REDES COMPLEJAS

REDES COMPLEJAS

Del genoma a Internet

METATEMAS

Libros para pensar la ciencia
Colección dirigida por Jorge Wagensberg

* Alef, símbolo de los números transfinitos de Cantor

Ricard Solé

REDES COMPLEJAS

Del genoma a Internet

TUSQUETS EDITORES

1.ª edición: enero de 2009

© Ricard Solé, 2009

Diseño de la colección: Lluís Clotet y Ramón Úbeda
Diseño de la cubierta: Estudio Úbeda
Reservados todos los derechos de esta edición para
Tusquets Editores, S.A. - Cesare Cantù, 8 - 08023 Barcelona
www.tusquetseditores.com
ISBN: 978-84-8383-117-5
Depósito legal: B. 52.646-2008
Fotocomposición: David Pablo
Impresión: Limpergraf, S.L. - Mogoda, 29-31 - 08210 Barberà del Vallés
Encuadernación: Reinbook
Impreso en España

Índice

P. 11 Agradecimientos

15 1. Retorno a Terra Incógnita
27 2. Menor imposible
49 3. El final de la geografía
75 4. Virus y epidemias
99 5. El agutí y el jaguar
129 6. Genomas, bricolaje y evolución
159 7. Cerebros y máquinas
191 8. Retorno a Babel
219 Epílogo

Apéndice
225 Referencias bibliográficas

A mi madre, Maria Solé,
que puso en mis manos mi primer libro,
La isla misteriosa, de Julio Verne,
con el que —sin saberlo entonces—
empezaba mi viaje sin retorno por el mundo de la imaginación.
Que me enseñó matemáticas en una pequeña pizarra
de aquel piso lleno de niños y abuelos
en el que pude navegar sin prisas
a través de una infancia feliz.
A todas aquellas noches en las que ya dormíamos
mientras ella continuaba tecleando sin cesar
en su máquina de escribir,
robándole horas al descanso
para que nosotros pudiéramos seguir soñando

AGRADECIMIENTOS

Muchas de las ideas que aparecen en este libro han surgido o se han inspirado en el Instituto de Santa Fe. Éste es un lugar singular, del que he tenido el privilegio de formar parte durante años como investigador, convirtiéndome así en miembro de una familia tan especial como única. El Instituto se encuentra en el Medio Oeste americano, en el estado de Nuevo México, en lo alto de una colina desde la que se ven algunas de las puestas de sol más asombrosas que puedan imaginarse. Aquí se citan científicos y pensadores procedentes de áreas muy diversas y el objetivo último es la búsqueda de las leyes que rigen la complejidad. Una complejidad que abarca todas las escalas, desde el mundo molecular hasta la sociedad o la historia. Entre sus miembros destacados figuran algunos premios Nobel, como Phil Anderson o el legendario Murray Gell-Mann. He disfrutado a lo largo de los años de las interacciones con muchos de estos compañeros de travesía, entre los que recuerdo en especial a los miembros de la tripulación de noche. Pero ¿qué se puede decir de un lugar en el que el guardia de seguridad nocturno tiene dos doctorados, crea música de vanguardia y te cuenta su infancia en Nueva York, cuando de niño pasaba horas en el estudio de Pollock? ¿En qué otro lugar del mundo te puedes encontrar en la biblioteca a Cormac McCarthy y hablar con él del colapso de las civilizaciones? A veces creo que el Instituto es un sueño hecho realidad, una especie de pliegue del espacio-tiempo en el que todo es posible. Mil gracias a este lugar de constante aventura in-

telectual y a su gente única por su activa vocación interdisciplinar y por acogerme a mí y a muchos de mis colegas durante estos años.

Este libro es una visión personal sobre la complejidad, basada en el estudio de las redes que conectan todo tipo de elementos, que definen sociedades, ecosistemas o cerebros. He sido muy afortunado de vivir los años de emergencia de la teoría de redes complejas y de contar con un grupo de colaboradores excepcional. Gracias a esta colaboración pudimos contribuir de forma sustancial a una nueva forma de estudiar los sistemas complejos y dejar nuestra impronta. Quiero mencionar especialmente a mis ex doctorandos Sergi Valverde (fui su padrino de boda) y José Montoya (fue mi padrino en la mía), con quienes he compartido tantas noches de insomnio, cine de madrugada, complicidad y algunas aventuras inconfesables. A los demás miembros actuales del Laboratorio de Sistemas Complejos, Andreea Munteanu, Martí Rosas, Bernat Corominas-Murtra, Javier Macía, Carlos Rodríguez-Caso, Josep Sardanyes y Stefanie Widder. Es un privilegio trabajar con vosotros. Uno para todos y todos para uno.

Muchas personas que se han cruzado en mi camino han dejado alguna huella que de una forma u otra se refleja en alguna parte del libro. Estoy especialmente en deuda con Brian Goodwin y Stuart Kauffman, colegas, maestros y amigos de los que he aprendido muchas cosas. También con mis colegas del primer Grupo de Sistemas Complejos, con quienes exploré mis primeras redes complejas: Jordi Bascompte, Susanna Manrubia, Jordi Delgado y Bartolo Luque. Cuesta creer, mirando hacia atrás (a veces con nostalgia), que hubo un tiempo en que nadie creía en nosotros, en que compartíamos un despacho los cinco y en que no conseguíamos ninguna financiación. Gracias por haber sido tan suicidas como para poner en peligro vuestro futuro para venir a trabajar conmigo. Mil gracias también a las personas que han leído con mente crítica (pero bondadosa) partes de este libro: Oriol Vall, Pablo Villoslada, Bernat Corominas y especialmente a mi mujer, Elisabetta, quien leyó con cariño y ojo crítico todo el documento y me ayudó a mejorarlo (y mucho).

Las primeras palabras e ideas que dieron forma a esta obra se iniciaron en un pueblecito del Pirineo catalán llamado Farrera. El pueblo aloja un Centro de Arte y Naturaleza en el que pasamos una semana única en compañía de poetas y artistas. Tengo un recuerdo especialmente grato de aquellos días y de la cálida acogida de Cesca Gelabert y Lluís Llobet. Espero que el libro os guste y que podamos hablar de nuevo de literatura y cine o de Joan Brossa alrededor de una cena deliciosa. Y también agradezco a Josep Maria Ventosa su esfuerzo en la edición, que ha mejorado el resultado final.

Éste es un libro acerca de las redes y de cómo han transformado nuestras vidas y nuestra forma de obtener y manejar información. Estoy también en deuda con miles de personas anónimas que han construido en la red virtual el sueño de la inteligencia: Wikipedia, una biblioteca cuyo horizonte se expande cada día. Wikipedia no sólo me ha sido de gran ayuda, sino que, navegando a través de sus páginas, me ha descubierto rutas que desconocía y que han mejorado muchos aspectos de este libro.

Finalmente (pero no en último lugar), a Elisabetta y Joel, por todas las horas arrebatadas y deseando que este libro os guste.

1
Retorno a Terra Incógnita

> No hay nada menos real que el realismo. Los detalles confunden. Sólo mediante la selección, eliminación y el énfasis podemos llegar al verdadero significado de las cosas.
>
> Georgia O'Keeffe

> Nuestra comprensión del mundo está formada por innumerables capas. Cada una merece ser explorada, siempre que no olvidemos que es una entre muchas. Saberlo todo sobre una capa no nos dirá gran cosa acerca del resto.
>
> Erwin Chargaff

Mapas de la realidad

El cuadro de Vermeer de Delft que acompaña estas líneas nos muestra a un cartógrafo mirando a través de la ventana de su estudio, levemente inclinado sobre sus mapas mientras sostiene en la mano derecha un compás. Su mirada parece buscar algo a lo lejos, tal vez la línea del mar en el horizonte. Su rostro está iluminado por aquella luz única que el maestro holandés dominó como pocos, y fue pintado hacia 1668, en un momento en el que la cartografía gozaba de un enorme prestigio y Holanda destacaba en la ejecución de mapas detallados. El descubrimiento del Nuevo Mundo abrió las puertas al comercio pero también a la imaginación. No en vano las páginas de los mapas de aquellas tierras aún inexploradas es-

taban llenas de espacios en blanco con el enigmático nombre de «Terra Incógnita». Aquellos espacios estaban habitados —o así decían los que volvían de sus confines— por criaturas extraordinarias que desafiaban la imaginación. El mundo del siglo XVII estaba dominado por la geografía, por la distancia y sus esclavitudes. Un viaje a caballo de Barcelona a Madrid podía durar semanas y cruzar el Atlántico en barco era una auténtica aventura de la que uno nunca estaba seguro de volver. Barcos enteros podían desaparecer, tragados por un mar violento plagado de monstruos. Más allá del límite marcado por los mapas del mundo conocido estaba el telón de las sombras del que, se decía, ningún ser humano había regresado jamás.

Cuando Vermeer pintó el que se convirtió en uno de sus más famosos cuadros, el mundo era un lugar convulso y en cambio permanente. Si pudiéramos viajar en el tiempo y mirar a través de cualquier ventana de un hogar de la Europa de aquella época, ¿qué veríamos? Vermeer y sus contemporáneos fueron testigos de cambios trascendentales en la historia del mundo. Si nos asomáramos a la calle desde una ventana de Londres, veríamos tal vez una ciudad devastada por el paso de la peste, que acabó con la vida de la quinta parte de sus habitantes, en el que fue uno de los últimos golpes después de trescientos años de propagarse de punta a punta del viejo continente. En aquellos años, las ideas de René Descartes acerca de la sede del alma se debatían en toda Europa, y el conocimiento de la naturaleza y del hombre estaba en plena ebullición. La revolución darwiniana estaba aún muy lejos en el futuro, pero el camino hacia la comprensión del mundo a través del método científico se abría paso con rapidez.

