquestar los procesos de desarrollo tiene algunos elementos con mayor tendencia a formar parte del cambio evolutivo que otros. Ciertos nodos concretos de estas redes, sea por la posición que ocupan o por los vecinos con los que están conectados, tienen distinta probabilidad de participar en cambios que afecten a la estructura global de la red. Cuando estudiamos dicha estructura a lo largo del tiempo —estamos hablando de millones de años— vemos que algunas mutaciones tienden a aparecer con más frecuencia que otras, porque causan más ventajas que problemas para el funcionamiento global del sistema, tienen más potencial adaptativo. Dicho con otras palabras, la evolución —a nivel molecular, al menos— podría ser hasta cierto punto *predictible*. En la frase que cierra *El Origen de las especies*, Darwin alude a las “ilimitadas formas cada vez más bellas y maravillosas” que han generado los procesos evolutivos. Hoy sabemos que la restricción impuesta por las constantes físicas y los procesos de desarrollo tiene como resultado, más bien, un conjunto limitado de formas, ciertamente bellas y ciertamente maravillosas.

De hecho, en las ciencias de los sistemas complejos —como explica Melanie Mitchell— la perspectiva comúnmente aceptada es que en cada sistema hay una serie de niveles

o recursos formales (tipos de redes) responsables de mantener la identidad del sistema, mientras que otros niveles o recursos se utilizan para explorar nuevas posibilidades de adaptación, optimizando las estrategias sin comprometer la unidad global del sistema. Este modo de funcionar parece ser una ley formal de los sistemas complejos, es decir, una ley que es independiente del material concreto del que estén construidos. La estabilidad y la plasticidad de los seres vivos parecen estar también optimizadas en la evolución.

Todo lo dicho se aplica, lógicamente, a la única biosfera que conocemos: la que nos alberga. Se pueden hacer conjeturas sobre la posible existencia de sistemas vivos extraterrestres, y, en el caso de existir, cuáles serían sus características y propiedades evolutivas. Esto ha llevado a reflexiones muy interesantes: por un lado, quienes dan más valor a la contingencia histórica de los sucesos cósmicos tienden a pensar en un universo sembrado con formas de vida que podrían ser radicalmente diferentes a las que conocemos en la Tierra. Otros, fundamentados en el hecho de que toda la vida está basada en el carbono y que este elemento está presente en todo el universo, son más proclives a pensar que la vida alienígena sería similar a la que ya conocemos, al menos en ese aspecto. En este sentido, es interesante que se hayan encontrado en el polvo interestelar y en galaxias muy lejanas algunos compuestos sencillos de carbono idénticos a los que probablemente dieron lugar a las biomoléculas utilizadas en los sistemas vivos de la Tierra; es plausible, por tanto, que moléculas similares al ADN o a las proteínas pudieran estar también en la base de los posibles sistemas vivos del espacio exterior. Yendo todavía un poco más lejos, si —como parece— las constantes físicas fundamentales son las mismas en todo el universo, cabe esperar que las formas celulares y multicelulares que pudieran darse sean también semejantes a las de nuestro planeta y estén sometidas a procesos de desarrollo y evolutivos con restricciones similares a las que encontramos aquí. Como hemos visto, los sistemas moleculares y las redes genéticas que controlan los procesos vitales básicos, incluidos los que determinan el desarrollo embrionario, aparecieron hace millones de años y se han conservado con sorprendente estabilidad a lo largo de la evolución. Quizás en otras galaxias, sometidas a condiciones ambientales muy distintas a las nuestras, los componentes de la *caja de herramientas* genética sean muy diferentes y existan sistemas vivos con capacidades inéditas en nuestra biosfera. Pero si las constantes físicas elementales son las mismas, también cabe la posibilidad de que el contenido de la caja de herramientas no sea tan dispar y que el aspecto de lo vivo en regiones alejadas del universo nos resulte familiar. Quizás encontraremos organismos con capacidad de *ver* los rayos X, al contrario de lo que sucede en nuestra biosfera, pero en cualquier caso serán organismos con algo muy semejante a un ojo.

4. A MODO DE RESUMEN

Hemos considerado a lo largo de este capítulo cuestiones relativas al carácter de los procesos evolutivos que rigen el cambio y la transformación de los sistemas vivos

naturales en nuestro planeta. Una pregunta que se han hecho muchos pensadores tiene que ver con el concepto mismo de selección natural como elemento crucial de estos procesos. ¿Qué es lo que selecciona realmente la selección natural? La respuesta clásica es que selecciona individuos o, más exactamente, adaptaciones concretas que dotan a los individuos que las portan de una cierta ventaja para sobrevivir respecto a los que carecen de ellas. Pero definir adaptación en términos de supervivencia lleva a una tautología que ha preocupado a muchos autores: en el fondo, decir que sobreviven los mejor adaptados ¿no es decir que *sobreviven los que han sobrevivido*? Por eso es mejor acudir a otras maneras de comprender la adaptación, buscando una reflexión más profunda sobre la naturaleza misma de lo que está siendo seleccionado.

La visión que hemos expuesto de los seres vivos como sistemas naturales complejos con comportamientos no-lineales, constituidos a nivel molecular por redes de interacción que controlan los procesos de desarrollo necesarios para la reproducción y supervivencia de lo vivo, permite vislumbrar matices nuevos. Uno de ellos, que cobra gran importancia en cualquier discusión actual sobre los procesos evolutivos, es el de *restricción*, el conjunto de limitaciones básicas a las que están sujetos los planes constructivos de todos los seres vivos. Para algunos autores, la selección natural selecciona precisamente esta restricción: salirse de los límites del terreno de juego llevaría a transitar por lugares desconocidos que —probablemente— acaben en callejones evolutivos sin salida. Sobre este conjunto limitado de posibilidades de desarrollo de planes corporales se depositarían las diversas adaptaciones concretas que la selección natural dicta de acuerdo con las condiciones ambientales y ecológicas en las que se desenvuelve ese sistema vivo.

El concepto de “restricción” no debe entenderse de manera peyorativa. Una restricción evolutiva, precisamente, posibilita la aparición de novedades en otro nivel de desarrollo que de otra manera no podrían surgir o resultarían inservibles. Estas restricciones en los niveles más básicos de construcción de la vida sugieren además la existencia de una jerarquía de niveles interconectados en el desarrollo del viviente, a partir de la cual se puede optimizar el difícil compromiso entre estabilidad y cambio.

Esto explicaría, además, por qué la selección natural no *encuentra* siempre las soluciones que podrían parecer óptimas a problemas biológicos concretos. A menudo se comprueba que las adaptaciones no son las mejores que podrían haberse dado, muchas veces se trata simplemente de soluciones buenas, o menos malas, que permiten a nuestro sistema moverse por el paisaje adaptativo alcanzando cotas razonables para la subsistencia. Además, la propia historia evolutiva previa, fruto de una trayectoria mantenida durante millones de años, contribuye a delimitar el espacio de posibles soluciones. Adaptaciones que ya han funcionado bien en el pasado se darán con más facilidad; otras, que fueron inviables, probablemente no reaparezcan nunca. Todo esto contribuye al hecho de que la selección trabaje sobre unas opciones amplias pero limitadas: aquellas que son posibles y principalmente las que son más probables.

Como hemos visto, el hecho de que los sistemas vivos estén constituidos por redes modulares es la base tanto de la plasticidad que muestran como de la estabilidad o resiliencia que también es necesaria para que pueda haber evolución. Es decir, en un

último análisis, lo que realmente selecciona la selección natural es precisamente la capacidad de evolucionar. Dicho de otro modo: la *evolucionabilidad* es la propiedad necesaria de todos los seres vivos. El concepto de evolucionabilidad sugiere además un tipo de cambio que no compromete la identidad del sistema. Los seres vivos mantienen siempre un espacio de posibilidades de cambio dentro de su organización interna para ajustarse a los vaivenes de un entorno que no pueden predecir en su totalidad. Han de estar preparados para cambiar, anticipando incluso los cambios del entorno, si quieren seguir viviendo. Sin esta propiedad, la capacidad de proteger la identidad en el cambio, la vida no habría prosperado, nuestro planeta sería uno más entre los sistemas inertes de este universo.

La vida de los seres humanos —la de los autores de este libro, la del lector que lo tiene entre sus manos— está llena de situaciones inesperadas, más o menos dramáticas. Todos hemos experimentado la tensión que supone enfrentarse a algo novedoso. De hecho, la posibilidad de que suceda algo nuevo es lo que llena de sentido muchas de nuestras acciones: al tomar una decisión abrimos un camino cuyo final nos es desconocido, pero que esperamos con cierta ilusión. Sin estas novedades, sin el riesgo que supone enfrentarse a lo inesperado, lo mínimo que puede decirse es que la vida sería muy aburrida. Algo semejante sucede con la naturaleza y los seres vivos: una vez que la vida apareció en nuestro planeta, tuvo que adquirir la capacidad de ajustarse constantemente a lo nuevo y a lo impredecible. Quizás fue la presencia de ciclos cósmicos o los cambios bruscos de presión y temperatura a los que se vio sometida la vida inicial lo que llevó a que se seleccionase esta imparable capacidad de cambiar y adaptarse a lo inesperado. Quizás el origen de esta capacidad es todavía anterior, y el principio interno que rige el comportamiento de toda la naturaleza es el de ir aumentando las posibilidades creativas de cada ser vivo mediante una creciente optimización de recursos compatible con su propia individualidad. En cualquier caso, el conocido dicho que define la evolución como la manera que tiene la vida de enfrentarse a lo impredecible quizás exprese una verdad fundamental acerca de lo vivo: sólo pervive aquello que se puede adaptar a situaciones nuevas.

V. FUNCIONES

1. CAUSAS Y RAZONES

A lo largo de nuestra ya larga reflexión sobre los sistemas naturales que encontramos en nuestro universo, tanto inertes como vivos, hemos adoptado algunos términos que tienen, en el lenguaje coloquial del día a día, un significado algo impreciso a pesar de que la mayoría de nosotros los usamos para significar más o menos lo mismo. En el contexto de este libro, en cambio, nos parece ineludible precisar un poco más el sentido en que utilizamos algunos de estos términos, sobre todo porque este ejercicio —históricamente — ha dado lugar a especulaciones filosóficas bastante interesantes que es importante mencionar aquí.

Hemos hablado con frecuencia, por ejemplo, de *mecanismos* y de *funciones*, dos nociiones que a menudo se confunden pero que es importante distinguir bien, como han hecho muchos autores. Quizás el concepto de mecanismo es más nítido, menos vago. Un mecanismo es la disposición concreta —espacial y temporal— de un conjunto de elementos que forman parte de un sistema, así como las interacciones entre cada uno de esos elementos. Cuando intentamos describir un mecanismo, lo que hacemos es detallar todos los elementos que intervienen junto con todas sus relaciones, para así llegar a comprender cómo un efecto (o varios) se produce regularmente siempre que los elementos interactúen de una manera determinada. La palabra mecanismo se asocia a algo producido de modo automático, e incluso podríamos decir que necesario. Un mecanismo recuerda el funcionamiento de una máquina, un artilugio en que todas las piezas encajan perfectamente y funciona siempre igual, como un reloj. De hecho, es un término que originalmente se refiere a objetos fabricados por el ser humano, fruto de un diseño previo. En la naturaleza, se habla de explicaciones *mecanicistas* en un sentido similar, y uno se refiere al *mecanicismo* como al exceso de intentar explicarlo todo a partir de meros mecanismos.

La noción de mecanismo, en este sentido, nos puede llevar a una reflexión muy fructífera sobre el concepto de causalidad en la naturaleza. Una formulación lo más neutra posible del principio de causalidad sería la siguiente: todo lo que sucede depende de algo; la *dependencia en la existencia* es lo que se llama causalidad, y designa un tipo

de relación entre los elementos de la realidad. Sin embargo, a la hora de aplicar este principio a la naturaleza física o biológica, no siempre es posible establecer claramente cuál es la causa —o el conjunto de causas— de un suceso concreto: ¿otro suceso, un objeto determinado, parte de un proceso...? A lo largo de la historia del pensamiento humano ha habido muchos intentos de identificar lo específico de la causalidad, algunos más acertados y otros menos. En concreto, a lo largo de los siglos XVI y XVII se desarrolló una manera de entender la causalidad —vigente en buena parte de los pensadores actuales— que concluyó por adoptar un sentido de causa que cabría entender más bien como una razón explicativa; es decir, si la existencia de Y se explica por la presencia previa de X, entonces X es la razón de Y. Estas razones pueden ser necesarias: es decir, la existencia de Y sólo se explica si hay una presencia anterior de X; o suficientes, cuando basta con la sola presencia anterior de X para que Y exista, aunque Y podría existir con la presencia de Z y en ausencia de X. En la práctica, este modo de entender la causalidad ha triunfado sobre visiones alternativas.

La discusión actual, sin embargo, trata de recuperar estas visiones alternativas, afinando su explicación. El principal problema es que la causa entendida como razón explicativa es muy limitada: por ejemplo, la noción de causa-razón —tal y como la entienden muchos hoy en día— exige prioridad temporal: la presencia de X, como hemos indicado, es previa; sin embargo, cuando X e Y son simultáneos, podríamos afirmar con igual seguridad que X es razón de Y como que Y es razón de X, y en ambas afirmaciones estaríamos usando exactamente el mismo sentido de razón. Para evitar este escollo, cabría decir que la causalidad estricta exige que haya un orden entre ambos, que podemos llamar *dependencia*: Y depende de X para existir. Este orden puede implicar temporalidad —X se da antes que Y— o no. Si no fuese temporal, por ejemplo, cuando X e Y son simultáneos, podríamos decir que Y depende de X de un modo, y X de Y de otro. La dependencia es imposible de observar por medios científicos, ya que se trata de una relación que no es ni una estructura, ni un proceso, ni un resultado. Dicho de otro modo, cuando afirmamos que X es la causa de Y, no podemos aportar ninguna evidencia directa de la causalidad. Esto no quiere decir que sea falso: simplemente, que lo que se conoce no es cuantificable.