Pero detengámonos de nuevo en el cuadro y en su personaje central. El rostro del cartógrafo ha sido asociado a un célebre coetáneo de Vermeer, el científico Anton van Leeuwenhoek, a quien debemos la invención del microscopio. Ambos vivían en la ciudad de Delft, en la que habían nacido el mismo año y no es sorprendente que ambos compartieran intere-

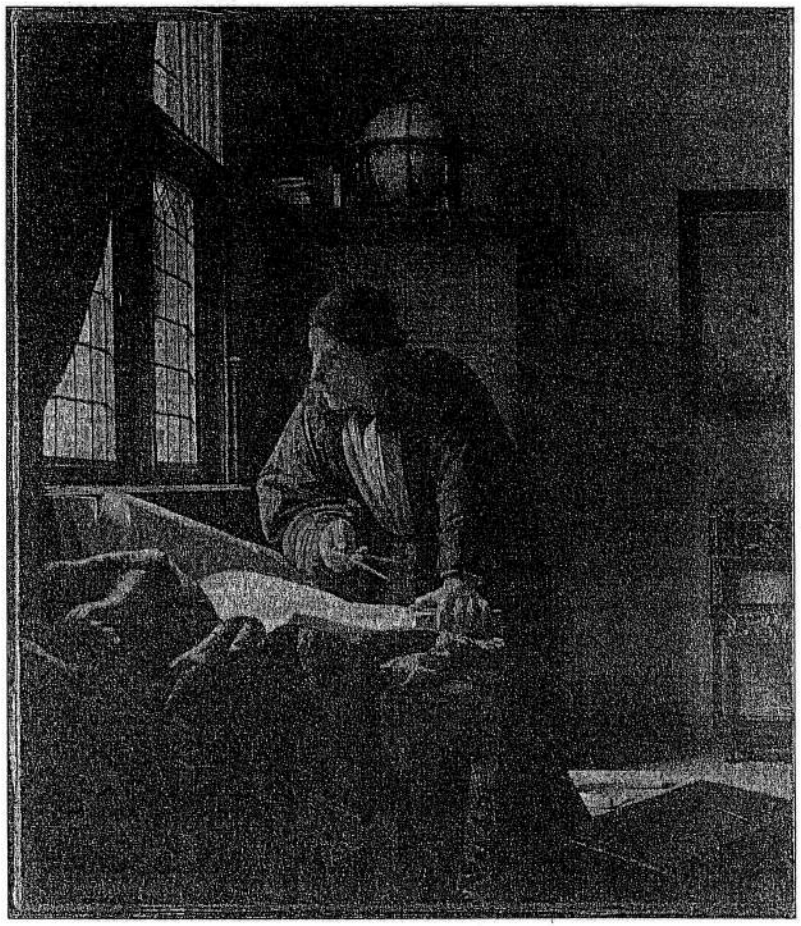


Figura 1.1. El geógrafo, cuadro de Vermeer pintado hacia 1668 y que tuvo como modelo, muy posiblemente, al científico Anton Van Leeuwenhoek. Städel Museum. Frankfurt del Meno. Fotografía: Städel Museum - Artothek.

ses comunes en ciencia y arte. Algunos estudiosos creen que el cuadro fue de hecho un encargo del mismo Leeuwenhoek. En cualquier caso, sabemos que este último actuó como ejecutor del testamento de Vermeer. Leeuwenhoek revolucionó la biología con la introducción del microscopio. Este instrumento brindaba la posibilidad de observar el mundo a una escala antes inaccesible, y la visión que ofrecía era sorprenden-

te. Los organismos vivos se componían de pequeñas unidades básicas e incluso una gota de agua, aparentemente inerte, estaba llena de formas de vida nunca vistas hasta entonces. A lo largo de aquellos años Leeuwenhoek descubrió los glóbulos rojos de la sangre, los capilares y la existencia de las bacterias. Pero lo más importante en esta historia es la observación de una nueva unidad básica de la vida: la célula. Lo vivo adquiría así una nueva dimensión: la existencia del mundo celular sugería que, al igual que los átomos de la materia, la materia viviente también poseía unos ladrillos mínimos con los que se construían árboles, peces o seres humanos. El estudio de la vida experimentó un giro de 180 grados y, sin saberlo, Leeuwenhoek y otros científicos, como Robert Hooke, sentaron las bases para el estudio de la vida a partir de sus unidades fundamentales. Mediante sus estudios, estos científicos pusieron en duda la hipótesis reinante sobre la generación espontánea, que afirmaba que la vida podía aparecer sin más a partir de la materia inerte. Por ejemplo, las moscas surgían espontáneamente de la carne en descomposición o los ratones (literalmente) del trigo húmedo. El holandés comprobó por sí mismo que centenares de pequeños organismos surgían del interior de huevos minúsculos que escapaban a la percepción del ojo desnudo.

El microscopio iba a ser no sólo un avance gigantesco hacia el conocimiento de lo pequeño, sino también la primera piedra hacia una nueva forma de comprender el mundo, dominada por la visión analítica de la complejidad. Una visión en la que comprender un sistema pasaba por descomponerlo en sus partes mínimas y capaz de expandir nuestra comprensión de la realidad en la dirección de lo pequeño, con lo que se iniciaba a su vez la cartografía del mundo microscópico. El método resultante, que se ha dado en llamar (a menudo despectivamente) «reduccionista», nos propone la idea de entender un sistema a través de una disección meticulosa de sus partes como entidades aislables. Entender el funcionamiento de estas partes era condición necesaria y suficiente para

después extrapolar y deducir el funcionamiento del sistema completo.

El reduccionismo dominó la visión científica durante la mayor parte de la historia de la ciencia y alcanzó su punto álgido durante el siglo XX, con la aparición de la biología molecular y la física de partículas. Su papel en el desarrollo de la ciencia moderna es innegable y muy probablemente fue una etapa necesaria en nuestro conocimiento del mundo. Nos beneficiamos en gran medida de los avances de la física gracias a que esta disciplina, como ninguna otra, alcanzó un grado de exactitud asombroso en su descripción matemática de la realidad y a que esta descripción se basó, en gran medida, en una adecuada representación de la materia basada en la estructura atómica y subatómica de la misma. Y no es menos cierto que la misma aproximación ha permitido acceder a la estructura de las macromoléculas biológicas y a la lógica de sus funciones. Del mismo modo, los nuevos desarrollos en el campo de las llamadas teorías de cuerdas nos ofrecen la posibilidad de alcanzar el sueño de Einstein: una teoría unificada de todas las interacciones fundamentales. Cuando se logre, poseeremos una nueva imagen del cosmos con dimensiones ocultas, universos múltiples y tal vez respuestas inesperadas a viejas preguntas acerca del origen de la materia, la energía y el propio universo. Toda una hazaña intelectual de enormes consecuencias. Pero enfrentada a la complejidad, esto es, al comportamiento de sistemas formados por múltiples elementos en interacción, ya sea la sociedad, el cerebro, un ecosistema o simplemente una célula viva, la aproximación reduccionista falla por completo. Al intentar comprender fenómenos a escalas superiores a partir de escalas inferiores topamos con una realidad en la que las interacciones entre elementos crean nuevos fenómenos. Es este poder creativo del intercambio de información lo que hace al mundo tan interesante y complejo.

La idea de entender los sistemas a partir de sus elementos básicos es indudablemente atractiva. De hecho parece casi natural, y con la llegada de la física cuántica todo parecía sugerir que una buena teoría de la realidad podría extraerse a partir de las propiedades de la materia en su escala más íntima. El matemático Paul Dirac afirmó que con la ayuda de la mecánica cuántica, la química se reduciría a la física como un mero caso particular de esta última. Podríamos seguir extrapolando con facilidad hacia arriba: la biología como un caso especial de la química o la sociedad como una configuración especial de lo vivo. La física permitiría de esta forma elaborar una «Teoría de Todo» (TDT) como a algunos les gusta afirmar. Empleando las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de materia y energía al nivel microscópico, podríamos aspirar —nos dicen los proponentes de la TDT— a comprender todos y cada uno de los fenómenos del mundo real. ¿Es ésta una afirmación razonable? Lo cierto es que pese a lo mucho que se ha avanzado desde la construcción de la teoría cuántica, su capacidad de explicar fenómenos químicos se ha revelado lamentablemente pobre, por no hablar de su casi nulo papel en biología. En este sentido, los genetistas y biólogos moleculares, por citar un ejemplo, han desarrollado un vasto cuerpo de conocimiento acerca del ADN y su evolución que apenas tiene nada que agradecer a la mecánica cuántica.

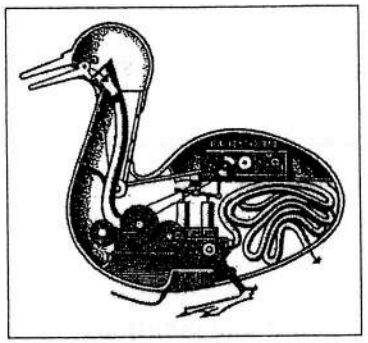
Lo complejo nos rodea y forma parte de nosotros. ¿Qué define esta complejidad? Ésta es una pregunta difícil, pero podemos responderla de manera bastante general. De una parte, la ya mencionada presencia de propiedades emergentes, que no pueden explicarse acudiendo a las propiedades de los componentes. De otra, la existencia de cierta invariancia del todo pese a los cambios y fluctuaciones en sus partes. Aunque hormigas o neuronas puedan morir o fallar, ni el hormiguero ni el cerebro se darán por enterados. Sus propiedades e identidad como sistema se mantienen. Lo que define a ambos sistemas no es la presencia o ausencia de ciertas partes, sino algo que las trasciende, un orden de nivel superior que no podemos comprimir. Este orden irreducible es la esencia de lo complejo: si intentamos explicarlo mediante aquello que tiene lugar en una escala inferior, nuestra comprensión simplemente se evapora. El origen de esta irreductibilidad reside en la presencia de interacciones entre elementos. Todo sistema complejo posee elementos que, en una forma u otra, intercambian información entre sí a través de algún medio. Este flujo de información es generado por los elementos constituyentes, y a su vez cambia el estado de los últimos, en un círculo lógico que no podemos romper.

La naturaleza nos ilustra constantemente acerca de la presencia de este orden irreducible (figura 1.2). Un ejemplo especialmente claro nos lo dan los insectos sociales. Tomemos las termitas. En las sabanas de África, los termiteros pueden alcanzar varios metros de altura, en cuyo interior una compleja estructura de galerías conecta distintos niveles entre sí mediante un sistema de refrigeración sofisticado. Los individuos que han construido estas estructuras son extraordinariamente pequeños si los comparamos con el tamaño de sus nidos, que pueden tener diez mil veces el tamaño de una termita y una altura de hasta seis metros. Si el tamaño de las termitas fuera el de un ser humano, el termitero equivalente alcanzaría varios kilómetros de altura, desafiando cualquier catedral existente en grandeza y dimensiones. Armados por la visión reduccionista, concluiríamos con facilidad que los individuos de la colonia poseen algún tipo de conocimiento acerca del termitero. Algo así como los obreros que construyen un edificio ayudados de planos pero sobre todo de una intención y un conocimiento previo ya definidos. Pero la realidad es que estos obreros carecen de cualquier conocimiento general del sistema y desconocen la existencia de cualquier plano o diseño. Las termitas son de hecho ciegas y —desde nuestra perspectiva— bastante estúpidas. Por más

horas que nos pasáramos estudiando el comportamiento de individuos aislados, no llegaríamos a comprender cómo surge la complejidad a nivel de la colonia. El termitero que se alza en mitad de la sabana es el resultado de la *inteligencia colectiva* de toda la colonia. Sin un plan de trabajo predefinido ni jerarquía, la colonia es capaz, a partir de la información mínima intercambiada por sus componentes, de construir estructuras que desafían el diseño óptimo de cualquier estudio de arquitectura.

Un ejemplo distinto, pero relacionado con el anterior, nos lo da el cerebro. La mente es capaz de hazañas asombrosas, entre las cuales se encuentra nuestra capacidad de memorizar. Recordar el pasado es un atributo de los seres humanos que marca una diferencia fundamental con otras especies. Situamos en el presente, pero también en el pasado e incluso en el futuro. ¿Cuál es el origen de la memoria? Y si reside en alguna parte, ¿dónde se halla? Durante siglos se especuló acerca de su naturaleza y su posible localización física y el rápido desarrollo de las neurociencias arrojó mucha luz acerca de los mecanismos moleculares implicados en ésta. Así, pudo saberse que parte de la respuesta a nuestra pregunta residía en las conexiones entre neuronas. El estímulo repetido procedente de una señal externa puede afectar a una de estas conexiones de forma que la repetición se convierta en una marca permanente. Esta marca molecular permite en una nueva ocasión identificar con rapidez la señal «aprendida».

En experimentos con organismos simples (como ciertos tipos de invertebrados) en los que los circuitos neuronales son de escasa complejidad, es posible trazar el rastro que las señales han dejado en el individuo y observar cómo algunas neuronas han sido modificadas de forma que respondan con mayor facilidad a un estímulo anterior. Pero la memoria compleja, aquella que nos permite reconocer un rostro o recordar un lugar o una situación, no reside en neuronas individuales ni tiene explicación directa en el dominio de lo celular o molecular. Por el contrario, los recuerdos son el resultado de la actividad coordinada de decenas de miles de neuronas que inter-



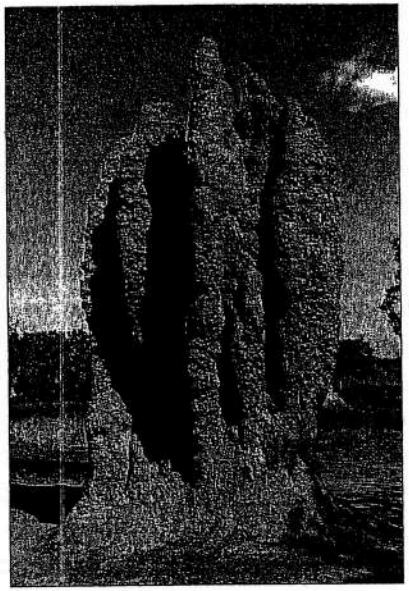


Figura 1.2. Reduccionismo y emergencia. La visión cartesiana del mundo imaginaba todo sistema como reducible a un conjunto de partes independientes que definirían una máquina, algo así como un autómata (a la izquierda, la ilustración muestra el célebre ánade de Vaucauson). Las construcciones llevadas a cabo por las termitas (derecha) ilustran a la perfección la existencia de propiedades emergentes. Si bien los individuos carecen de la capacidad de diseñar o construir estas estructuras, el superorganismo formado por la colonia sí posee esta capacidad. (Fotografía reproducida por cortesía de Brian von Yee Yap.)

cambian señales entre sí. Y algo similar ocurre con otras propiedades que emergen de la actividad cerebral. Entre todas ellas, destaca la conciencia como el fenómeno más interesante. Aunque todos sabemos lo que es, resulta difícil de explicar y todo indica que se trata de un atributo esencialmente humano, posiblemente ligado al lenguaje y a una expansión extraordinaria experimentada por la corteza cerebral. De formas que aún ignoramos, las redes neuronales que de manera constante cambian en el interior de nuestro cráneo dan sentido al mundo externo y nos permiten interrogar a la naturaleza en busca de respuestas.

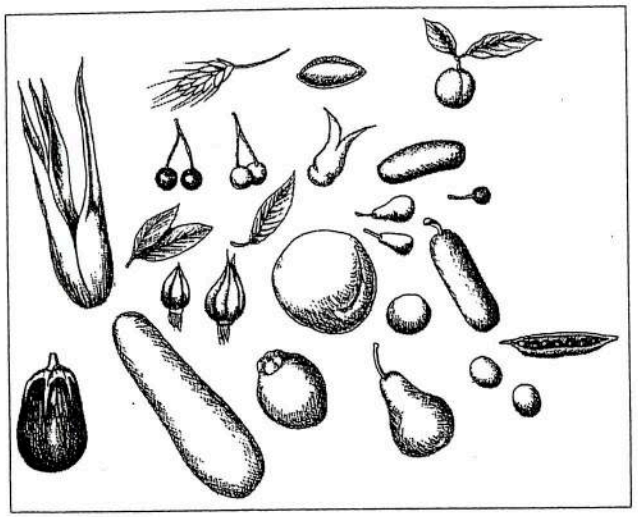


Figura 1.3. Un conjunto de objetos de naturaleza vegetal... ¿qué nos dice? (Dibujo de Ricard Solé.)

El orden que vemos a la escala de la colonia de termitas, en el cerebro o en el desarrollo de un organismo es un orden irreducible: no lo podemos descomponer en pequeñas piezas como un puzle. El todo es más que la suma de las partes o, quizá más apropiadamente, el todo es distinto de la suma de las partes. Para situar esta idea con claridad, observemos por un momento el dibujo de la figura 1.3. Nos muestra un conjunto de elementos vegetales que parecen no tener ninguna relación especial entre sí. Parece de hecho una colección bastante arbitraria de objetos, que no evocan en nosotros ningún tipo de idea o imagen más allá de lo que cada objeto nos recuerda o sugiere. Y sin embargo, combinados de la forma adecuada, el resultado puede ser enormemente sugestivo. Si unimos los elementos de nuestra colección de vegetales y lo hacemos de la forma adecuada, obtenemos una imagen clara de una cabeza (figura 1.4) en la que un rostro bien definido es inmediatamente identificado por nuestro cerebro. Lo que le da este significado es el conjunto de interacciones y cómo éstas forman un mapa adecuado que nos evoca un rostro. Es

Figura 1.4. Inspirada en el cuadro de Archimboldo *El verano* (pintado hacia 1573), la imagen nos muestra una cabeza humana obtenida por combinación del conjunto de elementos de la figura anterior. (Dibujo de Ricard Solé.)

muy posible que un conjunto distinto de frutas, colocadas de un modo similar, dieran el mismo resultado. En este sentido, podemos representar el cuadro (nuestro «sistema») mediante una red que relaciona en el espacio los componentes dispersos. Sin la red, que nos dice quién está en contacto con quién, el sistema carece de sentido.

La lección que obtenemos de los ejemplos anteriores, y de otros que veremos a lo largo del libro, es que lo complejo tiene mucho más que ver con la naturaleza de las interacciones que con la naturaleza de los objetos que interaccionan, aunque estos últimos imponen algunas limitaciones sobre lo que puede ocurrir en el siguiente nivel. Comprender la complejidad requiere abandonar el enfoque analítico por una forma de mirar a la realidad en la que añadimos un elemento esencial: el mapa de conexiones entre elementos. Necesitamos este mapa para dar sentido al mundo.

Redes y mapas

El mundo anterior a la llegada de la comunicación a distancia, a la que estamos tan habituados, sólo podía imaginarse a través de los ojos de los cartógrafos. Cualquiera podía recorrer con el dedo uno de aquellos mapas hasta llegar a un espacio en blanco. Más allá de aquellos límites nada era seguro. Los espacios en blanco eran el dominio del pensamiento, dado que nadie los había alcanzado aún. Algo parecido a lo que ocurre en ciencia: el conocimiento acumulado por generaciones de investigadores traza un mapa de lo conocido cuya geografía podemos recorrer con mejor o peor fortuna. Pero en algún momento alcanzamos sus límites y el viaje de verdad comienza. En esencia, la búsqueda del conocimiento científico reside en aventurarse por esos caminos inexplorados. Al alcanzarlos, nos damos cuenta de que nadie ha trazado los contornos de las costas por las que nos movemos y nadie nos puede decir qué encontraremos en nuestra travesía. Con suerte, añadiremos algunos trazos al mapa inicial y así otros podrán aventurarse aún más lejos. Tal vez nuestro descubrimiento sea modesto pero esencial para desbloquear un camino que permanecía cerrado. Si tenemos mucha suerte, podemos llegar a una playa llena de tesoros que ni tan sólo imaginábamos. Bajo un nuevo sol, desenterramos de la arena teorías y visiones inesperadas, que nos abren la puerta a un mundo nuevo.

Una de estas visiones es la que se presenta en este libro. Está basada en una nueva cartografía de la complejidad que habita un espacio de muchas dimensiones y ha sido trazada gracias a los esfuerzos de un gran número de científicos procedentes de distintas disciplinas. Una nueva forma de establecer mapas que conectan ciudades pero también individuos, moléculas, especies o neuronas. Que nos enseñan a pensar de un modo distinto y que definen los verdaderos mapas de la realidad, llenos de sorpresas y de nuevos espacios en blanco.

2
Menor imposible

> Nunca estamos infinitamente lejos de aquellos a los que odiamos. Por la misma razón, podríamos creer que nunca estaremos lo bastante cerca de aquellos que amamos.
>
> Albert Sánchez Piñol, *La piel fría*

> Toda persona es una nueva puerta que se abre a otros mundos.
>
> John Guare, *Seis grados de separación*

> El comportamiento humano individual es impredecible, pero las reacciones de las masas humanas pueden ser tratadas de forma estadística. Cuanto mayor es la masa, mejor es la predicción alcanzable.
>
> Isaac Asimov, *Fundación*

Conectados

En uno de sus relatos breves de ciencia ficción, titulado «El ruido de un trueno», Ray Bradbury describe un futuro en el que es posible viajar al pasado para experimentar sensaciones tan fuertes como cazar un tiranosaurio. Sin embargo, dado que alterar el pasado implica la posibilidad de modificar el futuro (algo que debe evitarse a toda costa), la caza debe organizarse de tal modo que nada pueda ser cambiado. El dinosaurio es elegido previamente, y seleccionado con enorme cuidado por la compañía de cronoviajes. Se elige un ejemplar que va a morir de forma inminente (ahogado en un pantano, muerto por un rayo u otro fenómeno fortuito) y se lleva al cazador al momento justo anterior al suceso ya inevitable.