Este *excursus* filosófico permite entender que la investigación científica que se centra en descubrir aquello (una *estructura*, un *proceso*, un *resultado*) que explica la existencia de otra cosa (otra estructura, otro proceso, otro resultado), llegando incluso a niveles infinitesimales, oscila entre el descubrimiento de la causalidad real y de las razones; en este sentido, cuando hablamos de las causas de un fenómeno tal y como las explica la ciencia, podríamos usar con mucha frecuencia el término razón. En esta búsqueda de razones, lo más cercano a dar con la causalidad en sentido propio sería encontrar *razones necesarias y suficientes*: es decir, X tiene que darse, —y basta con que se dé— para que suceda Y. De estas razones necesarias y suficientes algunas serán en realidad causas, y, en este sentido, habremos alcanzado un conocimiento definitivo; otras, sin embargo, no pasarán de ser razones y, por eso mismo, son provisionales hasta que se encuentre una explicación mejor. Sin embargo, hay dos motivos que hacen muy difícil encontrar

razones necesarias y suficientes que satisfagan el ansia de conocimiento —es decir, que podamos afirmar que realmente son causas.

En primer lugar, los eventos naturales son el resultado de la intervención de muchos elementos: es decir, hay una multitud de causas que cooperan para cada suceso y, al mismo tiempo, podemos ofrecer muchas razones que lo explican; de hecho, podemos dar prácticamente una infinitud de razones. Lo ideal sería poder centrarse únicamente en los fenómenos X e Y manteniendo todos los demás elementos al margen para poder determinar cómo influyen exactamente las variaciones del primero sobre las variaciones del segundo; pero es evidente que esto no siempre es posible, ni siquiera en el laboratorio. En general, X podría alterar también otros factores que, a su vez, acaben influyendo en Y. O bien puede ocurrir que otros factores que desconocemos, independientes de X, también sean necesarios para que se dé Y, con lo que X no será nunca la razón necesaria y suficiente de Y.

En segundo lugar, el comportamiento de algunos fenómenos microscópicos complica la comprensión de sus razones suficientes, como sucede con la determinación de las magnitudes físicas en mecánica cuántica: ¿qué o quién determina exacta y suficientemente la posición del electrón que se mueve en torno al núcleo del átomo de hidrógeno? No lo sabemos y solo podemos dar una estimación de la probabilidad de que se encuentre en determinada región del espacio a partir de su función de onda. Comprender exactamente cómo se determinan los eventos naturales, qué factores influyen y la dependencia que tienen las diferentes entidades entre sí es una tarea tremadamente compleja, y crea muchos problemas a la hora de establecer los fundamentos de la ciencia y la filosofía.

2. ¿FORMA O FUNCIÓN?

Otro de los términos que hemos empleado con frecuencia es el de *función*. En general, este vocablo es más abstracto que mecanismo, designa algo más amplio y —por tanto— más difícil de precisar. La función de algo es aquello *por lo que* existe, aquello *para lo que sirve*: es un sentido muy cercano al del motivo por el que algo es así y no de otro modo. Obviamente, al usar el término “función” no pretendemos caer en ningún tipo de antropomorfismo: en la realidad natural no hay motivos como los hay en las acciones de los seres humanos. Si adoptamos el término “función” es para evitar el error de explicar todo como meros mecanismos: el estudio de un sistema permite observar que cada parte de ese todo, junto a los mecanismos en los que participa, *cumple* una función; es decir, las partes de un sistema están ahí por algo, sirven para algo, tienen un objetivo, una cierta *finalidad* dentro del todo que constituye ese sistema.

Esta idea de que solo hablamos de funciones cuando las atribuimos a *un todo* es muy interesante. De hecho, es bastante curioso que habitualmente atribuimos funciones a lo vivo pero no a lo inerte: no decimos, por ejemplo, que la *función* de un volcán es echar lava sobre la tierra o hacer surgir un atolón de coral, o que la *función* de las placas continentales es crear cordilleras montañosas cuando chocan entre sí, o que la *función*

del fenómeno de El Niño es causar intensas lluvias en la costa pacífica de América del Sur con cierta periodicidad. En estos casos, describimos procesos de un modo similar a como lo hacemos con los mecanismos, señalando unos efectos que son el resultado de causas que conocemos con mayor o menor precisión, pero no pensamos que tengan un objetivo o una finalidad, que sean así precisamente en orden a algo mayor, que existan *para eso*. La razón de no hablar de funciones en estos casos es porque no estamos considerando esos procesos como partes de un sistema mayor; pero si cambiamos de perspectiva y nos centramos, por ejemplo, en los ciclos globales que regulan la dinámica de la biosfera, entonces sí tendría sentido hablar de la *función* que tiene la erupción de un volcán o el fenómeno de El Niño dentro de ese gran todo sistémico.

Dicho lo anterior, podemos repasar cómo tratan este tema los autores que han reflexionado sobre la naturaleza. Para algunos, la función no es otra cosa que el papel explicativo que juega una parte en el funcionamiento global de un sistema, entendiendo ese papel de modo muy mecánico: esta manera de explicarla es lo que se conoce como la definición *sistémica* de función. La ventaja de definir “función” de este modo es que resulta relativamente fácil describir cualquier función, ya que en última instancia sólo necesitamos conocer los mecanismos mediante los cuales una parte opera dentro de un sistema. Con esto se evitan algunas de las dificultades que muchas veces encontramos para saber cuál es la verdadera función de una estructura, como veremos más adelante. Pero también tiene sus inconvenientes, porque si perdemos de vista el todo, el sistema al que pertenecen esas partes, podemos terminar atribuyendo funciones a procesos que, considerados aisladamente, parecen no tenerla: un volcán *no tiene la función* de escupir lava, o un meteorito que cae sobre la tierra *no tiene la función* de generar un cráter. Escupir lava o generar un cráter son los efectos que resultan de un proceso concreto, pero para entender qué función tienen (si tienen alguna) hemos de considerar el sistema completo del que forman parte. En este sentido, no deja de ser notable que la física y la química hayan abandonado el lenguaje “funcional” para sus procesos, que pueden ser descritos en forma de mecanismos sin necesidad de acudir a explicaciones más profundas; resulta difícil hacer referencia al *todo*, a la gran realidad sistémica que supone el universo.

Por el contrario, el lenguaje biológico recurre constantemente a explicaciones funcionales para describir los sistemas vivos, ya que es más fácil (casi intuitivo) identificar cada organismo individual como un todo en el que cada parte cumple una función ordenada a la pervivencia de ese sistema. Algunos autores piensan que el lenguaje funcional, sobre todo en biología, se debe al modo concreto (y limitado) de conocer y describir la realidad que tenemos los humanos, que podría no ser capaz de captar la riqueza de lo vivo sin acudir a metáforas sobre el diseño y el propósito; pero también podría suceder que lo vivo posea *un modo de ser* especial, que reclame el concepto de función como algo real e independiente de la mente humana.

Al reflexionar sobre la noción de función, se ha debatido mucho sobre la conexión tan estrecha que hay entre una función concreta y la configuración de las estructuras u órganos que la llevan a cabo, es decir, la relación entre forma y función. “La función

“crea el órgano” es una frase con la que habitualmente se resume la visión de la evolución que proponía Lamarck a principios del siglo XIX. El corazón bombea sangre porque *esa es su función*, está perfectamente *diseñado* para hacer precisamente eso. La mano humana tiene una forma muy adecuada para agarrar objetos y llevar a cabo tareas que requieren cierta precisión. Lo mismo podría decirse del timpano, o de la retina: son así, tienen esa forma, porque sólo así pueden llevar a cabo correctamente la función que desempeñan. Según Lamarck, lo primero que se daría es una necesidad que exige una función determinada (bombear sangre, detectar las ondas sonoras o los fotones de la luz solar); en consecuencia, se desarrollaron los órganos con la forma más apropiada para ello. Esta manera de pensar está bastante extendida, ya que es totalmente connatural al modo de pensar y proceder del ser humano: fabricamos y diseñamos objetos precisamente como respuesta a una necesidad previa; lógicamente, la tentación de describir los sistemas naturales del mismo modo es casi irresistible.

Pero antes de decantarnos por esta explicación, vamos a considerar por un momento que las cosas podrían ser exactamente al revés. Quizás inicialmente existían órganos o estructuras que tenían —entre otras— la *potencialidad* de bombear sangre, o de detectar las ondas sonoras o los fotones, y fueron esas precisamente —algunas de ellas, al menos— las estructuras que poco a poco se modificaron a lo largo de la evolución hasta adaptarse cada vez mejor a realizar esa función específica. Por eso hay autores que prefieren pensar que una función es, en realidad, una *disposición* a actuar de un modo específico dependiendo del contexto concreto. Un órgano, una estructura determinada, podría realizar diversas funciones con una causalidad más o menos abierta; es decir, la forma del órgano no determina completamente la función que puede realizar aunque pueda tener una disposición preferencial respecto de algunas funciones concretas. En último término, será el contexto lo que determine cuál de ellas es la que finalmente terminará realizando. Esto quiere decir que un mismo órgano puede realizar diversas funciones con el paso del tiempo, y que su función ahora no es la misma que cumplió hace millones de años. Quizás uno de los ejemplos más citados a este respecto sean las *alas* de los pingüinos. Los pingüinos son aves, a pesar de que no vuelan sino que caminan sobre dos patas y nadan con gran agilidad impulsándose con lo que parecen ser sus aletas pectorales. ¿Podemos decir que sus extremidades anteriores son alas si no se utilizan para volar, sino para nadar? Su función, de hecho, es impulsarse bajo el agua (o incluso a veces sobre sólidos, cuando se deslizan por el hielo), pero *nunca* volar.

Esta última reflexión nos lleva de la mano a considerar una nueva definición de función, quizás una de las preferidas actualmente por muchos autores del campo de la biología: la definición *etiológica*. En este sentido, la función de cualquier estructura es aquello para lo que la evolución la ha seleccionado; la “razón” evolutiva de que esa estructura tenga esa forma. La definición etiológica se puede formular así: cuando digo que “la función de A es F” lo que quiero decir es que F es el resultado de la selección natural actuando sobre A para que A llegase a realizar F. Esto implica varias cosas; por un lado, que la función de un órgano puede cambiar, como efectivamente comprobamos que sucede. La función de las plumas que cubren el ala de una urraca, hoy en día, es

hacer posible el vuelo, mientras que en los dinosaurios no voladores —de los que proviene la urraca— la función era el aislamiento térmico. Y la función del ala en un pingüino, hoy en día, no es volar sino nadar. Las peculiares presiones selectivas a las que se han visto sometidas las poblaciones de pingüinos en los últimos millones de años han provocado este cambio de función en un órgano que previamente se había adaptado a realizar otras funciones.

Como suele suceder, cuando profundizamos un poco vemos que realmente hay un problema interesante donde parecía que todo estaba bastante claro. Por un lado, los humanos siempre hemos asignado funciones a los órganos, hasta el punto de que parecería lógico pensar que hay algo *real* en una determinada estructura que hace que tenga un efecto propio, y que ésa sea por tanto su función. La observación de multitud de aves que vuelan gracias a diversas variantes estructurales de un mismo órgano, el ala, podría llevar a la conclusión de que la función del ala, considerada en abstracto, sea volar. Pero muchas veces este razonamiento puede resultar demasiado simple, porque una hipotética población de humanos que habitase la Antártida y a lo largo de su vida no hubiesen visto ningún ave, exceptuando los pingüinos, llegarían a la conclusión natural de que la función del ala es nadar. El meollo está en que las alas abstractas no existen, existe el ala de este o aquel animal concreto, animal que es un *todo* en el cual esta parte concreta tendrá una función específica; pero un todo en evolución que echa mano de las estructuras que posee y las modifica en función del contexto ecológico y así maximiza sus probabilidades de supervivencia. Aquí es donde los condicionantes de tipo histórico ayudan a explicar cómo una estructura ha llegado a desempeñar una función concreta, dentro de un marco evolutivo. En el fondo, para entender en profundidad la función de algo es necesario conocer cómo se ha ido modificando y qué otras funciones ha desempeñado a lo largo del tiempo. Si nos fijamos en la acción reciente de la selección natural sobre los pingüinos, concluiremos que sus extremidades superiores cumplen la función de aletas. En cambio, decimos que son alas modificadas para nadar porque sabemos que los pingüinos son aves, no peces; toda la estructura y fisiología de estos animales, avalada por sus relaciones evolutivas, los sitúan dentro del grupo de las aves. Por tanto, las supuestas aletas son en realidad alas que tienen una función distinta de la que uno esperaría. Esto muestra que la historia “profunda”, el estudio de las homologías y de las relaciones filogenéticas más antiguas, es de extraordinaria importancia a la hora de definir la función de una estructura en un ser vivo y comprender cómo llegó a fijarse.

La visión de los seres vivos que hemos expuesto a lo largo de este libro, es decir, como sistemas de desarrollo basados en redes genéticas que evolucionan mediante el recableado de dichas redes, tiene el potencial de reconciliar muchas de las aparentes contradicciones señaladas en lo que llevamos dicho en este capítulo. En definitiva, el punto crucial para explicar la pervivencia de lo vivo es su *evolucionabilidad*, esa extraordinaria capacidad de innovar y reinventarse, al mismo tiempo que se mantiene la estabilidad básica de aquellas estructuras y funciones que han sido especialmente útiles a lo largo del tiempo. Pero el punto de partida de esta innovación es la posibilidad de elegir una opción de entre varias, lo cual conduce a la pregunta sobre el origen de la

variación: ¿de dónde *salen* todas las variantes sobre las que opera la selección natural? ¿Cómo se generan? Este problema ya turbó a Darwin, puesto que con los conocimientos de su época era imposible dar una respuesta cabal a esta pregunta. Tiempo después, como hemos visto en capítulos anteriores, la síntesis evolutiva de mediados del siglo XX puso gran énfasis en la acción de la selección y la aparición de variantes genéticas mediante “mutaciones al azar”, pero esto no explicaba de manera convincente la evolución de nuevas formas anatómicas y la consiguiente aparición de nuevas funciones. ¿Cómo puede evolucionar una estructura para realizar una función que todavía no se puede ejecutar porque no existe la estructura que pueda ejecutarla? Como hemos señalado al tratar de la perspectiva Evo-Devo, considerar el proceso evolutivo como el resultado de cambios en la regulación de las redes genéticas que controlan los procesos de desarrollo hace que muchas de estas dificultades se disuelvan. Desde esa perspectiva, el problema sobre la primacía de la forma o la función es tan sólo aparente, ya que el conjunto de formas posibles (que conocemos gracias a la biología del desarrollo) nos indica qué funciones podrá llevar a cabo un órgano; a su vez, la eficacia con la que ese órgano realice determinadas funciones establecerá, mediante selección natural, su éxito evolutivo y dictará cuáles variantes serán las que finalmente prevalezcan. Por eso, no podemos entender correctamente la función que hoy en día desempeña un órgano o una estructura, en esta especie concreta y en este contexto ecológico particular, sin atender a las funciones que ha desempeñado a lo largo de su historia evolutiva; funciones que, a su vez, habrán variado dependiendo de las diferentes configuraciones morfológicas (formas) por las que haya atravesado.