De esta forma, aunque el cazador dispare al animal y lo mate, el hecho no cambiará nada de lo que ya debía ocurrir de forma natural. Sólo hay que recoger los casquillos de las balas y —muy especialmente— procurar no alterar nada en absoluto. Aunque la tecnología permite en esta ficción un viaje al Mundo Perdido, nadie sabe con certeza qué podría generar un fenómeno irreversible que trastocara el futuro.

Como en toda buena historia, las cosas no salen como deberían y uno de los cazadores se sale del camino marcado y pisa sin querer una mariposa. Los acontecimientos tienen lugar en Estados Unidos, poco después de unas elecciones presidenciales en las que el candidato perdedor, un tal Deutscher (atención al toque germano) ha perdido frente a su rival, un tal Keith. Uno de los personajes de esta historia muestra su alivio por el resultado: «Si Deutscher hubiera ganado, tendríamos la peor clase de dictadura». Pero al regresar a su época, el pequeño contratiempo ha generado una onda de cambio que ha terminado afectando al destino de su sociedad y al resultado de las elecciones. El temible Deutscher ha ganado y el país se encamina hacia una dictadura. La pequeña mariposa, señala un personaje de este relato, «podía alterar equilibrios y derribar una fila de pequeñas fichas de dominó, y luego grandes piezas de dominó, y luego dominós gigantes, a lo largo de años y a través del tiempo».

La literatura y el cine han jugado muy a menudo con situaciones similares, todas ellas planteando de una forma u otra la pregunta clave: «¿qué pasaría si...?», con la que nuestros pensamientos se entretienen a menudo, ya sea en relación con grandes asuntos (¿qué habría ocurrido si Hitler hubiera ganado la segunda guerra mundial o si, por el contrario, hubiera muerto de niño, o en uno de los atentados que pretendían acabar con su vida?) o con los más mundanos (¿qué habría pasado si hubiera estudiado la otra carrera que deseaba hacer?). Una de las cuestiones clave es hasta qué punto un pequeño cambio puede provocar grandes efectos: ¿es posible que detenernos a tomar un café en un bar en lugar de otro, un

día cualquiera, pueda modificar en absoluto el futuro? ¿Es posible que cualquier elección modifique el curso de nuestras vidas, e incluso la de los demás? De un lado, la mayoría de los acontecimientos diarios se nos antojan triviales. De otro, es difícil imaginar que pequeños efectos que nos afectan personalmente puedan tener trascendencia más allá de nuestra propia existencia. Esto es particularmente cierto cuando pensamos en el relato de Bradbury: ¿podría un pequeño accidente generar una cascada de cambios que afectara a la propia estructura de la sociedad y su evolución?

Un buen motivo para creer que los acontecimientos muy pequeños pueden ser irrelevantes tiene que ver con la percepción de nuestro entorno social y la capacidad de influir en él. Quien posea el control de un gran medio de comunicación dispone de la oportunidad de alcanzar a muchos individuos. Por el contrario, un ser humano cualquiera parece condenado a quedar en segundo plano, ya que sólo dispone de un número limitado de relaciones que lo conectan con la red social. ¿Cómo influir en nada si apenas podemos comunicarnos con un puñado de sus elementos? Esta cuestión ha sido formulada en muchas ocasiones en el pasado, y es importante en nuestra comprensión no ya de la historia, sino de cómo la historia se desarrolla y con qué leyes. Aunque gran parte del relato histórico que encontramos en los libros hace referencia a algunas figuras fundamentales como responsables últimos del devenir de la sociedad de su tiempo, muchos se han cuestionado este punto de vista. Las preguntas clave provienen de una dicotomía entre una historia que depende de las decisiones tomadas por unos pocos individuos y otra en la que los acontecimientos clave serían inevitables. ¿Cuál de las dos es correcta? La respuesta a esta pregunta podría obtenerse del análisis de la arquitectura de la complejidad social. Como veremos, su entramado posee propiedades inesperadas que nos conectan entre sí más allá de lo que nunca sospecharíamos.

Nuestra percepción del tejido de la sociedad está fuertemente limitada por nuestras relaciones cotidianas con amigos, compañeros de trabajo o simplemente conocidos. Éstos forman aquella parte de la sociedad con la que estamos directamente relacionados y definen en gran medida lo que denominaríamos nuestro entorno social. Podemos imaginar estas relaciones como conexiones dentro de una red: los nodos de la red son individuos y las conexiones entre éstos indican que existe un vínculo social (figura 2.1). Estableciendo conexiones de esta forma, podríamos en principio trazar una malla de relaciones entre todos los individuos de una sociedad. Sería una red con millones de elementos, pero cada uno de ellos sólo se conectaría con una pequeña cantidad de individuos. Así pues, aquellos que no están conectados con nosotros son, en un grado mayor o menor, extraños. Y sin embargo, pese a toda esta extrañeza, el mundo parece en ocasiones más pequeño de lo que debería. ¿Quién no se ha encontrado alguna vez, sentado a su lado en un avión o un tren, a un extraño que resulta ser amigo de aquel compañero o compañera de instituto? O tal vez descubrimos que nuestro vecino conoce al mejor amigo de un famoso escritor. En esos casos la frase manida es «el mundo es un pañuelo», pero también aquello de «qué pequeño es el mundo». Lo decimos sin reflexionar demasiado, creyendo que somos simplemente víctimas de la casualidad.

Este tipo de experiencia puede parecer poco más que una anécdota sin mayor importancia, pero de hecho es algo muy real y de gran trascendencia. Si nos preguntamos acerca de lo lejos que estamos de los demás dentro de la red social, la respuesta llama la atención. Los primeros indicios que llevaron a descubrir la existencia de un mundo pequeño los obtuvo el sociólogo Stanley Milgram hacia 1960. En aquella época, Milgram era profesor en la Universidad de Harvard y se planteó un experimento muy simple basado en el empleo del correo

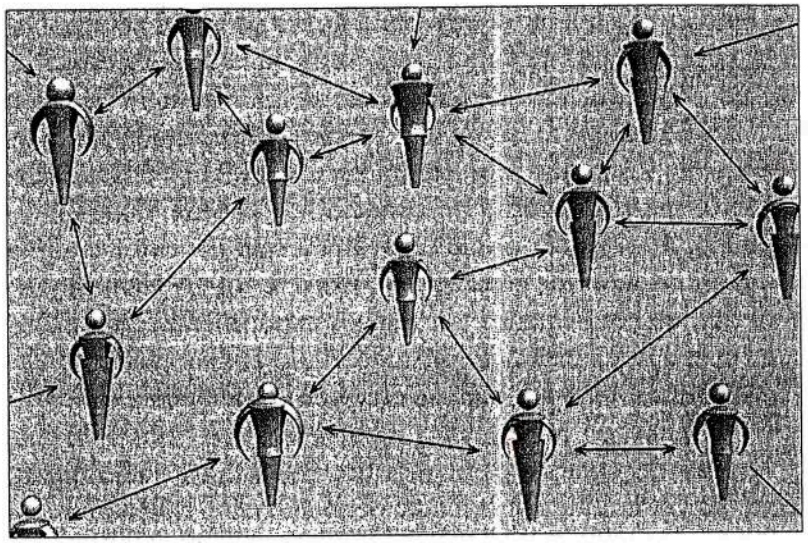


Figura 2.1. ¿Qué estructura tiene la trama de las relaciones sociales? Nuestra percepción cotidiana de éstas nos sugiere que su naturaleza es local: sólo estamos conectados con una pequeña parte del total de la sociedad y la inmensa mayoría de sus individuos parecen completamente extraños. (Dibujo de Ricard Solé.)

ordinario. La idea era escoger a una persona como destinatario (en el experimento un corredor de Bolsa que vivía en la Costa Este de Estados Unidos, cerca de Boston) y proporcionar cierto número de cartas a un grupo de remitentes, en este caso personas que vivían en Omaha (Nebraska), en el centro del país, con la única información del nombre, profesión y área geográfica del individuo elegido. Por supuesto, ninguna de las personas elegidas lo conocía personalmente, pero la idea residía precisamente en el alcance de ese desconocimiento. Se pedía a los elegidos para el experimento que entregaran el sobre a alguien de su entorno que pudiera (por motivos profesionales o geográficos) «acercar» la carta a su meta. Estos individuos serían el primer salto en la red. El nuevo receptor de la carta debería a su vez pasarla a otra persona y así sucesivamente. Cuando Milgram preguntó a un amigo cuántos intercambios de cartas creía que serían nece-

sarios para completar el trayecto a través de la red social, éste respondió que tal vez «unos cien» sería una buena estimación. Sin embargo, cuando el experimento se hubo completado (con algunas cartas perdidas de por medio), el resultado fue sorprendente: las cartas sólo habían necesitado unos cinco intercambios para alcanzar al desconocido de Boston. Cinco individuos intermedios, lo que equivalía a seis conexiones en la red o «seis grados de separación». Estos resultados fueron posteriormente confirmados por nuevos experimentos realizados algo después, en esta ocasión conectando ambas costas de Estados Unidos. Una vez más, se obtenían entre cinco y siete saltos. Así pues, en un país de millones de habitantes sólo seis apretones de mano separaban a dos individuos cualesquiera entre sí. Un mundo ciertamente pequeño, en el que nadie está demasiado lejos de nadie (si excluimos de nuestra lista a ermitaños y otras personas aisladas del mundo) y en el que la información, rumores o virus pueden propagarse con mucha mayor facilidad de lo que en principio sospecharíamos.

El trabajo de Milgram tuvo un gran impacto e inspiró incluso una obra de teatro titulada *Seis grados de separación* (y más tarde una serie de televisión con el mismo nombre). Fue el inicio de un cambio en la visión del tejido de la sociedad que terminó desencadenando toda una revolución. Pero primero era necesario comprender la naturaleza del fenómeno. Y como suele ocurrir muy a menudo en ciencia, la respuesta llegó a partir de una pregunta distinta y aparentemente alejada de nuestro tema. Antes sin embargo nos detendremos para ver hasta dónde habían llegado los matemáticos en el estudio de las redes. En particular uno de ellos, uno de los más grandes matemáticos del siglo XX y uno de los más despistados.

Mi mente está abierta

Las redes, o «grafos», han sido un campo de investigación muy activo entre los matemáticos. Durante siglos, éstos han

estudiado sus propiedades en busca de leyes generales y teoremas elegantes. Un grafo es una representación abstracta de un sistema cualquiera, en el que los elementos del sistema o «nodos» se relacionan entre sí mediante conexiones que indican la presencia de una interacción. Un tipo de grafo que recibió especial atención es el grafo aleatorio, en el que las conexiones entre elementos se han llevado a cabo siguiendo algún tipo de proceso aleatorio. Por ejemplo, según una analogía que propuso Stuart Kauffman, imaginemos un sistema formado por un conjunto de botones que deseamos atar entre sí mediante hilos (figura 2.2). Estos botones serán los nodos de nuestra red y los hilos las conexiones. Tomemos cada par de botones y supongamos que los conectamos con cierta probabilidad, digamos de 1/6. Así pues, en promedio uno de cada seis pares de botones terminarán atados entre sí mediante un hilo. Para decidir si tenemos conexión o no, basta con que lancemos un dado y, si sale un seis, atamos los botones y si no, no lo hacemos. En general, podríamos emplear un sistema cualquiera que nos permitiera conectar cualquier par de elementos con cierta probabilidad (como sacar una bola negra de un conjunto de C bolas blancas, con lo que la probabilidad de conexión sería simplemente 1/C). Si aplicamos esta regla a todos los pares, terminaremos con una red aleatoria. Esta red es —reconozcámoslo— un poco aburrida. Al terminar el proceso, tenemos un grafo enmarañado (figura 2.3). Pero a pesar de su aparente falta de interés, es un sistema simple que ha servido de modelo de referencia durante décadas como fuente de inspiración para los teóricos de la complejidad. Enseguida veremos por qué.

Hacia 1950, Paul Erdös, un matemático húngaro que contribuyó de manera extraordinaria al desarrollo de este campo, exploró esta clase de grafos. Erdös fue un investigador prolífico que dejó más de mil quinientos artículos científicos como legado en diversas áreas de la matemática discreta, el análisis y la teoría de probabilidades. Colaboró con cientos de colegas matemáticos a lo largo de una dilatada y creativa vida y

lo hizo a su manera. Aunque emigró a Estados Unidos (bajo la amenaza de la persecución nazi), gracias al apoyo de la Universidad de Princeton, Erdös nunca encajó con el prototipo de profesor universitario sentado en su despacho haciendo cálculos. Todo lo contrario: desde su llegada a Princeton, inició una costumbre que conservó a lo largo de toda su vida, y se convirtió en una especie de nómada que visitaba a colegas matemáticos de todo el mundo. Lo hacía llevando consigo únicamente sus maletas y la visita terminaba cuando el problema que Erdös quería resolver había sido resuelto. Su estilo de vida era más propio de un vagabundo, pero su personalidad era encantadora y todos sus colaboradores le apreciaban enormemente. Su sofisticación como matemático contrastaba con la sencillez de su carácter y su desinterés por las normas sociales y el dinero, que solía emplear para ayudar a otros. Su capacidad para desarrollar ideas fue resumida por su colega Renyi: «Es una máquina de convertir café en teoremas», que resolvía mientras caminaba sin cesar. En un vuelo de Australia a Los Ángeles, estuvo paseando arriba y abajo por el pasillo del avión, gesticulando y hablando para sí ante la mirada sorprendida de los pasajeros. Sus despistes eran legendarios. Mientras era huésped en el hogar de Louise y Ernst Straus en Princeton (Ernst Straus era asistente de Einstein), inundó en varias ocasiones la casa al olvidarse de cerrar los grifos del baño, y solía llamar a sus colegas matemáticos para que vinieran a visitarlo. La señora Straus lo recuerda así: «Nunca nos preguntaba si queríamos más huéspedes».

La red que estudió Erdös es muy homogénea: todos sus elementos tienden a estar conectados con un número muy similar de conexiones y este número es poco variable. Si contáramos la frecuencia con la que se dan los elementos con una, dos, tres o cualquier número de conexiones, y dibujáramos estas frecuencias en una gráfica, obtendríamos como resultado una distribución con un pico bien definido (figura 2.3). Podemos ver que la gran mayoría de los botones tienen la misma conectividad media, mientras que es muy difí-

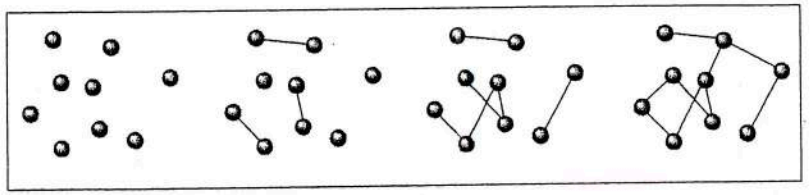
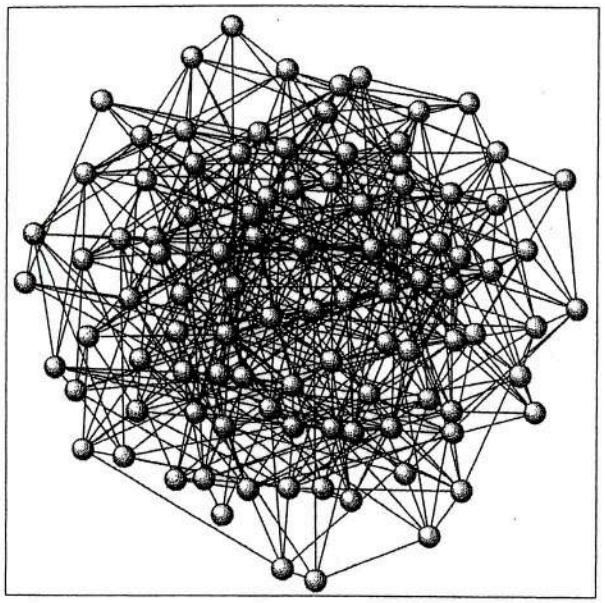


Figura 2.2. Cómo construir una red aleatoria. Partiendo de un conjunto de elementos sin conectar (izquierda) añadimos, hacia la derecha, cada vez más conexiones. Éstas se deciden al azar entre cada par de elementos. (Dibujos de Ricard Solé.)

cil encontrar botones con muy pocas conexiones o con muchas. Si nuestro sistema inicial era de 100 elementos y empleamos un dado con diez caras para hacer las conexiones (esto es, probabilidad 1/10), puede comprobarse que el número medio de conexiones será $K = 100 \times (1/10) = 10$. Dado que la red se diseña según decisiones aleatorias, existe un ruido que evita que todos los elementos posean exactamente cinco conexiones, pero las desviaciones respecto a este valor medio serán pequeñas.

Probablemente el lector se pregunte aún qué interés tiene este modelo, dado que resulta tan previsible. Hay dos buenos motivos para detenernos a analizar este tipo de grafo. El primero es que nos permite ver la potencia de conectar elementos en una red y cómo podría explicarse el fenómeno del mundo pequeño. Supongamos que partimos de un elemento cualquiera del grafo aleatorio. ¿Cuántos «vecinos» tendrá? Por «vecino» nos referimos a elementos conectados directamente con este elemento. Dado que en promedio tenemos K conexiones por nodo, este número nos da una buena estimación del número de vecinos. Si imaginamos que el elemento inicial da cierta información —digamos un rumor— a sus vecinos, éste (K) sería el tamaño de la propagación del rumor en la primera iteración. Ahora, cada uno de estos vecinos puede a su vez propagar el rumor a sus vecinos. Es fácil ver que el rumor habrá alcanzado ahora a K veces K, o K^2. Iterando una y otra vez, alcanzaríamos los siguientes elementos



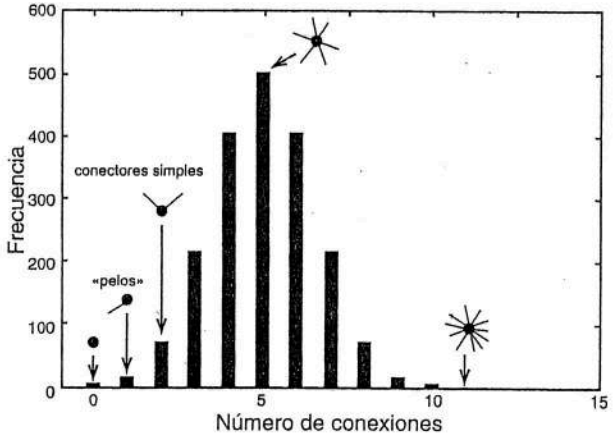


Figura 2.3. Arriba: estructura de una red aleatoria obtenida por iteración del modelo de Erdös-Renyi, para un sistema de 100 nodos y una conectividad de cinco conexiones por elemento (en promedio). Abajo se muestra la distribución de conexiones correspondiente (para una red mucho mayor, con objeto de obtener una buena estadística) que presenta un máximo alrededor de las cinco conexiones por nodo y decae rápidamente a ambos lados. Más allá de diez conexiones es muy difícil encontrar ningún elemento. Asimismo, tiene pocos nodos con una conexión (los «pelos» de la red). (Dibujo y gráfico de Ricard Solé.)

en progresión geométrica, de forma que a la tercera tendríamos K^3, a la cuarta K^4 y así sucesivamente. Si tomáramos la conectividad media anterior K = 10 (cada individuo conoce a unos diez individuos) y la propagación tuviera lugar a través de seis capas, tendríamos 10^6 = 1.000.000 de elementos que habrían recibido el rumor. En otras palabras, después de tan sólo seis iteraciones, un millón de elementos habrían recibido la información enviada por un único individuo inicial. Podemos ver esta solución desde otra perspectiva: en un país con un millón de habitantes, si nos preguntamos cuál será el número de saltos que se requieren para llegar a cualquiera de ellos, la solución será seis: el grafo de Erdös-Renyi es un mundo pequeño. El lector puede comprobar fácilmente cómo el aumento en el número de saltos crece muy lentamente: para diez millones será siete, para cien millones ocho y así sucesivamente.