3. DIRECCIÓN Y ORDEN

Hemos mencionado más arriba que toda la discusión sobre el concepto de función, especialmente en los sistemas vivos, podría simplemente reflejar el modo limitado de conocer y describir la realidad que tenemos los humanos. Decíamos que algunos filósofos de la naturaleza piensan que quizás no haya nada real en los sistemas naturales vivos que justifique hablar de funciones, y simplemente lo que sucede es que el conocimiento humano —al intentar entender la realidad, como estamos haciendo nosotros— necesita dotar de sentido, motivación o propósito a organismos y estructuras que parecen estar diseñadas para llevar a cabo unas operaciones muy específicas. La cuestión, evidentemente, es central a todo lo que estamos discutiendo en estas páginas, y se puede aplicar también a otras nociones que habitualmente están implícitas cuando hablamos de lo vivo, como son las de direccionalidad y orden.

Al describir la evolución de lo vivo, desde las primeras formas de vida hasta las que contemplamos hoy en día en nuestra biosfera, es casi imposible evitar hablar de *direccionalidad*. Incluso autores que niegan tajantemente la existencia de ningún tipo de dirección en la evolución recurren a metáforas como la subida a una montaña, en la que —por improbable que parezca— pequeños pasos acumulados durante millones de años, siempre hacia arriba, llevan finalmente hasta la cima. Pero ¿por qué siempre hacia

arriba? ¿Qué determina la *dirección* ascendente, sin la cual no se coronará la cumbre? O, más fundamental todavía, ¿por qué hablamos de *cima*? De hecho, un mero análisis histórico de lo sucedido muestra que todo el universo, no solo los sistemas vivos, se mueve desde unos estados iniciales hacia otros estados “de llegada”, lo cual crea una evidente sensación de direccionalidad. Es pacíficamente aceptado que el universo se expande y que ha generado partículas diversas, átomos, galaxias, estrellas, planetas. Lo vivo, a partir de un humilde comienzo unicelular, no ha cesado de generar formas cada vez más hermosas y maravillosas, como decía Darwin. Parece que la tendencia al aumento de tamaño y, especialmente, hacia una creciente complejidad, son una constante del mundo físico, químico y biológico.

Pero esta *tendencia* podría ser en cierto modo engañosa. Siempre que hay cambio, hay una situación de partida y una situación a la que se va llegando a través de pasos intermedios, lo que crea una impresión de direccionalidad. Esto es algo inevitable en el mundo físico: si se parte de unos estados iniciales y de un espacio de posibilidades con unas condiciones de contorno específicas, necesariamente los estados del sistema irán alcanzado algunas de esas posibilidades. Como señalábamos al hablar del cambio, nuestro universo no es estático sino que está pasando constantemente de unos estados a otros; está en movimiento, realiza posibilidades que no se habían dado previamente. Una estrella se mueve dentro de su galaxia, en lo que parece ser una cierta *dirección*. Sin embargo, todo lo que se mueve de un lugar a otro *debe* seguir una dirección; lo que no es evidente es que la direccionalidad sea una característica real constitutiva de la naturaleza. Esto se ve más claramente en lo vivo: si inicialmente sólo hay, por ejemplo, organismos unicelulares de pequeño tamaño, lo lógico es que los nuevos organismos que vayan apareciendo con el tiempo tengan mayores tamaños y estén formados por más células. Es la única dirección en la que se puede avanzar, porque no es posible pensar en organismos formados por cero células... Esto crea una apariencia de “tendencia” al aumento de complejidad, pero en realidad podría ser el resultado de cómo está constituida la naturaleza y los sistemas que la forman. Desde luego, también habría que explicar por qué hay un espacio de posibilidades concreto, por qué existe un lugar al que la estrella puede moverse, por qué está en movimiento y por qué las reglas que definen su movimiento son esas y no otras. En el caso de los sistemas vivos, esto equivale a explicar por qué el espacio de posibles formas y tamaños que pueden adoptar es ése, por qué existen unos estados iniciales concretos y cuáles son las reglas que dictan sus cambios, por qué esas reglas y no otras...

Estas son precisamente algunas de las preguntas que estamos intentando responder a lo largo de este libro, a la luz de los datos más actuales de la ciencia. Hemos visto cómo la nueva síntesis evolutiva incluye el estudio de los procesos de desarrollo de los sistemas vivos para explicar los límites y las restricciones del espacio de posibles formas sobre los que opera la selección natural adaptativa. Hemos hablado del principio inmanente que rige el cambio, la *evolucionabilidad*, y algunas de sus consecuencias fundamentales como la plasticidad y la robustez. Pero esto nos ha ayudado a entender, además, que no todas las regiones del espacio de posibilidades terminarán por ocuparse

necesariamente, que siempre habrá algunas regiones a las que se llegue más fácilmente y otras que se ocupen solo en raras ocasiones o incluso nunca. Los físicos denominan esta propiedad *no-ergodicidad*, porque en matemáticas un sistema dinámico ergódico es aquél en el que todos sus posibles estados se verifican con igual probabilidad. Como hemos visto, la no-ergodicidad afecta a todos los procesos del universo y crea una sensación de finalidad que permea toda la naturaleza. Así, volvemos a plantearnos la pregunta de antes: ¿es esto mero constructivismo de nuestro modo de conocer la realidad, o responde a una existencia *real* de lo físico? Si una taza de café caliente se enfriá siguiendo los principios de la termodinámica, ¿podemos hablar de direcciónalidad en ese proceso? Cuando de entre los muchos cambios posibles en el viviente se acaba haciendo realidad solo uno de ellos, ¿estamos ante una auténtica finalidad? Al considerar la creciente complejidad de las formas de vida que han existido a lo largo de la historia natural de la Tierra, ¿estamos ante algún tipo de orden o jerarquía *reales*?

La pregunta que en el fondo nos estamos haciendo es si nos hallamos ante una tendencia real de la naturaleza o ante una mera fluctuación estadística, de entre las muchas posibilidades que terminarían por realizarse en el universo. La física también se enfrenta, en cierto sentido, a esta pregunta, dada la bajísima entropía inicial con la que da comienzo el universo según la teoría del *Big Bang* y la relevancia de este hecho para definir dos cuestiones: la flecha del tiempo (que el futuro sea distinto del pasado) y la misma formación de estructuras individuales que se van enlazando entre sí para dar lugar a sistemas cada vez más complejos. En esta tesitura, las explicaciones sobre el origen mismo del universo que aluden a la existencia de un “multiverso” pretenden hacer plausible la respuesta de la mera fluctuación. Por un lado, para la mayoría de las teorías del multiverso, nuestro universo solo sería uno de los muchísimos universos posibles. Vivimos en él y podemos estudiarlo porque es el único en el que resulta posible que emerja la vida y el ser humano (recordemos el problema del ajuste fino de las constantes físicas universales al que aludíamos en el capítulo 2). Este tipo de razonamiento conduce al denominado “principio antrópico”, que hace depender la existencia particular del universo que percibimos de su capacidad para generar seres como nosotros. Esta hipótesis es ciertamente sugerente, pero tomada sencillamente así adolece de una fuerte circularidad: lo que como científicos deseamos explicar es precisamente el hecho de que puedan aparecer la vida y el hombre sin hacer referencia a ellos en la explicación.

Por otro lado, la mayor parte de las teorías del multiverso diluyen en una numerosísima población de universos la relevancia estadística de la complejidad que percibimos en nuestro universo. La explicación de este hecho es que nos encontraríamos simplemente en una zona del multiverso en la que daría la impresión de que existe una tendencia hacia una complejidad creciente, como si estuviéramos subidos sobre un gigantesco péndulo cósmico que aún no ha alcanzado su lugar más alto, pero que en algún momento tendrá que volver, bajando, hacia su posición inicial. En ese sentido, la vida sería algo puramente anecdótico dentro de la *big picture*. Sin embargo, estas explicaciones parecen hoy día muy insuficientes: en primer lugar, porque resulta demasiado arbitrario desde el punto de vista científico decir que cualquier universo

puede existir, con todas las características (razonables o extrañas) que le queramos añadir: junto a la evidente dificultad para una posible constatación empírica de la existencia de otros universos (paralelos o anteriores al nuestro), el razonamiento final supondría más o menos decir que la vida existe en la Tierra porque nos ha tocado —momentáneamente— la lotería.

Pero, además, existen argumentos fuertes en favor de una finalidad, direccionalidad y jerarquía *intrínsecas* y *reales* en el universo, que los partidarios de la segunda respuesta —la mera fluctuación— deberían explicar, correspondiendo a ellos la carga de la prueba. Como señala Roger Penrose, la emergencia de la vida en la Tierra sería incomparablemente más sencilla y barata —termodinámicamente hablando— si hubiese surgido directamente de la colisión aleatoria de las partículas y radiación que componen el sistema solar. Dicha fluctuación sería enormemente más probable que aquella en la que supuestamente nos encontramos, donde la vida en la Tierra y las estructuras del universo evolucionan a partir de la bajísima entropía del *Big Bang*. Dicho de otro modo, si recurrimos a la mera estadística (como hacen quienes consideran que estamos simplemente dentro de una gigantesca fluctuación en el multiverso) la vida debería haber surgido sin necesidad de evolución cósmica. Pero precisamente sabemos que esto no es así. Lo que necesita una explicación es el hecho de que haya evolución en el universo, algo que es posible porque el mismo universo se encuentra enormemente lejos de su situación de equilibrio. Una versión derivada de este argumento proviene de la denominada “paradoja del cerebro de Boltzmann”: la organización que vemos en el universo es tremadamente mayor de la que es requerida para explicar la existencia de cerebros y de conciencia y, por lo tanto, es altamente improbable que estos últimos sean el resultado de una mera fluctuación estadística en el universo.

Parece por tanto razonable hablar de una *finalidad inmanente* de los sistemas naturales, especialmente en el caso de los vivientes, en el sentido apuntado más arriba: la *tendencia* a aumentar en tamaño, a generar estructuras cada vez más complejas, a realizar funciones más sofisticadas. La actividad de los seres vivos parece estar marcada por la *orientación hacia una meta*: el cigoto se desarrolla hasta generar un individuo adulto, las mariposas monarca migran para pasar el invierno en México o las tortugas acuden cada año a determinada playa a enterrar sus huevos. No hay problema en utilizar este lenguaje en biología. El problema es que, llegados a este punto, no es nada fácil evitar la tentación de traspasar el umbral hacia una finalidad extrínseca en la que la dirección del cambio vendría dictada no por los principios internos que constituyen la realidad natural, sino por una inteligencia o una agencia exterior que la guía hacia un fin. Esa finalidad extrínseca se denomina *teleología*, es decir, una *razón* que guía hacia un fin. Pero traspasar ese umbral conduce a uno de los más graves errores acerca de la naturaleza en los que se puede caer, porque la tendencia a describir los sistemas naturales como teleológicos no tiene realmente una fundamentación sólida. Para evitar este problema, algunos autores han recurrido a otros términos para describir la finalidad inmanente que vemos en la naturaleza. Uno de los más usados es *teleonomía*, que significa precisamente “el gobierno mediante fines” y designa esa cualidad de actuar

orientándose hacia un fin concreto. Ernest Mayr incluso propuso la distinción entre procesos *teleonómicos* y procesos *teleomáticos*. Los primeros serían aquellos procesos naturales que se desarrollan según un programa, como la selección natural o el crecimiento del cigoto hasta dar lugar al individuo adulto, y son característicos de lo vivo. Los procesos teleomáticos, en cambio, serían el resultado de las leyes de la física, como la gravedad o la termodinámica: la piedra que cae o la taza de café que se enfriá no son realmente procesos orientados hacia una meta, sino que responden a leyes o principios de la física. No obstante, también se podrían interpretar mediante un principio de orientación a un fin, como el de minimizar la energía o maximizar la entropía del sistema junto al ambiente. No olvidemos que incluso las ecuaciones de la física de Newton pueden obtenerse a partir del principio de mínima acción —una combinación *sui generis* de las energías cinética y potencial— que acaba seleccionando la trayectoria física que el sistema debe seguir.

Otra noción recurrente al describir los sistemas naturales, sobre la que podrían hacerse consideraciones semejantes, es la de *orden*. Esta es una noción que ha de entenderse bien: podríamos definirla como la relación entre el todo y las partes que lo forman. Obviamente, cuando consideramos un elemento de la naturaleza ya “acabado”, esta relación es patente: la naturaleza modular con distintos niveles de integración de los sistemas vivos, su dinamismo propio que culmina en la evolución de estructuras complejas con funciones muy bien adaptadas a sus necesidades ecológicas, es lo que permite descubrir cierto orden en la naturaleza; en esta línea podrían ofrecerse abundantes ejemplos, pero no es necesario aburrir al lector. Que la naturaleza esté ordenada en este sentido es, además, muy coherente: un sistema constituido por partes funcionando orgánicamente, en buena lógica, ha de estar ordenado, ya que la alternativa sería una relación totalmente aleatoria entre las partes y, en última instancia, la imposibilidad de cumplir función alguna. En no pocas ocasiones el hombre ha creído que este orden depende de algún tipo de diseño previo; una posible explicación de este error podría ser que el ser humano conoce y actúa en muchas ocasiones guiándose por diseños previos. Así, tendemos a confundir el diseño y orden en la naturaleza con los que tiene un arquitecto en su imaginación —y en sus planos— antes de comenzar la construcción del edificio. Esto es una proyección más bien burda: no parece que haga falta ningún gran arquitecto de la naturaleza para que ésta esté ordenada. Ya hemos visto los principios que dictan cómo se constituyen y mantienen estos sistemas, sin necesidad de recurrir a ningún agente extrínseco que explique sus características; las partes existen por la función que cumplen en el sistema, dependiendo de las restricciones impuestas por los estados previos que ha atravesado el sistema hasta el momento actual. En este sentido, el orden y el diseño son partes integrantes de la naturaleza: son dinámicos, cambiantes y, si han de llegar a algún destino, ese destino no siempre está *escrito*, totalmente determinado, en un estadio anterior, ni intrínseco ni extrínseco.