Hay un segundo motivo por el que el estudio de Erdös es tan importante. Antes hemos hecho un cálculo sobre el número de conexiones que separan dos elementos en un grafo basado en cierta probabilidad de conectar dichos elementos. Pero supongamos que nos preguntamos algo distinto. Imaginemos un conjunto de elementos dado (nuestros botones del principio) y supongamos que disponemos de una colección de dados de distintos números de caras (u otro sistema) para decidir cuándo conectamos dos elementos. Parece claro que, si la probabilidad de conectar es muy pequeña, es probable que muchos elementos queden sin conectar, aislados de otros a los que nunca podrán acceder a través de ninguna cadena de relaciones. Por otra parte, también parece evidente que si la probabilidad es alta, es más que probable que todos los elementos terminen bien conectados entre sí formando un único sistema. Lo que descubrieron estos matemáticos en 1959, y que ha resultado ser una propiedad de enorme importancia dentro del estudio de la complejidad, es que existe un número crítico de conexiones por debajo del cual el sistema se halla fragmentado en pequeños subgrafos, mientras que, supe-

rado el umbral estos subsistemas tienden a estar ligados entre sí formando una gran red. El cambio es brusco, tal y como se indica en la figura 2.4, y nos dice algo que no esperábamos: cuando el número de conexiones en una red es lo bastante grande, si superamos el llamado «umbral de percolación» experimentaremos una transición entre un mundo aislado compuesto por pequeñas comunidades y un mundo conectado, formando una gran sociedad de elementos bien comunicados entre sí. Este fenómeno ocurre para conectividades muy bajas: basta con que cada elemento posea algo más de una conexión con otro y es muy probable que la mayoría de elementos pertenezcan a la misma red.

La implicación de este resultado, que los físicos denominan una «transición de fase» es que nos basta superar un número mínimo de relaciones entre elementos para cruzar la frontera que separa la ausencia de un sistema a gran escala de su presencia. De forma espontánea, aparece una nueva propiedad global sin que lo hayamos planificado previamente de ninguna manera. Las «fases» corresponden a dos estados cualitativamente diferentes: el primero está asociado al sistema fragmentado, mientras que el segundo representa al sistema conectado. Como veremos más adelante, el fenómeno de la percolación es esencial para comprender aspectos fundamentales de la complejidad.

Orden y desorden: a la búsqueda de los atajos

Los experimentos de Milgram demuestran la realidad del fenómeno del mundo pequeño, pero no lo explican. Aunque el modelo anterior demuestre que un mundo pequeño es posible, es poco satisfactorio. Un hecho obvio es que nos relacionamos con personas de forma no aleatoria. Nuestros vecinos y conocidos ocupan unas coordenadas. Nuestra intuición sigue enfrentada a un hecho difícil de interpretar con las coordenadas de nuestra vida diaria, en las que a pesar de todo

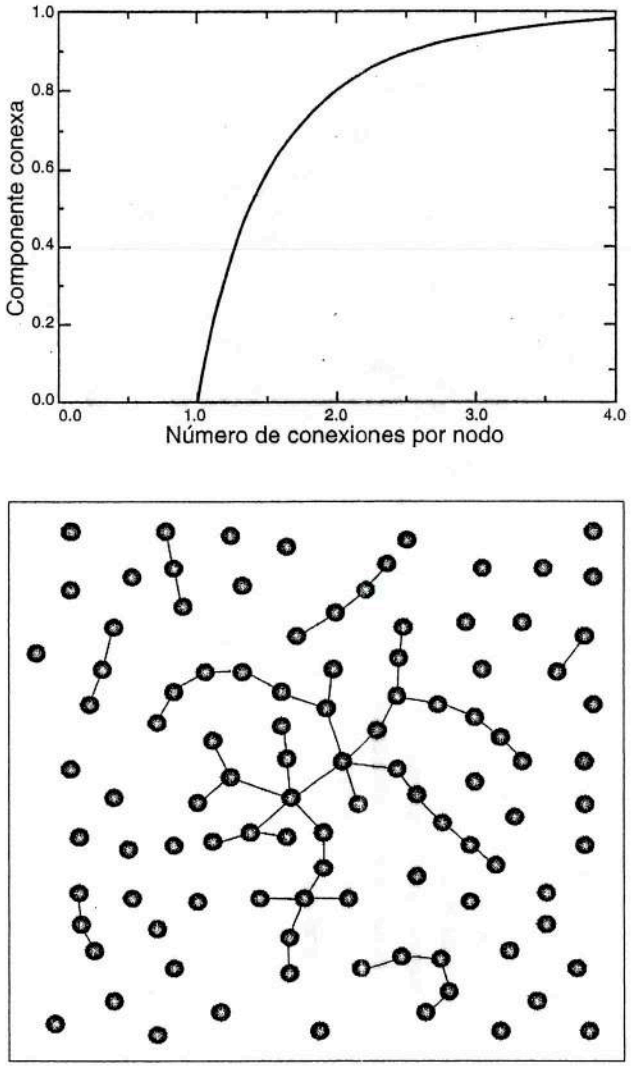


Figura 2.4. Transición de fase en el modelo de Erdös-Renyi, en la que indicamos (arriba) en el eje vertical el tamaño del mayor conjunto de elementos que se hallan conectados entre sí por algún camino, en función del número medio de conexiones. En el punto crítico, cuando el número de conexiones promedio es de uno, aparece un conjunto de elementos conectados de gran tamaño, denominado componente gigante. En la figura inferior se muestra un ejemplo de esta red para un sistema de cien nodos. Vemos que, aunque la mayoría están desconectados, existe (en el centro) un subgrafo que incluye una buena parte de los elementos del sistema. (Gráfico de Ricard Solé.)

resulta difícil imaginar que estamos a tan poca distancia de los demás. Para poder llegar a una comprensión del problema, debemos recurrir a un nuevo modelo.

Las referencias teóricas a las que uno puede acudir en busca de respuestas no son muy satisfactorias: durante décadas los matemáticos estudiaron esencialmente dos tipos de redes extremas, ambas alejadas de la realidad social. Las primeras tienen que ver con el orden. Estas redes incluyen sistemas muy regulares, ya sea debido a algún tipo de restricción geométrica natural, como ocurre con algunos sistemas moleculares (figura 2.5), o bien las resultantes del diseño, como la que vemos en una ciudad bien organizada, con casas ordenadas en una cuadrícula en una gran urbe como Nueva York o Barcelona. En este tipo de sistema, llegar de un punto a otro exige recorrer su geografía pasando por muchos puntos intermedios y la distancia recorrida es comparable al tamaño de la red. Por el contrario, y dando el contrapunto a este ejemplo de orden, tenemos la red aleatoria de la que hemos hablado en la sección anterior. Ya vimos que esta red aleatoria exhibe la propiedad del mundo pequeño, pero aunque el grafo de Erdös parece prometedor, su estructura es más bien pobre y tiene poco que ver con la del tejido social. Un aspecto importante que no aparece en las redes aleatorias es la enorme cantidad de triángulos que se dan en las relaciones sociales: mis amigos están conectados conmigo, pero además suelen ser amigos entre sí, luego están conectados a su vez. Los triángulos son por lo tanto parte esencial de la trama del mundo pequeño.

Algo falla estrepitosamente, pero ¿qué es? El físico Duncan Watts y el matemático Steven Strogatz encontraron la solución al enigma, estudiando un fenómeno a primera vista alejado del problema que nos ocupa. Strogatz era ya conocido por sus estudios acerca del problema de la sincronización: cómo un conjunto de elementos pueden lograr comportarse de forma similar y coherente. Watts se encontraba desarrollando su tesis doctoral bajo la dirección de Strogatz y exploraba un caso particular de esta clase de fenómenos, concretamente cómo grupos de grillos macho de cierta especie lograban emitir sonidos de forma simultánea y coherente para atraer a las hembras. Muy a menudo, los científicos teóricos terminamos dando vueltas a nuestros problemas planteando preguntas relacionadas y en ocasiones buscando las respuestas en otra parte. Watts empezó a preguntarse de forma muy general acerca de las condiciones mediante las cuales los sistemas se comunican entre sí con eficiencia. Casualmente, conocía el resultado básico de Milgram, y no tardó en comenzar a preguntarse sobre la posible causa del fenómeno del mundo pequeño. Al fin y al cabo, también es un problema de comunicación, dado que semejante propiedad afectaría a la facilidad con la que se propagarían señales de cualquier tipo. Con cierta reticencia por parte de Strogatz, iniciaron un estudio que resultó ser de enorme importancia. Para abordar el problema, inventaron un nuevo tipo de red que permitía recorrer todo un universo de posibles sistemas, desde los más ordenados a los más desordenados.

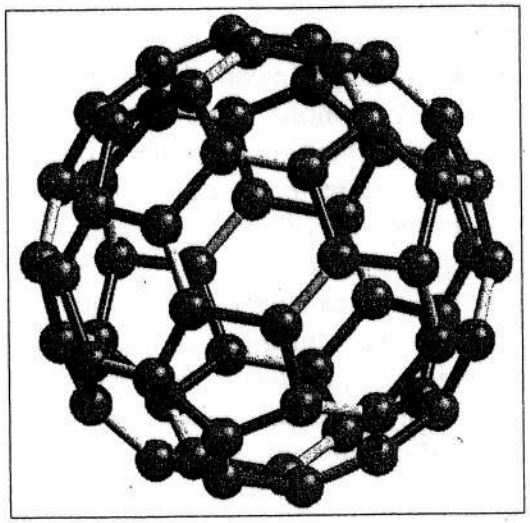


Figura 2.5. Las redes regulares abundan en la organización cristalina de los sistemas inertes (como es el caso de la molécula de la imagen), pero también en sistemas diseñados artificialmente. (Dibujo de Ricard Solé.)

Watts se halló frente a un resultado inesperado: al reconectar algunas conexiones al azar, la red ordenada se convertía en un mundo pequeño con sólo añadir un puñado de atajos al sistema. De este modo, la red sería esencialmente regular, tal y como uno espera de un sistema ordenado. El procedimiento seguido se resume en la figura 2.6. Partiendo de un conjunto de elementos situados sobre un anillo separados por intervalos iguales, los conectamos entre sí de manera que cada uno se relaciona exactamente con sus cuatro vecinos más próximos (figura 2.6a). Imaginemos estas conexiones como cables flexibles que podemos reconectar a nuestro antojo. Si partimos de un punto cualquiera, nos llevará un tiempo alcanzar otro elemento situado al otro lado del anillo. Cuanto mayor sea el anillo, mayor el tiempo invertido y mayor el número de grados de separación. Si nuestro anillo estuviera formado por un millón de elementos, el camino a recorrer sería enormemente largo y requeriría cientos de miles de saltos. Tomemos ahora uno de estos cables y desconectemos uno de sus extremos mientras mantenemos el otro en su lugar. Ahora, elegimos al azar un nuevo elemento de la red y le conectamos el extremo libre del cable. El resultado de esta operación es que existe un atajo entre dos elementos que antes estaban muy distantes el uno del otro. Volvamos a repetir la operación una y otra vez. Tras unas pocas reconexiones, tendremos un pequeño número de atajos, como se muestra en la figura 2.6b. Parece un cambio muy pequeño, pero sorprendentemente este pequeño desorden es suficiente para que el número de saltos necesarios a fin de ir de un lado a otro de la red se reduzca enormemente. Podemos medir esta caída en la distancia entre elementos y representarla en función de la fracción de atajos introducidos y comprobar que nos basta con que algunos pares de elementos estén relacionados por atajos para que nos sea muy fácil navegar por la red. La hemos convertido en un mundo pequeño y ahora nos da una imagen muy satisfactoria: podemos retener el orden local (nuestros amigos o conocidos) y a la vez plegar la red de forma que su geografía se

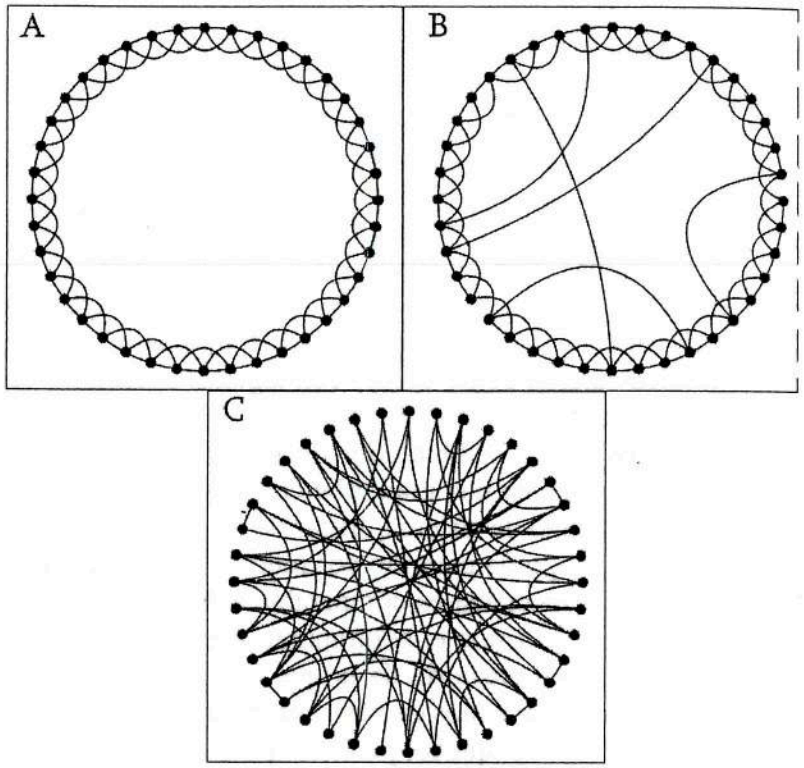


Figura 2.6. Del orden al desorden, pasando por el mundo pequeño. En el modelo de Watts-Strogatz, se parte de una red muy ordenada (a) en la que cada elemento está conectado exactamente con cuatro vecinos. Podemos desordenar esta red de forma gradual desconectando el extremo de una conexión y reconectándola con un nuevo elemento elegido al azar. Se han llevado a cabo en (b) cinco de estos cambios y han dado así lugar a cinco atajos. Si seguimos reconectando los cables, llegaremos a desordenar por completo la red (c). (Dibujos de Ricard Solé.)

haga irrelevante (y así encontrar a un extraño sorprendentemente familiar).

¿Cuál es el efecto de los atajos? Aunque aparentemente una conexión a larga distancia no parece ofrecer excesivas ventajas, debemos tener en cuenta que en realidad cada atajo comunica zonas remotas en la red. Su efecto no es lineal: cuando una conexión alcanza un dominio remoto de nuestro conjunto,

todos los elementos cercanos a esta conexión pueden ya recorrer el largo camino en muchos menos pasos. Así que al promediar las distancias de nuevo, veremos que la media ha bajado. Watts y Strogatz descubrieron que, si añadían tan sólo un diez por ciento de cambios, las distancias cambiaban enormemente. Por otra parte, la segunda propiedad del mundo pequeño asociada a la abundancia de triángulos mostraba una gran estabilidad: para valores considerables de cambios al azar, los triángulos seguían siendo numerosos. Orden y desorden parecían combinarse de la forma adecuada para explicar un problema de enorme importancia. Empleando estas dos propiedades, Watts y Strogatz pudieron decidir un criterio para determinar si una red es un mundo pequeño. Se requerían dos condiciones: la primera, que la distancia entre dos elementos fuera similar a la que esperaríamos de una red aleatoria como la de Erdös-Renyi. La segunda, que la frecuencia de triángulos fuera mucho mayor que la que esperaríamos de la misma red aleatoria. Quedaba por ver si la realidad, definida mediante el empleo de una red, les daba la razón.

Sobre actores y gusanos

El modelo de Watts-Strogatz es una simplificación del mundo real, destinada a responder a una pregunta concreta. Con mucha frecuencia, los científicos recurren a modelos muy simples que les permitan dar sentido a preguntas básicas prescindiendo de su relación exacta con el mundo real. Sin embargo, podemos ir un paso más allá y explorar la arquitectura real de algunas redes. Un subsistema social muy bien conocido y que permite comprobar la presencia del fenómeno del mundo pequeño nos lo da, por ejemplo, la red de actores de Hollywood. En este caso, los nodos de la red son actores y supondremos que dos actores cualesquiera se hallan conectados si participaron juntos en al menos una película. Existe una página en Internet que nos permite jugar a este juego empleando como referencia al actor Kevin Bacon. Se elige a un actor cualquiera y el algoritmo busca la conexión más corta (si existe) entre ambos, empleando las películas como conexión. Por ejemplo, alguien aparentemente tan alejado de Bacon como Ronald Reagan sólo está en realidad separado por dos saltos: Reagan actuó en 1961 con Eddie Albert en la película *Vivir es lo que importa [The Young Doctors],* y Albert lo hizo con Bacon en *The Big Picture* en 1989. Se suele emplear el término «número de Bacon» para referirse a esta distancia, con lo que Reagan tendría un número de Bacon dos, Albert uno y el propio Bacon cero. Del mismo modo, Bela Lugosi tiene un número de Bacon tres. Si calculamos el número de actores de la base de datos (que incluye cientos de miles de individuos) que están a distancia uno, dos..., hasta ocho (la máxima posible) de Kevin Bacon, obtenemos una tabla muy reveladora:

Distancia	Número de actores
1	2058
2	195.282
3	579.461
4	139.518
5	9558
6	919
7	140
8	20

La distancia promedio D (el número de Bacon medio) se obtiene simplemente calculando en promedio (para todos los actores) el número de conexiones entre éstos. El resultado es D = 2,946, que nos dice básicamente que la gran mayoría de actores se encontrarán a una distancia de unos tres saltos (tres grados de separación) de Kevin Bacon. Resulta de hecho muy difícil encontrar actores que se hallen a cuatro saltos o más. Este resultado parece sugerir que Bacon es un elemento especialmente importante en la red de actores, pero no es así. Si elegimos a otro actor conocido, veremos que su ta-

bla es similar y de hecho más de mil son mejores «centros» que Bacon, con distancias inferiores. Algunos actores, como Laurence Olivier, se encontrarían desconectados de la red de Bacon o, como se dice técnicamente, se hallarían a *distancia infinita* de Kevin Bacon. Tomando a cada actor de la lista, podemos calcular ahora la distancia media de todos, que nos da una idea de lo fácil que es encontrar un camino en la red que conecte a dos actores cualesquiera. Watts y Strogatz encontraron un valor de 3,65, lo que indicaba que el número de saltos que conectaban a un actor con el otro era (de media) menor de 4. Este valor puede compararse con el que esperaríamos de una red con el mismo número de actores y el mismo número de conexiones, pero en la que hubiéramos conectado al azar a los actores entre sí. Dicho de otro modo, sería la red de Erdös-Renyi equivalente, totalmente desordenada. Esta red daría un valor de 2,99, esto es, tres grados de separación. Pese a que la red real es mucho más ordenada, su eficiencia comunicativa es muy similar a la red aleatoria equivalente. Por otra parte, los triángulos eran muy abundantes, con una probabilidad del 0,79, enormemente superior al que nos daría la red equivalente pero aleatoria, de 0,00027, casi tres mil veces inferior.

¿Es este resultado una extraña casualidad, tal vez particular de la red de actores? En su artículo, Watts y Strogatz analizan también la red de conexiones entre neuronas de un organismo muy conocido en biología (figura 2.7): el gusano *Caenorhabditis elegans (C. elegans)*. Este organismo es uno de los más conocidos, debido a la rapidez con la que se desarrolla y a su especial anatomía, que permite seguir con precisión su desarrollo célula a célula. Algo más de trescientas de estas células son neuronas. Un trabajo cuidadoso llevado a cabo durante años ha revelado la circuitería interna de este nemátodo (figura 2.7), y ha permitido determinar qué grupos de neuronas interconectadas llevan a cabo distintas funciones. En este sentido, aunque Watts y Strogatz estudiaron la red completa desestimando tanto las peculiaridades de las

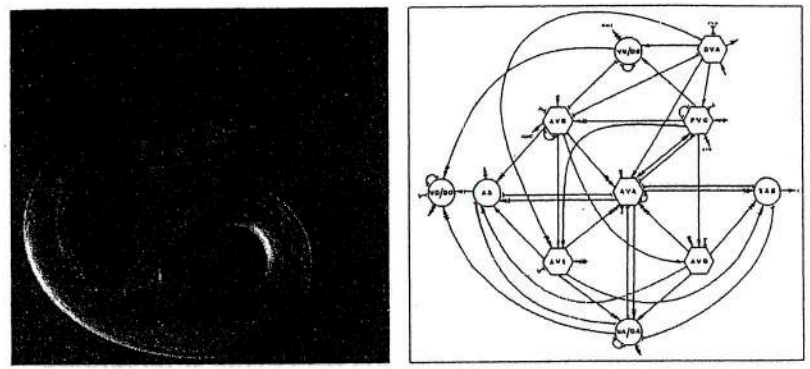


Figura 2.7. El gusano nemátodo *C. elegans* (a la izquierda) junto con un ejemplo de subcircuito neuronal (basado en White et al., 1988). El diagrama representa grupos de neuronas asociados con áreas anatómicas y funciones bien definidas. Se indican distintos tipos de neuronas mediante símbolos distintos y las flechas dan la dirección de las interacciones. (Fotografía reproducida por cortesía de Jan Saunders.)

distintas neuronas como la forma en que se conectan y distribuyen en el espacio, éstas son cualidades de importancia que no hay que perder de vista. En cualquier caso, el análisis de la red reveló aquí también un mundo pequeño. Concretamente, encontraron que la distancia media entre neuronas era de 2,65 (comparada con 2,25 para la red aleatoria) y la probabilidad de hallar triángulos ascendía a 0,28, mucho mayor que la de 0,05 que se hubiera esperado si la red estuviera conectada al azar. Los mismos rasgos aparecían también en la red eléctrica, en la que los nodos serían centrales y transformadores, y las conexiones corresponderían a las líneas de alta tensión que conocemos bien y que decoran nuestro paisaje. Se demostraba así que también en sistemas tecnológicos se daba la misma clase de fenómeno.