Al mismo tiempo, no podemos olvidar que estamos inmersos en el dinamismo natural: nuestra inteligencia nos permite considerar todos los procesos que se dan en la realidad como si fuesen algo definitivo; sin embargo, sabemos que esto no es así. No poseemos

una imagen completa, en su totalidad, de una naturaleza que cambia continuamente, aunque sí podemos conocer bastante bien algunos aspectos de este cambio continuo. Y uno de los aspectos que nos parece más importante es que se trata de un cambio ordenado: la naturaleza, tal y como la estamos entendiendo en estas páginas, forma un todo que, en cierto sentido, está en proceso. Precisamente la relación de este todo con las partes que lo conforman —elementos, procesos, funciones— es lo que hemos llamado orden: dada nuestra situación, sólo podemos considerar este orden comenzando desde las partes; en este sentido, la comprensión total del orden de la naturaleza se nos escapa: sólo si fuésemos capaces de ver dónde termina el proceso en el que estamos inmersos podríamos describir fielmente la relación entre el todo y las partes.

4. A MODO DE RESUMEN

La finalidad y el orden inmanentes que descubrimos al observar la realidad que nos rodea están en la naturaleza misma: no se trata de una proyección, ni vienen impuestos por ningún tipo de agente externo. Es decir, hay una finalidad y un orden que se corresponden con los procesos propios de la naturaleza. Esta es una afirmación que resulta difícil de aceptar para muchas personas, ya sea porque tienden a pensar que todo orden es una especie de imposición del hombre, ya sea porque consideren que la naturaleza necesita un plan previo, determinado por algún diseñador externo. En última instancia, ambos errores se deben a lo mismo: una reflexión insuficiente —y no pocas veces dificultada por algunos prejuicios— sobre cómo está configurada y estructurada la naturaleza. Cuando se lleva a cabo dicha reflexión, tal y como intentamos hacer en este libro, se pueden intuir los principios internos fundamentales que rigen y explican el orden y la finalidad.

En el mundo de la física, las leyes y principios por los que se rige conducen a la configuración de sistemas que se comportan de acuerdo con unas reglas que podemos intentar estudiar y describir. Aunque el comportamiento de algunos sistemas no-lineales y caóticos todavía se nos escapa, y los fenómenos del mundo cuántico resultan ciertamente difíciles de describir, los principios internos que rigen los sistemas inertes dan lugar a direccionalidad y orden. En el caso de los sistemas naturales vivos, vemos una necesidad interna de orientarse a la supervivencia, de asegurar que la vida seguirá adelante. Esto se consigue mediante la reproducción y la generación de variaciones que permiten la selección de formas y funciones adaptadas a un entorno cambiante. Evolucionabilidad y creatividad se hacen realidad mediante una sucesión de contingencias confinadas a lo biológicamente posible. Evolución y adaptación, dentro de los límites y posibilidades impuestos por los procesos de desarrollo, serían por tanto las propiedades fundamentales y fundantes de lo vivo. Si alguien nos pregunta cuál es la *finalidad* de los vivientes, podemos responder sin ambages: en un contexto ecológico siempre cambiante, la finalidad es sobrevivir, que la vida se perpetúe diversificándose. La evolucionabilidad se convierte así en el principio unificador de la Biología, desde el

nivel genético (informacional) hasta el ecológico. Esto es lo que explica ese carácter peculiar de “motor de búsqueda” que tiene lo vivo.

VI. CREATIVIDAD

1. LEYES

Una de las cuestiones que han estado presentes de forma recurrente a lo largo de nuestra reflexión es si podemos albergar la esperanza de llegar algún día a describir la naturaleza, con todas sus estructuras y procesos, mediante leyes precisas formuladas con el lenguaje de la matemática. Dado que la realidad material está configurada a base de sistemas complejos con un comportamiento no-lineal y caótico, esto parece difícil, y todavía más al intentar formalizar algunos procesos que tienen lugar a nivel cuántico. Pero hemos visto también que hay una cierta jerarquía y distintos niveles dentro de los sistemas naturales, por lo que podría ser que las descripciones deterministas sean válidas para algunos niveles y no para otros.

Por ejemplo, la dinámica propia de los procesos de la física y de la química parece claramente distinta a la de los sistemas vivos. En el caso de estos últimos, podemos preguntarnos si para alcanzar una descripción completa de una célula, y predecir su comportamiento, bastaría con conocer todas las moléculas y átomos que la forman y todas las interacciones que se dan entre ellos de manera dinámica. Al margen de que alguna vez lleguemos a contar con las herramientas que permitan generar tal descripción (posibilidad que ahora mismo parece lejana), la pregunta es muy importante: *¿es una célula sólo una colección de moléculas y sus interacciones, o hay algo más?*

La misma cuestión surge al considerar los sistemas físicos o químicos, y en estos niveles es más fácil concebir que se pueda llegar a una descripción completa mediante leyes y formulaciones matemáticas. Se cita siempre a Newton como el primero que hizo pensar que esto sería posible; otros —como Laplace— creyeron haberlo logrado a finales del siglo XIX. Según ellos, la naturaleza obedece a leyes precisas que explican completamente su comportamiento, al menos en sus niveles más elementales. Un ejemplo simple de esta mentalidad mecanicista sería el de una mesa de billar, con un número concreto de bolas que tienen propiedades cuantificables. Partiendo de unas condiciones iniciales (la posición de cada bola) y de unas condiciones de contorno (las dimensiones de la mesa) parece claro que podemos elaborar leyes precisas que describan el movimiento de las bolas, conociendo su masa, el rozamiento con la mesa, sus

trayectorias y las fuerzas con que han sido impulsadas. Con todos estos datos, podemos elaborar ecuaciones diferenciales e integrarlas con el objeto de predecir con gran exactitud qué va a suceder con cada bola a medida que vayan chocando unas con otras y con los bordes de la mesa. Si este procedimiento fuese aplicable a la naturaleza en su conjunto, habríamos explicado todo en forma de leyes y fórmulas matemáticas. Sería verdad lo que decía Max Weber cuando se lamentaba de que con Newton hemos *desencantado* el mundo.

Y sin embargo, la esperanza de alcanzar una *teoría del todo* aparece cada vez más lejana incluso en los primeros niveles, los del mundo físico. Ya hemos visto que con la mecánica newtoniana es imposible predecir exactamente el comportamiento de varios cuerpos celestes interaccionando, como sucede con nuestro sistema solar. Además, uno de sus postulados básicos es la reversibilidad de los procesos que describe, lo cual no se cumple en muchos casos: nos hemos referido ya a la flecha del tiempo y a las rupturas de simetría que permean el mundo físico, con la consiguiente direccionalidad que hace posible hablar de una historia. Otra afirmación básica de la mecánica clásica es el determinismo, es decir, que si conocemos las condiciones iniciales de todas las partes de nuestro sistema y las condiciones de contorno, entonces nuestras ecuaciones nos permitirán hacer predicciones precisas sobre su comportamiento futuro, que estaría ya determinado. En este caso, la mecánica cuántica y la teoría del caos han resaltado la enorme dificultad de alcanzar una explicación puramente determinista de todos los procesos naturales. Finalmente, las leyes de la mecánica newtoniana deberían ser universales, aplicables en todas partes del universo, en todo tiempo y a cualquier escala. Pero esto sabemos que no es cierto, como se ha ido demostrando a lo largo del siglo XX.

Por una parte, el modelo conceptual de la teoría de la relatividad permitió entender que el universo no es similar a un gran contenedor estático —como resultaba normal imaginarse hasta finales del siglo XIX— con espacio y tiempo absolutos e infinitos. El universo y sus dimensiones cambian: se expande y se enfriá gracias a los efectos de una energía oscura que aún no sabemos de dónde proviene o cómo se origina. Pero, además, esto implica que ha habido períodos en la historia del universo donde las mismas interacciones fundamentales de la física que conocemos hoy no existían. Es bastante probable que dichas interacciones provengan de un tipo de interacción aún más básica que se ha ido diversificando en los primerísimos instantes de expansión y enfriamiento del cosmos —mediante procesos que los físicos suelen denominar rupturas espontáneas de simetría y que todavía no entendemos bien— hasta dar lugar a las cuatro fuerzas que nos resultan familiares en la actualidad.

Pero, sin duda, el cambio de paradigma de la física clásica ha sido especialmente revolucionario con la aparición de la mecánica cuántica. La nueva física trabaja con dos procedimientos o reglas irreductibles entre sí a la hora de describir los fenómenos físicos y los resultados de los experimentos. De una parte, sigue utilizando la evolución determinista de una magnitud —la función de onda del sistema— mediante la ecuación de Schrödinger. En este sentido, no sería distinta de una especie de ley de Newton generalizada: una especie de nueva fórmula similar a “fuerza igual a masa por

aceleración”, donde las magnitudes que aparecen en la ecuación —fuerza, masa, aceleración— son las que podemos medir directamente en un experimento. Pero por otra parte, y aquí viene lo revolucionario, cambia radicalmente la manera de concebir la conexión de la magnitud central, la función de onda, con la realidad observada. La función de onda no describe ningún aspecto directo de la naturaleza; no es algo que podamos medir directamente (como la fuerza, la masa o la aceleración de la mecánica newtoniana) sino que únicamente permite calcular la probabilidad de que se obtengan determinados resultados al realizar mediciones de magnitudes observables (como la posición o la velocidad de las partículas), que se hallan indeterminados (no tienen un valor concreto) mientras no se realice la medición. Este cálculo de probabilidades a partir de la función de onda es el segundo procedimiento, que no tiene equivalente en la física clásica puramente determinista.

Se podría pensar entonces que la función de onda es simplemente un instrumento matemático que describe nuestra ignorancia de lo que está realmente ocurriendo en el mundo de lo muy pequeño, pues no hace referencia directa a algo tangible. La función de onda parecería estar refiriéndose a las probabilidades previas que asignamos a determinados sucesos de la realidad (y que tan bien conocen las casas de apuestas o los casinos). Pero lo que resulta aún más asombroso es que la función de onda no representa directamente probabilidades, sino una onda de probabilidad, que tiene efectos —reales y medibles— de interferencia, como ocurre con las ondas físicas; piénsese en las ondas de un estanque, que pueden potenciarse o anularse al combinarse entre sí. Estas interferencias nunca ocurren con las probabilidades clásicas. Así, en el célebre experimento de la “doble rendija”, si lanzamos una partícula para que atraviese una pared con dos rendijas, lo lógico sería pensar que la probabilidad de que supere la pared será la suma de la probabilidad de que pase por la primera rendija más la probabilidad de que pase por la segunda. Es decir, si la partícula supera el obstáculo de la pared, lo habrá hecho *o pasando por una rendija o pasando por la otra*. La mecánica cuántica —y los experimentos reales que la confirman— demuestra que esto no es así. Para saber la probabilidad final de superar la pared, hay que tener en cuenta que la función de onda de la partícula (su onda de probabilidad) puede combinar los dos caminos a la vez y producir efectos de interferencia en la probabilidad final. De hecho, lo que se mide en los detectores colocados detrás de la pared con las rendijas es un patrón de interferencias, inexplicable desde el punto de vista de la física clásica.

Por este motivo, debido a que todos los sistemas físicos tienen asociada una función de onda que resulta ser esencialmente un objeto extenso y no separable (no se puede “cortar” en dos), la mecánica cuántica nos sitúa ante una naturaleza que en sus niveles más básicos es no-local: no se pueden separar, excepto en condiciones muy específicas, las partes de un sistema o los sistemas entre sí (en nuestro ejemplo, no se pueden considerar por separado e independientemente las rendijas por las que puede pasar la partícula). Además, la naturaleza es indeterminista, pues los valores de las mediciones no se hallan fijados antes de llevar a cabo los experimentos concretos. De ahí que solo

podamos hablar de probabilidades. Pero no por nuestro desconocimiento, sino porque la naturaleza es así.

Pero donde más claramente se ve la insuficiencia de los modelos deterministas es en biología y especialmente en la dinámica evolutiva. Un filósofo de la talla de Kant ya se dio cuenta de la dificultad, y en su juventud llegó a vaticinar que nunca habría “un Newton para una brizna de hierba”. Para algunos autores, ese Newton de la biología podría haber sido Charles Darwin, el padre de la teoría de la evolución. Precisamente este campo es uno de los mejores ejemplos del intento de *matematizar* lo biológico y formular *leyes*, al igual que se había hecho en la física. Aunque en tiempos de Darwin no existía una teoría que explicase con acierto la transmisión de los caracteres hereditarios, la aparición de la Genética y la formulación matemática en las primeras décadas del siglo XX de los procesos que gobiernan el comportamiento de los genes en las poblaciones llevaron a pensar que el dinamismo de lo vivo podría ser también objeto de leyes y formulaciones matemáticas precisas. Sin embargo, el concepto de *ley* en biología es algo más borroso que en física o química, hasta un punto tal que muchos autores creen que no es acertado hablar de leyes cuando nos referimos a los sistemas vivos, sino más bien de modelos que funcionan bien cuando se dan ciertas condiciones ideales, condiciones que raramente se cumplen. Son conocidas por todos las *leyes* de Mendel, que el famoso monje agustino descubrió cultivando guisantes de formas y colores variados. Pues bien, más que leyes, en realidad se trata de unos *principios o reglas* que se cumplen en ciertos casos, pero no son ni mucho menos universales ni deterministas; los libros de texto de genética suelen incluir un capítulo entero dedicado a las “excepciones” del mendelismo.

Se podría argüir que el ejemplo está escogido a propósito, pero no. En el mismo campo que inicialmente llevó a cierta euforia determinista en biología, la genética de poblaciones que estudia los procesos evolutivos, tenemos otro caso notorio. Una de las primeras leyes matemáticas de la genética describe las fluctuaciones de las distintas formas en que aparecen los genes en las poblaciones de individuos, formas que —como vimos en el capítulo 3— reciben el nombre de *alelos*. La ley se conoce como Ley de Hardy-Weinberg (en honor al matemático estadounidense y al ginecólogo alemán que la descubrieron casi simultáneamente) y viene a decir que las frecuencias de los alelos y de los genotipos (es decir, qué combinación de alelos lleva un individuo para cada gen concreto) se mantienen constantes en una población a lo largo de sucesivas generaciones, *siempre que se cumplan* una serie de condiciones. Los detalles no son ahora del caso, lo importante es que las condiciones son tales que *nunca* se cumplen en las poblaciones naturales, sean humanas, de plantas o de bacterias. La primera condición a satisfacer, sin ir más lejos, es la de un tamaño poblacional infinitamente grande, cosa imposible de conseguir. Las demás condiciones no corren una suerte mejor, por desgracia. En realidad se trata más bien de situaciones *ideales* en las que la supuesta ley funcionaría siempre. Por eso, hoy es frecuente hablar más bien del modelo, principio, teorema o simplemente del equilibrio de Hardy-Weinberg.

Esta es una constante en biología: no hay auténticas leyes, sino modelos que funcionan más o menos bien en ciertas condiciones ideales, basados en abstracciones que raramente se dan en el mundo real. Y esto es así no solo por nuestra incapacidad de medir con precisión todos los elementos del sistema y sus interacciones, sino por algo más profundo que tiene que ver con el dinamismo de los sistemas vivos que hemos descrito en capítulos anteriores. El problema no es que la mesa de billar sea demasiado complicada, con tantas bolas y choques que resulte inconcebible calcular todas las posibles trayectorias. El problema fundamental es que no sabemos ni siquiera cuántas bolas hay, ni dónde están, ni cuál es el contorno de la mesa, porque tanto las bolas como la mesa pueden cambiar en cualquier momento. Y lo más importante, nunca podremos predecir cómo va a ser ese cambio. La misma dinámica evolutiva de los sistemas vivos, caracterizada por esa contingencia de la que hemos hablado en el capítulo anterior —limitada en cuanto a sus posibilidades— es precisamente la que asalta el golpe de muerte al determinismo en biología.

La cuestión de fondo, que se plantea también en la física básica, es que en general no podemos saber a priori cuáles son las variables relevantes —los grados de libertad— para la descripción de un sistema, en especial un sistema vivo. Incluso en los sistemas físicos inertes se dan transiciones de fase de unos regímenes de funcionamiento a otros que no permiten una descripción única y consistente que resulte válida para todas las posibilidades. Piénsese, por ejemplo, en fenómenos como la superconductividad (descubierta por Kamerlingh Onnes en 1911), un estado de la materia en que no hay resistencia alguna al paso de la corriente eléctrica. En los materiales normales, es el movimiento individual de los electrones el que produce la corriente continua, a la que estamos acostumbrados. Cuando los electrones chocan con las impurezas del material, este produce una resistencia al paso de la corriente, una especie de rozamiento interno que hace que tengamos que mantener diferencias de tensión entre dos puntos para que la corriente eléctrica (los electrones) siga fluyendo. Sin embargo, algunos materiales, a temperaturas suficientemente bajas, se comportan de un modo inesperado: los electrones no producen la corriente eléctrica “individualmente” sino en parejas (pares de Cooper), que son capaces de moverse por el material evitando los choques que provocan rozamiento interno y resistencia. Los materiales superconductores son capaces de mantener una corriente eléctrica fluyendo todo el tiempo que queramos sin necesidad de conectarlos a un enchufe. ¿Pero quién iba a imaginarse esto? De hecho, la teoría de la superconductividad tardó más de cuarenta años en desarrollarse después de su descubrimiento experimental.

Igualmente, podemos citar aquí como ejemplo la condensación de Bose-Einstein, otro fenómeno de la materia en el que los átomos del sistema pierden su individualidad para formar una gran y única onda coherente de materia. Todos los átomos del sistema se ponen de acuerdo para que su función de onda oscile al unísono con las demás, de manera que se pierde el rastro de cada átomo y el sistema se comporta como un gran “todo”, con una única función de onda. Al igual que en el fenómeno de la superconductividad, en este caso también existen fenómenos medibles, como el

denominado “efecto Josephson”, en el que el transporte de corriente entre dos materiales separados por una barrera depende exclusivamente de una variable global del sistema: la diferencia de fase entre las funciones de onda de cada material, es decir, la cantidad que mide si los picos y valles de la onda a cada lado de la barrera coinciden o se hayan adelantados o retrasados (desfasados) entre sí. Esta diferencia de fase no se puede obtener simplemente a partir de las propiedades individuales de las componentes básicas de cada material y sus interacciones. El premio nobel Robert Laughlin reconoce —con cierta maldad— que este es uno de los primeros ejercicios que manda a sus mejores estudiantes de física cuántica (muy buenos en los cálculos, pero con poca experiencia sobre los problemas reales de la física contemporánea), para verles fracasar año tras año. Estamos ante auténticos fenómenos holísticos de la naturaleza, que necesitan una descripción diversa.

Algo semejante sucede en prácticamente todas las escalas naturales. Por ejemplo, los que han estudiado la evolución de las sociedades humanas nos dicen que algo similar ocurre con las grandes revoluciones culturales o tecnológicas. En general, se puede afirmar que siempre han sido en cierto modo impredecibles, pues de lo contrario no supondrían una revolución. Nadie podía anticipar los efectos que la domesticación del ganado durante el neolítico tendría sobre las poblaciones humanas (por ejemplo, sobre los genes que regulan la capacidad de digerir la lactosa). La aparición de la máquina de vapor o del motor de combustión tuvieron una serie de consecuencias que, a su vez, abrieron un abanico de posibilidades nuevas que nadie hubiera podido predecir. En nuestra historia más reciente, ninguno de los que estábamos en el planeta en los años setenta del siglo pasado podríamos haber imaginado algo como internet o el concepto mismo de smartphone. Simplemente, resultaba inconcebible, ni siquiera entraba en la lista de posibles adelantos del futuro. Si hubiésemos preguntado a los ingenieros de Google los posibles usos de su aplicación para mapas, nunca habrían podido pensar en algo parecido a Pokémon GO; sin embargo, de algún modo, la creación de Google Maps hizo *possible* un futuro en el que la gente iría por la calle mirando la pantalla de su móvil en busca de seres virtuales.

Stuart Kauffman, en varios artículos y libros sobre el tema, ha expresado esta idea con una metáfora muy acertada y expresiva. Si nos piden que enunciemos los posibles usos de un destornillador, se nos ocurrirán algunos más evidentes, como poner o quitar un tornillo, o abrir una lata de pintura, hasta otros más peregrinos como hacer de cuña para mantener abierta una puerta, o usarlo como dardo y crear un campeonato del mundo de lanzamiento de destornillador. Podríamos ir más lejos y atarle una cuerda para hacer una improvisada caña de pescar, e incluso alquilar la improvisada caña de pescar cobrando el 5% de las capturas. El proceso podría prolongarse hasta el infinito... La idea es que el número de posibles usos de algo tan simple como un destornillador es, por definición, indefinido: no podemos saber a priori cuántos hay. Además, no se pueden ordenar de acuerdo a ningún criterio claro, de forma que pudiésemos intentar deducirlos de manera ordenada: usos para el deporte, usos para la literatura, usos para la ciencia... Simplemente no es posible. Estas dos cosas (que el número de usos no pueda ser

definido de antemano y que no sean ordenables según un criterio) significan algo muy importante: ningún algoritmo puede enunciar todos los posibles usos de un destornillador.

La metáfora cobra especial fuerza cuando nos pasamos al mundo de la biología, porque aquí esto es todavía mucho más claro y con consecuencias muy importantes. El equivalente biológico a los posibles (y muchas veces peregrinos) usos del destornillador es el concepto de preadaptación utilizado ya por el mismo Darwin. Una preadaptación sería un rasgo concreto que con el paso del tiempo es re-utilizado para cumplir una función distinta a la que tenía originalmente. Stephen J. Gould popularizó el término *exaptación* para este tipo de situaciones, ejemplificadas por las plumas. Originalmente, cuando aparecen en los dinosaurios, las plumas tienen una función termo-reguladora, mantener el calor corporal. Pero cuando cambia ligeramente el diseño de su estructura, las plumas pueden servir entonces para la sustentación en el aire, y algunos dinosaurios las emplearon para planear con sus extremidades superiores extendidas y así poder huir de los depredadores con más eficacia. Varios millones de años después, el resultado es el mirlo o las urracas de nuestro parque, o el vuelo majestuoso de las águilas, o el vuelo humilde pero igualmente hermoso de un gorrión. Las plumas de los dinosaurios fueron exaptadas para el vuelo, pero hubiera sido imposible predecirlo cuando aparecieron los primeros plumajes primitivos.

Es difícil hacer una descripción detallada de todas las exaptaciones que se han dado en la naturaleza, y desde luego este no es el momento de abordar dicha empresa. Baste señalar que desde el advenimiento de la biología molecular y la secuenciación de genomas, contamos con numerosos ejemplos de exaptaciones a nivel molecular. A veces las sorpresas son enormes: recientemente, por ejemplo, se ha podido confirmar que gran parte de los genes empleados por los organismos para lograr la multicelularidad están ya presentes en unos seres unicelulares llamado coanoflagelados. Modificados o utilizados en distintas combinaciones, esos mismos genes de los seres unicelulares —millones de años después— se encargarán de sustentar el comportamiento multicelular. Pero ¿por qué esperar millones de años, por qué no sucedió antes? Simplemente, no se daban todavía las condiciones para la vida multicelular; había que esperar a que aumentara la concentración de oxígeno atmosférico para hacer viable la vida de seres de mayor tamaño y con requerimientos energéticos más altos. Y ese aumento sólo se dio con el fenómeno que conocemos como la “Gran Oxigenación”, un periodo relativamente rápido de aumento del oxígeno en los mares y en la atmósfera que tuvo lugar hace dos mil millones de años.

¿Podríamos haber visto con antelación la aparición de la multicelularidad, conociendo el conjunto de genes de una bacteria y las funciones que cumplen? Quizás algún visionario podría haber hecho tal predicción, pero el punto fundamental aquí es que no podemos enunciar todas las posibilidades de devenir de lo vivo, precisamente porque está sujeto a una dinámica evolutiva intrínsecamente impredecible. El futuro no está predeterminado. ¿Podemos enunciar con antelación todas las posibles preadaptaciones que se puedan dar en los seres vivos en los próximos miles de millones de años? Si

hacemos esta pregunta a científicos que trabajen en el campo de la biología evolutiva, la respuesta más probable es un rotundo “no”, porque ni siquiera podemos enunciar todas las posibles condiciones de selección que podrían darse en ese tiempo. Podríamos dejar volar la imaginación, pero ¿habría un punto en que realmente pudiéramos estar *seguros* de que la lista estaba ya concluida? En absoluto. Y la razón es que, precisamente, la propia dinámica evolutiva implica que cada vez que una estructura se modifica en un nuevo contexto, se crea un nuevo espacio de posibilidades que anteriormente no existía.

Kauffman también lo ilustra con el ejemplo de la vejiga natatoria de algunos tipos de peces. Se trata de un órgano que usan los peces para ajustar la flotabilidad, inflándola más o menos. Los humanos hemos copiado este mecanismo en nuestros submarinos, pero la evolución había dado con esta solución hace millones de años. Lo curioso sobre la evolución de la vejiga natatoria es que los paleontólogos nos dicen que es fruto de la evolución de los pulmones de los primeros peces pulmonados, un grupo de peces con auténticos pulmones cuya función es, lógicamente, respirar. Es decir, que un órgano originalmente utilizado para respirar se convirtió con el tiempo en un mecanismo para sumergirse más o menos en el agua. Parece más descabellado aún que el destornillador convertido en caña de pescar.

Los ejemplos, como decimos, son interminables. En su magnífico libro *Tu pez interior*, Neil Shubin detalla algunas exaptaciones auténticamente extraordinarias, como el caso de los huesecillos del oído medio (los famosos martillo, yunque y estribo) que tenemos los mamíferos. Tres huesos de la mandíbula reptiliana dieron lugar a los del oído medio de mamíferos: sabemos esto por observaciones de la embriología que se remontan al siglo XIX y muestran cómo algunos huesos de la mandíbula reptiliana fueron exaptados para —mucho tiempo después— dar lugar a los huesecillos que ayudarían a detectar sonidos de altas frecuencias. ¿Cómo podríamos haber predicho el oído interno de mamíferos a partir de los huesos de la mandíbula de reptiles?

En definitiva, un modelo determinista (inspirado en la física newtoniana) no sirve para describir lo vivo. Por un lado, los objetos que interactúan en los sistemas vivos no son homogéneos en cuanto a sus características, como sucede en el mundo físico (átomos, moléculas), sino que las interacciones se dan entre conjuntos heterogéneos —hay diferentes niveles entrelazados funcionando de manera integrada. Como si en nuestra mesa de billar hubiese bolas, canicas, manzanas y esponjas chocando entre sí según diferentes tipos de choques, que van cambiando con el tiempo. Deducir las ecuaciones diferenciales que describen el sistema en esa situación sería realmente difícil. Pero aún en el caso de lograrlo, resultaría imposible integrarlas porque las condiciones de contorno (los límites de la mesa de billar) también cambian con cada movimiento. A medida que avanzan y chocan, las bolas cambian de comportamiento, la mesa se hace más grande o más pequeña, o circular, o hexagonal. Y lo crucial es que no podemos predecir algorítmicamente en qué dirección irán esos cambios. No es que no sepamos lo que va a suceder, es que ni siquiera sabemos lo que *puede llegar a suceder*. Si no podemos enunciar de antemano todas las posibilidades, tampoco podemos calcular probabilidades, salvo en situaciones muy particulares de gran control. Con cada nueva

exaptación se abre realmente un nuevo abanico de posibilidades que no estaban presentes antes. No hay solución algorítmica para explicar la evolución de la biosfera.

Quizás alguien todavía pudiera pensar que es posible —al menos como cuestión de principio, al margen de la enorme dificultad práctica— reducir cualquier condición de contorno de un sistema, con la consiguiente selección de las dinámicas posibles para dicho sistema, a unas variables o grados de libertad básicos de la naturaleza, que aún estarían por descubrir. Es el sueño inherente a cualquier “teoría del todo”. Conviene notar que, incluso si fuera así, persistiría el mismo problema de tener que introducir unas condiciones iniciales y de contorno *ad hoc* a la hora de encontrar soluciones particulares a las ecuaciones diferenciales, que quedarían al margen de la propia teoría. Y eso sin contar con la probable existencia de constantes y parámetros que necesitarían ser asumidos con unos valores determinados a partir de ajustes experimentales, sin mayor explicación lógica. Pero, además, la misma mecánica cuántica apunta a que la emergencia de las condiciones de contorno relevantes para un problema es “contextual”; es decir, su consideración epistémica como condición de contorno depende de lo que queramos medir y del rango de intereses del científico que diseña un experimento buscando ciertas respuestas concretas. La mecánica cuántica nos dice, por último, que no existe en general una compatibilidad global entre los diferentes contextos de medida posibles y sus condiciones de contorno específicas. Si esto ya ocurre en el campo básico de la materia inerte, se comprende que la complejidad de los vivientes conduzca a una profunda inadecuación de su descripción y estudio científico con métodos puramente físicos y químicos.

Volviendo a la pregunta que nos hacíamos al principio de este capítulo, ¿existe algo que no se pueda describir totalmente con los métodos de la Física y la Química? Creemos que se puede responder con cierta seguridad: lo vivo. Con el paso de los sistemas inertes a los sistemas que hemos llamado vivos, el universo ha entrado definitivamente en una nueva lógica gobernada no tanto por leyes sino por procesos. Curiosamente, ya Darwin apeló al concepto de naturaleza como proceso, en contraposición al mecanicismo newtoniano imperante en su época. Un proceso repleto de novedades, precisamente porque no causa mediante leyes deterministas sino que *habilita* nuevos espacios de posibilidades. Algunas de estas novedades podrán resultar predecibles a partir de las propiedades de las partes que configuran el sistema, pero en muchas ocasiones asistimos a la aparición de *auténticas* novedades: cuando el sistema muestra propiedades que no son reducibles al comportamiento de sus partes. Lo cual nos lleva a considerar la cuestión de la emergencia, que es nuestro siguiente apartado.

2. EMERGENCIA

¿Es una célula algo más que una bolsa de moléculas interaccionando? En las páginas precedentes hemos explicado por qué nuestra respuesta es positiva. Sin embargo, hay pensadores que contestarían con un “no” bastante rotundo, porque aceptan formas más o menos mitigadas de determinismo o de reduccionismo. Esta postura suele invocar el

término *supervenencia* para explicar cómo un nivel de organización inferior origina un nivel superior. Afirmar la supervenencia de lo biológico sobre lo físico significa que para cualquier sistema biológico hay un sistema físico que lo constituye, por inaccesibles que sean los principios constituyentes de ese nivel inferior; y que siempre que se dé un estado físico idéntico, se dará necesariamente un idéntico estado biológico. La idea que subyace es que en algún momento de nuestra historia seremos capaces de acceder a todos los principios constituyentes del nivel físico y predecir sin error todos los estados que pueda tomar el biológico. Al contrario, ya hemos mostrado que el problema es más profundo. Quizás esto sería posible en sistemas causal y epistemológicamente cerrados, es decir, aquellos en que conocemos todas las posibles causas que pueden actuar. La dificultad, insalvable a nuestro parecer, es que ningún sistema biológico lo es: primero porque se trata de sistemas abiertos sobre los que el ambiente ejerce una influencia cambiante, que no es posible conceptualizar de manera universal; y segundo porque, muy probablemente, tampoco existe ningún sistema puramente físico que pueda considerarse causal y epistemológicamente cerrado.

Algunos físicos contemporáneos, como Lee Smolin, han llamado la atención sobre esta misma cuestión al denunciar el frecuente error de hacer “física en una caja” (*physics in a box*). Básicamente, la física funciona siempre haciendo una distinción primaria entre el sistema que se desea estudiar y el entorno en que se inserta dicho sistema. Esta distinción es crucial para poder tratar con métodos diversos sistema y entorno. Este último proporciona las condiciones de contorno adecuadas para poder estudiar de manera controlada al sistema. Ahora bien, ¿es extrapolable dicho procedimiento a la naturaleza o al universo, tomados como un todo único (por tanto sin un entorno bien definido)? Smolin y otros muchos piensan que no. De ahí las limitaciones que surgen en la cosmología física actual, especialmente cuando se pretende entender la evolución como un modelo cerrado en sí mismo, totalmente determinado y predecible, sin ninguna otra referencia que permita abordar las dificultades metodológicas que surgen.

Es importante recordar que la comprensión más común de la emergencia del mundo físico clásico a partir de las propiedades cuánticas de la materia involucra el fenómeno de la “decoherencia”. Cuando tenemos varias ondas cuyos picos y valles están sincronizados, puede haber fenómenos de interferencia (de potenciación o de cancelación) entre ellas. Se dice entonces que hay “coherencia” entre las ondas. Por el contrario, si los picos y valles de cada una no poseen ninguna correlación con los de las demás, se dice que hay “decoherencia”. En mecánica cuántica, la decoherencia hace que, cuando un sistema interacciona con un entorno lo suficientemente grande —teniendo muchas más partículas el segundo que el primero— las posibles soluciones de la función de onda del sistema dejen de ser coherentes y, como consecuencia, se pierda la posibilidad de que aparezcan las sutiles interferencias cuánticas. Es como si el entorno estuviera realizando una “medición” del sistema, “determinándolo” de alguna manera, de modo que el sistema pasara a comportarse de manera clásica y su función de onda quedara reducida a una suma ponderada de probabilidades de encontrarse en un estado o en otro. Con la decoherencia, la mecánica cuántica pasa a ser mecánica estadística

clásica, donde ya no se dan interferencias, sino combinaciones clásicas de probabilidades. Dicho fenómeno, por ejemplo, impide que hoy día tengamos ya ordenadores cuánticos que funcionen mejor que los ordenadores clásicos, pues resulta muy difícil mantener el aislamiento del hardware para que las operaciones lógicas se lleven a cabo en un régimen puramente cuántico.

No obstante, el estudio de la decoherencia no proporciona una interpretación definitiva y completa de la mecánica cuántica. Permite simplemente establecer un procedimiento que funciona a la hora de intentar resolver problemas prácticos, pero no cuestiones de principio. El hecho es que los físicos aún no entienden con claridad qué es lo que ocurre en el fenómeno de la decoherencia, que sigue presentando muchos problemas conceptuales abiertos. Por ejemplo: no existe un modelo universal de decoherencia, sino que esta depende de la magnitud concreta que se vaya a medir en un experimento específico sobre el sistema; tampoco existe un umbral bien definido de una magnitud física que diga cuándo empieza a producirse el fenómeno (la referencia a un número grande de partículas del entorno es demasiado genérica); la decoherencia tampoco explica lo que sucede en el caso de un sistema totalmente aislado, como sería el propio universo (donde no tiene sentido hablar de sistema y entorno, pues todo sería “sistema”); y, finalmente, el fenómeno mismo de la decoherencia se basa en una distinción entre sistema y entorno que acaba por caer en el problema de la “física en una caja” que mencionábamos antes. En resumen, el fenómeno de la decoherencia parece ser una pista útil para intentar comprender la transición entre el mundo de la mecánica cuántica y el mundo clásico macroscópico en el que nos movemos cotidianamente, pero está muy lejos de proporcionar una respuesta completamente satisfactoria sobre cómo se determina la naturaleza.

Dadas estas dificultades, otros filósofos y pensadores prefieren hablar de *emergencia*, un término que denota una postura menos determinista y más abierta a la posibilidad de que el sistema, una vez en marcha, pueda influir sobre las partes que lo constituyen *cambiándolas de algún modo*. Terrence Deacon define los fenómenos emergentes de un sistema como las nuevas propiedades que no estaban contenidas en los componentes que lo constituyen y que muestran regularidades que no se pueden explicar con las leyes que rigen el comportamiento de sus constituyentes. Esas nuevas regularidades no violan las leyes que afectan a los constituyentes, pero las seleccionan, canalizan, refuerzan o amplifican con el resultado de que emergen propiedades nuevas: hay una novedad *real*. Deacon distingue tres tipos de emergencia: la emergencia de primer orden surge cuando las propiedades no están en las partes pero pueden explicarse estadísticamente por las interacciones entre ellas. La tensión superficial o la temperatura son ejemplos clásicos de emergencia de primer orden. No son propiedades de las moléculas individuales, sino de grandes conjuntos de esas moléculas, regularidades estadísticas de estos grandes conjuntos. Se podría decir que este primer tipo de emergencia “débil” se corresponde con lo que otros entienden por supervenencia.

La emergencia de segundo orden puede compararse con el crecimiento de un copo de nieve y otros sistemas no vivos, en los que los pequeños cambios de la configuración del

sistema que se dan al inicio determinan y guían el comportamiento futuro de todo el sistema. El crecimiento de un copo de nieve sigue unas leyes a nivel microscópico, pero las primeras configuraciones macroscópicas que adopta determinarán el comportamiento futuro, “guiándolo” en una dirección concreta de entre todas las posibles. Se selecciona —muy al principio— de entre un amplio espacio de posibilidades una solución concreta, rompiendo la simetría de las posibilidades. Hemos visto algunos ejemplos similares al hablar de auto-ensamblaje.

Los organismos o sistemas vivos mostrarían emergencia de tercer orden, en la que —además de lo anterior— los estados superiores influyen causalmente sobre los inferiores, seleccionando, reforzando y amplificando algunas de sus propiedades de modo repetido. Las estructuras micro y macroscópicas del pasado reaparecen en los siguientes estados merced a procesos de selección y amplificación de gran complejidad. Como consecuencia, hay acumulación de memoria y evolución del sistema: las trayectorias que han tenido éxito pasan a las siguientes generaciones. La aparición de la vida, el aprendizaje o el lenguaje simbólico pueden considerarse fenómenos radicalmente emergentes.

En la física de los sistemas no lineales y caóticos hay un concepto que puede ayudar a entender este tipo de emergencia *fuerte*: la criticalidad. Un sistema se mueve en *régimen crítico* cuando entra en esa región donde es imposible predecir el siguiente estado que va a adoptar, incluso si se trata de un sistema determinista como pueden ser teóricamente algunos sistemas caóticos. Este comportamiento se observa en algunas redes de interacción como las que mencionábamos al principio de este libro. Hay muchos tipos teóricos de redes, según su configuración: desde redes totalmente aleatorias hasta redes perfectamente regulares. Pero entre ambos extremos hay otras posibilidades. Algunas redes tienen una configuración en la que unos pocos nodos están muy interconectados, tienen muchos vecinos, mientras que la gran mayoría de los nodos están pobemente conectados. Si representamos en una gráfica los posibles grados de conexión y el número de nodos que pertenece a cada una de estas categorías, y ponemos ambos ejes en una escala especial, veremos una línea recta descendente con una pendiente de en torno a —2. Se dice que la red sigue una *ley de potencias*, característica de los fenómenos críticos e impredecibles en la naturaleza. Curiosamente (o quizás no tanto), la gran mayoría de las redes biológicas son de este tipo y se mueven en parámetros de criticalidad.

El hecho es que un gran número de fenómenos naturales siguen una ley de potencias, lo que lleva a pensar que el régimen crítico es un estado habitual de la naturaleza. La relación entre el tamaño y la frecuencia de aludes, avalanchas y terremotos, por ejemplo, sigue esta ley. Una de las características de las redes que siguen una ley de potencias es que en ellas no puede definirse un tamaño o magnitud “típica”, en cuya escala ocurrían los fenómenos relevantes. Por ejemplo, en el caso de la radiactividad, se suele definir la vida media de un elemento como el tiempo típico en el que una cierta cantidad del elemento se reduce a la mitad. Este tiempo da idea de la escala temporal en que la radiactividad del elemento tiene efectos importantes, siendo despreciables los efectos para tiempos mucho menores o mucho mayores. Este es el régimen típico de los

fenómenos que siguen una ley exponencial, creciente o decreciente, en la naturaleza. Sin embargo, en el caso de una ley de potencias, los fenómenos pueden ser relevantes y reproducibles en todas las escalas, de ahí que también se conozcan como redes “libres de escala”. Algunos científicos hablan por este motivo de una cierta “fractalidad” en los fenómenos críticos naturales. Así como los fractales mantienen la misma forma en todos los niveles, la ley de potencias que describe estas redes tiene el mismo aspecto con independencia del *zoom*, la escala a la que observemos el fenómeno. El campo de la criticalidad y el de la complejidad van de la mano. Así, la distribución del espectro de energías de buena parte de las moléculas más importantes para la vida también parece encontrarse en el régimen crítico y lo mismo sucede, en el otro extremo de la naturaleza, para la relación entre el número de nodos y sus interconexiones en la red de redes, Internet.

Como decíamos, un aspecto *mágico* de estas redes que se mueven dentro de los límites del régimen crítico es que no son puramente aleatorias, pero tampoco perfectamente regulares; una pequeña perturbación puede reconfigurar la red de modo impredecible. Si quitamos o modificamos uno de esos nodos con alto número de conexiones, la red entera cambiará dando lugar a configuraciones nuevas con propiedades que no podríamos haber previsto. Se producirá una transición de fase y la red funcionará en un régimen con características distintas al anterior. Pensemos en el ejemplo de Internet y los efectos diversos que pueden tener en la red global la *caída* de un ordenador con pocas conexiones frente a la de un *hub* que aúna buena parte del tráfico entre continentes.

Hemos visto más arriba que la evolución de la biosfera está repleta de ejemplos de emergencia fuerte: se crean nuevas capacidades de devenir. Cuando la selección natural actúa, surge un nuevo espacio de posibilidades en el que pueda aparecer una auténtica novedad, una emergencia radical. La selección favoreció la vejiga natatoria de los peces por sus ventajas para regular la flotabilidad, pero lo crucial para la historia evolutiva posterior es que dio lugar a un nuevo espacio de posibilidades, un nicho vacío que se podía llenar de múltiples maneras, no enunciables algorítmicamente. Quizás alguna bacteria se adaptó a vivir en la vejiga natatoria. ¿Es eso una emergencia radical? Es intrigante que la evolución está creando sus posibilidades de devenir sin seleccionarlas directamente, simplemente permitiéndolas. Cuando la vejiga natatoria cobra funcionalidad, se abre un abanico de posibilidades que no podemos enunciar, alguna de las cuales podrá realizarse si llega a ser seleccionada. Pero cuando se seleccionó la vejiga no se seleccionó esa posibilidad. Quizás también se dé este tipo de emergencia en fenómenos culturales y sociales con una configuración semejante a las redes críticas, como es el caso de internet. Siguiendo el ejemplo de Google Maps del que hablamos antes, ¿es Pokémon GO —y el inmenso campo de la realidad virtual— una emergencia radical? Más que causalidad, por tanto, hemos de hablar de habilitación o capacitación: ¿se puede considerar como una auténtica causa la generación de nuevas potencialidades? ¿Qué tipo de causalidad sería esa?

En los últimos tiempos, algunos filósofos de la naturaleza (Nancey Murphy y Alicia Juarrero, por ejemplo), han venido considerando dicha causalidad como una causalidad

“top-down”, de arriba abajo, típica de sistemas complejos como los seres vivos y esencialmente distinta a la causalidad “bottom-up” (de abajo arriba) que la ciencia utiliza habitualmente al realizar sus análisis. En el caso de la causalidad top-down estamos hablando de una causalidad que no puede reducirse a la suma de la causalidad ejercida por los componentes más básicos del sistema junto con sus interacciones. No se trata, por tanto, de una conveniencia metodológica para facilitar los cálculos, sino de algo que sucede en el orden de lo real. Por otro lado, dicha causalidad top-down no sustituye ni se opone a la causalidad bottom-up de los componentes inferiores o básicos del sistema que, obviamente, también lo constituyen y mantienen. La causalidad top-down más bien habilita, organiza y selecciona —en cierto sentido restringe— las nuevas posibilidades que finalmente serán actualizadas por las dinámicas propias del sistema. En este sentido, podría decirse que la causalidad top-down funciona como lo que la filosofía ha denominado tradicionalmente *causa formal*.

Igualmente es oportuno recordar aquí algo que saben la mayoría de los científicos y filósofos de la ciencia: nuestros mejores modelos y teorías sobre los fenómenos naturales no alcanzan un completo isomorfismo con ellos. Esto quiere decir que la correspondencia entre teoría científica y realidad natural no es biyectiva; los elementos de una y otra no se corresponden perfectamente uno a uno. Nuestras teorías suelen necesitar de ulteriores determinaciones —mediante condiciones iniciales o de contorno o la adición de más información— para alcanzar a describir completamente los fenómenos. Es plausible pensar que lo que ocurre en el plano cognitivo estaría apuntando a lo que ocurre en orden de lo real, donde una mera causalidad eficiente (bottom-up) no alcanzaría a determinar totalmente la realidad.

Hemos dicho que el número de usos de un destornillador o las posibilidades evolutivas de la vejiga natatoria son indefinidos, pero eso no quiere decir que sean infinitos o ilimitados, ni mucho menos aleatorios. Al hablar de las restricciones que las constantes físicas imponen sobre los procesos de desarrollo de los seres vivos hemos llegado a la conclusión de que existen unos ciertos límites a las posibilidades evolutivas. Parecería que ambas posturas son contradictorias, pero precisamente lo fascinante sobre la naturaleza es esta mezcla de creatividad real con restricción, emergencia constreñida, pero radical. La selección de la vejiga natatoria sigue *una lógica*, no es un cambio arbitrario. De todas las posibilidades que genera esa selección —posibilidades cuyo número no podemos definir— sólo se seleccionarán algunas concretas, siguiendo también esa misma lógica. Es decir, la evolución de la biosfera no sigue leyes que podamos formular matemáticamente, pero tampoco es arbitraria. ¿Existe algún análogo a esto en la física? Parece que la mecánica cuántica y los procesos de decoherencia anteriormente mencionados, que dan lugar a la emergencia del mundo macroscópico, apuntan en una misma dirección.

Merece también mención en este contexto un punto de convergencia entre los grandes principios que guían la biología y la física. Durante las últimas décadas se ha ido desarrollando en el ámbito de la física el programa denominado “darwinismo cuántico”, que intenta avanzar en la comprensión de los fenómenos de decoherencia aprovechando

las analogías que pueden establecerse con la perspectiva darwinista en biología. El darwinismo cuántico explica que el mundo clásico emerge a partir del mundo cuántico porque el entorno o ambiente en que se encuentran situados los sistemas cuánticos seleccionan aquellas magnitudes del sistema que se copian (reproducen) de modo redundante en diversas partes del entorno, haciéndose así cada vez más robustas (sobreviviendo) y facilitando el acuerdo entre las distintas perspectivas intersubjetivas de nuestro conocimiento, que solo tienen acceso a partes del entorno que guardan una información parcial del sistema. Indudablemente, la perspectiva del darwinismo cuántico resulta prometedora en cuanto ofrece una vía de explicación para la determinación concreta que observamos en la realidad. No obstante, necesita resolver los mismos problemas que hemos planteado en este libro acerca de la inexistencia de leyes deterministas para explicar la emergencia y actualización de nuevas posibilidades en una naturaleza que evoluciona.

Para entender cómo es esto posible, nos parece que es importante entender bien algo que habitualmente se malinterpreta. Es común el error de querer explicar la evolución del universo partiendo de un espacio de posibilidades enorme (casi infinito) que poco a poco se va acotando a medida que el universo evoluciona: con cada nueva “elección”, el espacio de futuras posibilidades va siendo menor. En cambio, siguiendo las ideas expresadas en estas páginas, parece más correcto partir de una situación inicial ya limitada en sus posibilidades, dadas las constantes físicas de partida. Lo crucial es que con cada avance evolutivo, el espacio de fases del que inicialmente partimos se reduce (se selecciona solo una parte de él) pero, al mismo tiempo, necesita ser redefinido, pues aparecen variables nuevas que amplían las posibilidades de devenir. Este proceso de constante devenir constreñido es el fundamento real de una naturaleza creativa, capaz de actualizarse, organizarse y dirigirse por sí misma y, sobre todo, capaz de generar auténtica novedad en el universo.

3. A MODO DE RESUMEN

En este último capítulo hemos abordado la cuestión de si algún día el mundo físico —desde el nivel microscópico hasta el biológico— se podrá explicar totalmente mediante leyes deterministas. Diversos avances en la ciencia de las últimas décadas sugieren que esto no será posible. En el mundo físico, la mecánica cuántica apunta hacia una realidad no-local en la que no se alcanza una compatibilidad global entre los diferentes contextos de medida y sus condiciones de contorno específicas. Junto a esto, es patente en muchos casos la imposibilidad de conocer *a priori* tanto los grados de libertad de un sistema como las condiciones de contorno que permitirían integrar las ecuaciones diferenciales que podrían describir ese sistema de modo determinista.

Esta indeterminación intrínseca del mundo físico es aún más clara en lo biológico, donde realmente no se puede hablar de leyes en sentido propio, sino más bien de modelos que funcionan en condiciones ideales. Muchos sistemas naturales, pero especialmente los sistemas vivos, se organizan en forma de redes cuya distribución de

conexiones sigue un patrón típico conocido como ley de potencias. Estas redes se mueven en torno a un régimen crítico, en el que pueden surgir propiedades sistémicas nuevas, y muestran características de fractalidad; es decir, se comportan de modo semejante a diferentes escalas. La evolución biológica está repleta de exaptaciones, en las que ciertas estructuras o funciones son utilizadas con una finalidad nueva e imprevista. Dada la naturaleza de los procesos evolutivos, en los que las condiciones de contorno cambian y crean nuevos espacios de posibilidades, las direcciones futuras de cambio no pueden ser enunciadas algorítmicamente.

Todo esto nos lleva a concluir que la naturaleza posee las características de un proceso capaz de dar lugar a auténticos fenómenos emergentes. Esto significa que está dotada de la creatividad necesaria para garantizar un futuro lleno de novedades cada vez más bellas y maravillosas.

EPÍLOGO

AL COMIENZO DE ESTA OBRA anunciábamos al lector nuestra intención de reflexionar sobre la Naturaleza a la luz de visión que nos ofrece la ciencia de comienzos del siglo XXI. Nuestro objetivo no era otro que intentar dar respuesta a la eterna pregunta sobre el sentido, pregunta que de un modo u otro ha acompañado a la especie humana a lo largo de su historia. Quizás la meta de encontrar significado en un cosmos que a menudo parece no tenerlo sea una empresa demasiado ambiciosa, pero estamos convencidos de que si no es capaz de encontrar esta profunda conexión con la realidad física, el ser humano se encontrará perplejo ante un universo que frecuentemente parece estar sometido a procesos fortuitos y casuales, procesos que a primera vista no parecen apuntar hacia ningún fin capaz de generar esperanza.

Hemos centrado nuestra reflexión en torno al hecho bien asentado de que la realidad física está constituida por sistemas complejos que se mueven en un régimen crítico y muestran propiedades típicas de los sistemas caóticos. Hemos visto cómo la estructuración de estos sistemas en forma de redes puede dar lugar a fenómenos como el orden y a la emergencia de nuevas propiedades, a medida que evolucionan en un devenir repleto de contingencias pero restringido, a su vez, por las propias constantes físicas y por las estructuras básicas que los configuran.

Al entender la Naturaleza como un gran sistema de sistemas complejos y dinámicos, la ciencia moderna ya no ve el Universo como una “máquina” movida únicamente por frías interacciones de carácter determinista, sino como un proceso que genera una gigantesca red de relaciones. En efecto, hemos visto en estas páginas que la aspiración moderna de dar razón del Universo únicamente mediante las leyes de la física y enunciados matemáticos se esfumó con la llegada de la mecánica cuántica, la teoría del caos y el estudio de los sistemas complejos. Nos hemos ocupado también del fenómeno peculiar de la vida; hemos visto cómo los intentos de explicar el origen, la estructura y el funcionamiento de los sistemas vivos, cuyas posibilidades de evolución no pueden ser enunciadas algorítmicamente, asestaron el golpe definitivo contra el determinismo. A día de hoy, seguimos buscando una “teoría del todo” que incluya lo vivo y lo consciente, pero cada vez se alzan más voces cuestionando que dicha empresa sea posible.

El paradigma actual nos sitúa, por tanto, ante un cosmos regido por procesos que dan lugar a la emergencia de novedades reales, un universo con una enorme capacidad creativa, lleno de promesas. Esta dimensión de *futuridad abierta* implica, a su vez, que

es razonable esperar la llegada de nuevas realidades, precisamente porque se trata de una obra todavía en construcción. Si nuestro universo ha llegado desde los átomos a la conciencia, el arte, la ética o la ciencia, si hoy en día el universo es realmente *más* de lo que fue, es razonable esperar que siga yendo a más y no a menos, que se vaya embelleciendo a medida que camina hacia su plenitud.

Quizás sea ese todo el significado que podemos dar a la Naturaleza en la que nos encontramos inmersos. A algunos podrá parecerles poco; sin embargo, creemos que no es un paso pequeño y, en cualquier caso, supone un buen punto de arranque para seguir avanzando en la comprensión del cosmos. Porque, en última instancia, corresponde a cada persona encontrar el sentido, al preguntarse qué papel juega en este gran drama de dimensiones cósmicas; en un universo inacabado, cada una de nuestras acciones no solo contribuye al presente sino que además se hace disponible para el futuro. Podemos, por tanto, ir aún más allá del intento por desentrañar las estructuras y procesos escondidos en la Naturaleza. Podemos poner en ejercicio nuestro esfuerzo, nuestra creatividad y nuestro entusiasmo y cooperar así a alimentar la esperanza de que este mundo físico aparentemente roto llegará algún día a ser sanado y cobrar sentido.

BIBLIOGRAFÍA

- ARTIGAS, Mariano. 1989. *Filosofía de la Ciencia Experimental. La objetividad y la verdad en las Ciencias*. Pamplona: Eunsa.
- AULETTA, Gennaro, Marc LECLERC, Rafael A MARTÍNEZ, and William J LEVADA. 2011. *Biological Evolution : Facts and Theories : A Critical Appraisal 150 Years after “The Origin of Species.”* Analecta Gregoriana: 312. Roma : Gregorian & Biblical, cop. 2011.
- BACCIAGALUPPI, Guido. 2012. “The Role of Decoherence in Quantum Mechanics.” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Zalta, Edward N. <http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/qm-decoherence/>.
- CASTELVECCHI, Davide. 2016. “Living Cells Bind Silicon and Carbon for the First Time.” *Nature News*, no. November. doi:10.1038/nature.2016.21037.
- CONWAY-MORRIS, Simon. 1998. *The Crucible of Creation: The Burgess Shale and the Rise of Animals*. Oxford University Press.
- DEACON, Terrence W. 2006. “Emergence: The Hole at the Wheel’s Hub.” In *The Re-emergence of Emergence: the emergentist hypothesis from Science to Religion*, edited by Philip Clayton and Paul Davies, 111-150. Oxford: Oxford University Press.
- DEWAR, Roderick C., Charles H. LINEWEAVER, Robert K. NIVEN, and Klaus REGENAUER-LIEB. 2014. “Beyond the Second Law: An Overview.” In *Beyond the Second Law. Entropy Production and Non-Equilibrium Systems*, edited by Roderick C. DEWAR, Charles H. LINEWEAVER, Robert K. NIVEN, and Klaus REGENAUER-LIEB, 15—27. Berlin, Heidelberg: Springer.
- DIETRICH, Michael R. 2013. “Molecular Evolution.” In *The Philosophy of Biology: A Companion for Educators*, 239—48. doi:10.1007/978-94-007-6537-5_12.
- ELLIS, George F.R. 2016. *How Can Physics Underlie the Mind? Top-Down Causation in the Human Context*. Berlin — Heidelberg: Springer.
- ENGLAND, Jeremy L. 2013. “Statistical Physics of Self-Replication.” *Journal of Chemical Physics* 139 (2013). doi:10.1063/1.4818538.
- ERWIN, Douglas H, and Eric H DAVIDSON. 2009. “The Evolution of Hierarchical Gene Regulatory Networks.” *Nature Reviews. Genetics* 10 (2): 141—48. doi:10.1038/nrg2499.

- FAN, Shaohua, Matthew E.B. HANSEN, Yancy LO, and Sarah A. TISHKOFF. 2016. "Review of Recent Human Adaptation." *Science* 354 (6308).
- GILBERT, Scott F, Thomas C G BOSCH, and Cristina LEDÓN-RETTIG. 2015. "Eco-Evo-Devo: Developmental Symbiosis and Developmental Plasticity as Evolutionary Agents." *Nature Reviews Genetics* 16 (10). Nature Publishing Group: 611—22. doi:10.1038/nrg3982.
- GOULD, Stephen Jay. 1990. *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W. W. Norton & Company.
- HANDSTEINER, J., FRIEDMAN, A.S., RAUCH, D., GALLICCHIO, J., LIU, B., HOSP, H., KOFLER, J., BRICHER, D., FINK, M., LEUNG, C., MARK, A., NGUYEN, H.T., SANDERS, I., STEINLECHNER, F., URGIN, R., WENGEROWSKY, S., GUTH, A.H., KAISER, D.I., SCHEIDL, T., y ZEILINGER, A. 2017. "Cosmic Bell Test: Measurement Settings from Milky Way Stars." *Phys. Rev. Lett.* 118, 060401. doi:10.1103/PhysRevLett.118.060401.
- HENSEN, B., BERNIEN, H., DRÉAU, A.E., REISERER, A., KALB, N., BLOK, M.S., RUITENBERG, J., VERMEULEN, R.F.L., SCHOUTEN, R.N., ABELLÁN, C., AMAYA, W., PRUNERI, V., MITCHELL, M.W., MARKHAM, M., TWITCHEN, D.J., ELKOUSS, D., WEHNER, S., TAMINIAU, T.H. y HANSON, R. 2015. "Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres." *Nature* 526: 682—686. doi:10.1038/nature15759.
- ISMAEL, Jenann. 2015. "Quantum Mechanics." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2015/entries/qm/>.
- JACOB, Francois. 1977. "Evolution and Tinkering." *Science* 196 (4295): 1161—66. doi:10.1126/science.860134.
- JUARRERO, Alicia. 2002. "Complex Dynamical Systems and the Problem of Identity." *Emergence* 4 (1): 94—104.
- KAUFFMAN, Stuart A. 2000. *Investigations*. Oxford: Oxford University Press.
- KAUFFMAN, Stuart. 2015. "Issues in Science and Theology: What Is Life?" xi-207. doi:10.1007/978-3-319-17407-5.
- KOONIN, E V. 2011. *The Logic of Chance: The Nature and Origin of Biological Evolution*. FT Press Science. Pearson Education.
- KOONIN, E. V. 2008. "Darwinian Evolution in the Light of Genomics." *Nucleic Acids Research* 37 (4): 1011—34. doi:10.1093/nar/gkp089.
- LALAND, Kevin, Tobias ULLER, Marc FELDMAN, Kim STERELNY, Gerd B. MÜLLER, Armin MOCZEK, Eva JABLONKA, et al. 2014. "Does Evolutionary Theory Need a Rethink?" *Nature* 514 (7521): 161—64. doi:10.1038/514161a.
- LARROUX, C., G. N. LUKE, P. KOOPMAN, D. S. ROKHSAR, S. M. SHIMELD, and B. M. DEGNAN. 2008. "Genesis and Expansion of Metazoan Transcription Factor Gene Classes." *Molecular Biology and Evolution* 25 (5): 980—96. doi:10.1093/molbev/msn047.
- LOMBARDI, Olimpia, Sebastián FORTÍN, and Mario CASTAGNINO. 2012. "The Problem of Identifying the System and the Environment in the Phenomenon of Decoherence." In

- The European Philosophy of Science Association Proceedings: Amsterdam 2009*, edited by H.W. de Regt, S. Hartmann, and S. Okasha, 161—74. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-94-007-2404-4_15.
- LOWE, Craig B, Manolis KELLIS, Adam SIEPEL, Brian J RANEY, Michele CLAMP, Sofie R SALAMA, David M KINGSLY, Kerstin LINDBLAD-TOH, and David HAUSSLER. 2011. “Three Periods of Regulatory Innovation during Vertebrate Evolution.” *Science (New York, N.Y.)* 333 (6045): 1019—24. doi:10.1126/science.1202702.
- LYNCH, M. 2007. *The Origins of Genome Architecture*. Sinauer Associates.
- MANGABEIRA UNGER, Roberto, and Lee SMOLIN. 2015. *The Singular Universe and the Reality of Time: A Proposal in Natural Philosophy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MARTIN, Arnaud, and Virginie ORGOGOZO. 2013. “The loci of Repeated Evolution: A Catalog of Genetic Hotspots of Phenotypic Variation.” *Evolution* 67 (5): 1235—50. doi:10.1111/evo.12081.
- MERALI, Z. 2015. “Quantum ‘spookiness’ passes toughest test yet.” *Nature* 525: 14—15. doi:10.1038/nature.2015.18255.
- MITCHELL, Melanie. 2009. *Complexity: A Guided Tour*. New York: Oxford University Press.
- MURPHY, Nancey C, and George Francis RAYNER ELLIS. 1996. *On the Moral Nature of the Universe: Theology, Cosmology, and Ethics. Theology and the Sciences*. Minneapolis, Minn.: Fortress Press.
- NEWMAN, Stuart A., and Ramray BHAT. 2009. “Dynamical Patterning Modules: A ‘pattern Language’ for Development and Evolution of Multicellular Form.” *International Journal of Developmental Biology* 53 (5—6): 693—705. doi:10.1387/ijdb.072481sn.
- NOVO VILLAVERDE, Javier. 2016. “Breaking Mariano Artigas’ Frontiers of Evolutionism”. *Scientia et Fides* 4 (2): 91—108.
- O’CONNOR, Timothy, and Hong Yu WONG. 2012. “Emergent Properties.” *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Zalta, Edward N. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2012/entries/properties-emergent/>.
- PENROSE, Roger. 2004. *The Road to Reality*. London: Jonathan Cape.
- PENROSE, Roger. 2010. *Cycles of Time. An Extraordinary New View of the Universe*. London: The Bodley Head.
- PENROSE, R. 2016. *Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe*. Princeton — Oxford: Princeton University Press.
- PIGLIUCCI, M, G B MÜLLER, Konrad LORENZ Institute for Evolution, and Cognition Research. 2010. *Evolution, the Extended Synthesis*. MIT Press.
- RUNGGALDIER, Edmund. 2014. “Causa Formalis and Downward Causation.” In *New Scholasticism Meets Analytic Philosophy*, edited by Rafael Hüntemann and Johannes Hattler, 89—103. Heusenstamm: Editiones Scholasticae.
- SÁNCHEZ-CAÑIZARES, Javier. 2016. “Entropy, Quantum Mechanics, and Information in Complex Systems: A Plea for Ontological Pluralism.” *European Journal of Science*

- and Theology* 12 (1): 17—37.
- SCHRÖDINGER, Erwin. 1944. *What Is Life*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SHAPIRO, J A. 2011. *Evolution: A View from the 21st Century*. FT Press Science. Pearson Education.
- SMOLIN, Lee. 2013. *Time Reborn. From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. Boston — New York: Houghton Mifflin.
- STERN, David L. 2013. “The Genetic Causes of Convergent Evolution.” *Nature Reviews. Genetics* 14 (11). Nature Publishing Group: 751—64. doi:10.1038/nrg3483.
- STERN, David L. 2011. *Evolution, Development and the Predictable Genome*. Roberts and Company.
- TEGMARK, Max. 2014. *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*. New York: Knopf.
- TEGMARK, Max. 2015. “Consciousness as a State of Matter.” *Chaos, Solitons & Fractals* 76: 238—70. <http://arxiv.org/abs/1401.1219>.
- VAN FRAASSEN, Bas C. 2008. *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*. Oxford: Clarendon Press.
- WALLACE, David. 2008. “Philosophy of Quantum Mechanics.” Quantum Physics. In *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics*, edited by D. Rickles, 16—98. Aldershot; Burlington, VT: Ashgate. <http://arxiv.org/abs/0712.0149>.
- WILCZEK, Frank. 2015. *A Beautiful Question. Finding Nature’s Deep Design*. New York: Penguin Press.
- YOKOYAMA, Shozo, Jinyi XING, Yang LIU, Davide FAGGIONATO, Ahmet ALTUN, and William T. STARMER. 2014. “Epistatic Adaptive Evolution of Human Color Vision.” Edited by Jianzhi Zhang. *PLoS Genetics* 10 (12): e1004884. doi:10.1371/journal.pgen.1004884.
- ZUREK, Wojciech H. 1991. “Decoherence and the Transition from Quantum to Classical.” *Physics Today*, Progress in Mathematical Physics, 44 (10). Springer: 36. <http://link.aip.org/link/PHTOAD/v44/i10/p36/s1&Agg=doi>.
- ZUREK, Wojciech H. 2002. “Decoherence and the Transition from Quantum to Classical — Revisited.” *Los Alamos Science* 27: 1—24.
- ZUREK, Wojciech H. 2009. “Quantum Darwinism.” Quantum Physics. *Nature Physics* 5 (March): 181—88. doi:10.1038/nphys1202.

JAVIER NOVO es doctor en Medicina por la Universidad de Santiago de Compostela y catedrático de Genética en la Universidad de Navarra; ha realizado estancias postdoctorales en Cambridge y Londres y es profesor de Genética Molecular Humana, Biología Computacional, Genómica y Evolución Biológica.

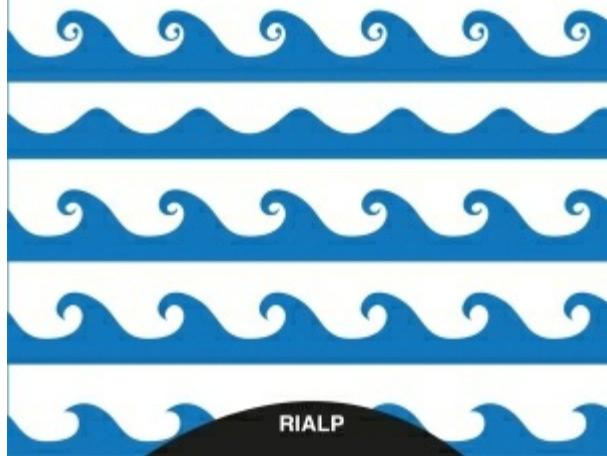
RUBÉN PEREDA es doctor en Filosofía por la Universidad de Navarra y por la Pontificia Università della Santa Croce, y profesor de Síntesis Filosófica y Metafísica.

JAVIER SÁNCHEZ-CAÑIZARES es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Autónoma de Madrid, y en Teología por la Pontificia Università della Santa Croce. Es investigador del proyecto “Mente-cerebro” en la Universidad de Navarra, y director del Grupo de Investigación “Ciencia, Razón y Fe”.

ALASDAIR
MACINTYRE

ÉTICA EN LOS CONFLICTOS
DE LA MODERNIDAD

SOBRE EL DESEO, EL RAZONAMIENTO PRÁCTICO Y LA NARRATIVA.



Ética en los conflictos de la modernidad

MacIntyre, Alasdair

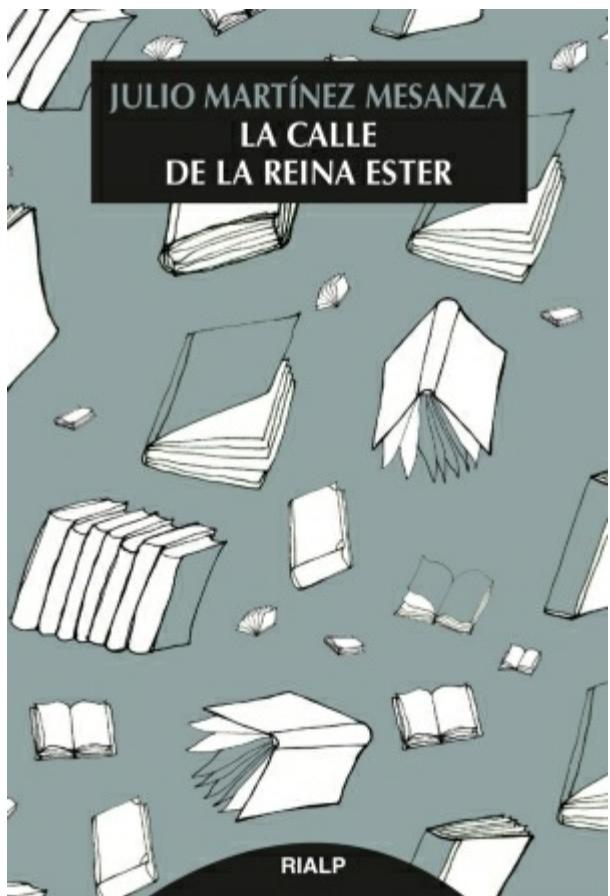
9788432148736

526 Páginas

[Cómpralo y empieza a leer](#)

¿Qué deseo? ¿Por qué deseo? ¿Lo que deseo, es realmente lo mejor? Cuando tratamos de llevar estas preguntas a un estadio algo más avanzado, nos convertimos en filósofos sin apenas darnos cuenta. La indagación se vuelve filosófica. MacIntyre acude entonces a ejemplos extraídos de Hume, Aristóteles, Tomás de Aquino y Marx, entre otros, para salvar ese abismo entre filosofía y práctica diaria, en el contexto de la Modernidad avanzada. Trata entonces de mostrar que solo desde una perspectiva tomista aristotélica podemos caracterizar adecuadamente algunos rasgos clave del actual orden social.

[Cómpralo y empieza a leer](#)



La calle de la reina Ester

Martínez Mesanza, Julio

9788432148750

188 Páginas

[Cómpralo y empieza a leer](#)

"En Tel Aviv -dice el autor en su prólogo-, hay una calle llamada Esther HaMalka. En una de sus esquinas le di vueltas a un texto sobre la reina Ester... Ella fue la hermosura; después, una más del harén, y, después, otra vez la hermosura. De ahí, de esa doble y, en el amor, milagrosa epifanía, nacieron preguntas que nunca llegué a responder". Este pequeño volumen, personalísimo, tiene el valor de la primera prosa, de aquella que no se escribe para ser publicada. En ella nos asomamos a lecturas muy selectas, meditadas y analizadas con sensibilidad y sencillez, y a sugerentes reflexiones sobre la composición poética, la literatura, la escritura, el hombre: por sus páginas discurren Lucrecio, Dante, Petrarca, Lope y Péguet, Livio, san Agustín, Pascal, Johnson o Chateaubriand, dejándonos un legado de valor inestimable.

[Cómpralo y empieza a leer](#)

Índice

PORADA INTERIOR	2
CRÉDITOS	3
PRESENTACIÓN	5
I. NATURALEZA	8
1. UN PASEO POR EL PARQUE	8
2. SISTEMAS	12
3. COMPLEJIDAD	16
4. ESTRATEGIAS	20
5. A MODO DE RESUMEN	22
II. VIDA	24
1. ENERGÍA Y ENTROPÍA	24
2. CRECER	29
3. REPRODUCIRSE Y MORIR	31
4. AUTO-CONSTRUCCIÓN	34
5. A MODO DE RESUMEN	37
III. CAMBIO	38
1. ¿TODO CAMBIA?	38
2. EVOLUCIÓN Y GENÉTICA	41
3. MACROEVOLUCIÓN	45
4. EVO-DEVO-ECO	49
5. A MODO DE RESUMEN	54
IV. LÍMITES	55
1. ADAPTACIONES	55
2. CONTINGENCIAS	56
3. RESTRICCIONES	61
4. A MODO DE RESUMEN	66
V. FUNCIONES	69
1. CAUSAS Y RAZONES	69
2. ¿FORMA O FUNCIÓN?	71
3. DIRECCIÓN Y ORDEN	75
4. A MODO DE RESUMEN	80
VI. CREATIVIDAD	82

1. LEYES	82
2. EMERGENCIA	90
3. A MODO DE RESUMEN	96
EPÍLOGO	98
BIBLIOGRAFÍA	100
JAVIER NOVO, RUBÉN PEREDA y JAVIER SÁNCHEZ-CAÑIZARES	104