Después de la publicación del estudio de Watts y Strogatz se abrió una nueva época para la cartografía de la complejidad. Empezaron a detectarse las mismas propiedades en multitud de sistemas sociales, naturales y artificiales. Las mismas propiedades aparecían, en mayor o menor medida, reflejadas en las relaciones entre seres humanos, proteínas,

circuitos electrónicos, palabras, especies o reacciones químicas. Queda una cuestión importante sin resolver: las redes reales no se parecen a las que define el modelo de Watts-Strogatz. Este modelo ofrece una buena metáfora, y sobre todo, una solución general al problema planteado por Milgram. Entonces, ¿cuál es su estructura? Los primeros estudios dieron un resultado inesperado: a diferencia de lo que resulta de los modelos que hemos presentado, la arquitectura de las redes reales es enormemente heterogénea: la gran mayoría de los elementos están apenas conectados pero a la vez unos pocos elementos presentan un gran número de conexiones. Como veremos, estas redes están llenas de propiedades nuevas y arrojan luz acerca de la naturaleza de la complejidad y su evolución.

El mundo pequeño resultó ser una propiedad universal de la complejidad de las redes y con la llegada de la genómica y el desarrollo de Internet, se hizo posible por primera vez trazar los mapas de estos sistemas de forma fiable. También se hizo más evidente que la existencia del mundo pequeño debería tener consecuencias positivas y negativas. El hecho es que, en un mundo pequeño, los cambios en un elemento del sistema pueden afectar —y hacerlo con rapidez— a cualquier otro elemento. La información llegará rápidamente, pero también pueden hacerlo los virus. Así, fenómenos indeseados como la propagación de una pandemia o la amplificación de inestabilidades económicas se abrirán paso a través de redes sociales o de comercio con facilidad y en ocasiones con efectos impredecibles. Por otra parte, esta capacidad de propagar cambios nos dice también que nuestras acciones, aunque tengan lugar a pequeña escala, pueden alcanzar a todo el sistema. Nuestra sociedad en red hace cada vez más posible que pequeños cambios desencadenen grandes efectos. Cada uno de nosotros, empleando adecuadamente lo que la red le ofrece, puede participar en la historia y su devenir.

3
El final de la geografía

> Se buscan jóvenes menores de 18 años. Deben ser jinetes experimentados, sin miedo a arriesgar su vida a diario. Preferiblemente huérfanos.
>
> Anuncio del Pony Express
> de mediados del siglo XIX

> Internet es un instrumento de libertad y de autonomía, cuando el poder siempre ha estado basado en el control de las personas. Pero esto se acaba. Porque Internet no se puede controlar.
>
> Manuel Castells

Cuando el mundo desapareció

Desde finales del siglo XX disfrutamos de un sistema de comunicación extraordinario: Internet. Esta red de conexiones a través del ordenador representa una innovación fundamental dentro de una cadena de acontecimientos tecnológicos que han reducido las distancias que la información precisa recorrer. Mirando hacia atrás, no deja de sorprender la magnitud de la transformación: si alguien, a mediados del siglo XX hubiera afirmado que podía acceder a miles de millones de documentos, habría sido considerado con suerte un iluso (o tal vez un multimillonario). Pero a finales del mismo siglo ya era posible, para una parte importante de la humanidad, acceder a una biblioteca virtual inmensa y en permanente creci-

miento. Fue así como apareció el viaje a través del mundo virtual. Desde entonces, un nuevo tipo de navegantes surgió de la nada para transformar de raíz la comunicación y el acceso a la información. Y sin embargo, si tuviéramos que trazar los antecedentes de la revolución digital, deberíamos remontarnos a la Inglaterra victoriana del siglo XIX, en la que una red de comunicaciones emergió a caballo de la primera revolución de la información. Esta red se extendió con enorme rapidez a lo largo de décadas y cambió por completo el horizonte de la economía y la comunicación. El invento no es otro que el telégrafo, y su historia y consecuencias asombran por las similitudes con la posterior revolución digital que dio origen a Internet (figura 3.1).

En Estados Unidos, los inicios de la red telegráfica fueron extremadamente lentos y de hecho muy pocos creían en su importancia práctica: la gente acudía en 1844 a las oficinas que estaban conectadas por la primera línea telegráfica entre Boston y Baltimore para ver cómo se enviaban y recibían mensajes o cómo se jugaban partidas de ajedrez a distancia, pero todo ello ocurría en medio de un escepticismo generalizado acerca de semejante tecnología. En 1845 se decidió que la línea se emplearía en comunicaciones prácticas y se fijó el precio en un centavo por cada cuatro caracteres enviados. Fue un completo fracaso: tan sólo se recaudó un centavo en los primeros cuatro días. Pero apenas unos meses después, cuando se instalaron nuevas líneas (como la que unía Nueva York y Filadelfia), el telégrafo empezó a ganar adeptos y a medida que las líneas de cables cubrían cada vez más kilómetros, se inició un crecimiento exponencial que al final recorrió ciudades y carreteras del mundo entero. Tres años después, tal y como narraba un periodista de la época, «el telégrafo se extendía por todo el país como una tela de araña». A ambos lados del Atlántico el entusiasmo por esta nueva forma de comunicación crecía sin parar y sólo dos años después de instalar la primera línea norteamericana, la red abarcaba ya más de sesenta mil kilómetros de cables y seguía creciendo a toda

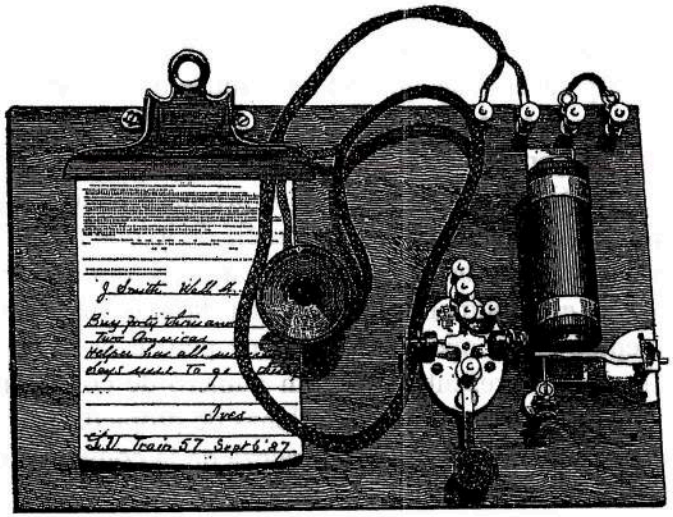


Figura 3.1. El desarrollo del telégrafo en todo el mundo representó la primera gran transición hacia una comunicación sin fronteras. El telégrafo era un dispositivo relativamente simple, pero acabó con otros medios de comunicación, como el correo a caballo.

velocidad. Cuando la red se consolidó, las relaciones económicas y las formas de comunicación empezaron también a cambiar y aquella transformación dejó una huella indeleble en la forma de llevar a cabo transacciones comerciales. Al mismo tiempo que la red telegráfica modificaba las formas de comercio, una comunidad nueva iniciaba su andadura. Individuos que jamás se habrían conocido personalmente y que se encontraban geográficamente muy alejados se comunicaban entre sí a gran velocidad.

¿En qué mundo tenía lugar el nacimiento del telégrafo? Mirando hacia atrás, el transporte de información en las sociedades humanas estuvo durante siglos dominado por el correo escrito, llevado por distintos medios de transporte que cubrían enormes distancias. El Pony Express, por ejemplo, fue un medio de comunicación común en Estados Unidos desde poco antes de la guerra civil norteamericana. Se empleaba para cubrir la enorme distancia que separaba ambas costas. En aquel

tiempo, el correo se transportaba a caballo y hacía falta una docena de días para llevar una carta de este a oeste. Algunos de los carteros fueron personajes legendarios, como Buffalo Bill. Cada trayecto era realizado por varios jinetes (la mayoría muy jóvenes) y caballos que se relevaban unos a otros. Cuando el telégrafo completó su recorrido desde la Costa Este de Estados Unidos hasta California, el Pony Express dejó de existir para entrar a formar parte de la leyenda del Lejano Oeste. Lo mismo ocurrió en muchos otros lugares. Las redes telegráficas surgían en todas partes y reemplazaban los sistemas tradicionales de comunicación. Aunque el correo personal persistió, las transacciones comerciales y la información económica disponían de un medio único y veloz con el que obtener información de última hora y responder con rapidez a los vaivenes del mercado. En 1858 el primer cable transatlántico conectó por primera vez el Nuevo y el Viejo Mundo. Un hito histórico y una hazaña tecnológica de enorme calibre en la que se emplearon 4200 kilómetros de cable con un peso de unas siete mil toneladas. Su trascendencia fue más allá de la pura ingeniería y encontramos referencias a este hecho en la literatura. En *Veinte mil leguas de viaje submarino,* por ejemplo, el cable es una de las maravillas visitadas por el *Nautilus.* Y aunque la eficiencia de esta conexión fue limitada hasta ya entrado el siglo XX, su significado es innegable: el planeta empezaba a ser realmente pequeño. El hecho de que virtualmente todo el mundo pudiera hallarse conectado llevó a algunos a abrigar esperanzas de un mundo mejor, tal vez menos proclive a la guerra y en el que los individuos se entendieran y toleraran entre sí.

Con el desarrollo de la red telegráfica, muchas otras cosas empezaron a cambiar. Por un lado, las relaciones económicas evolucionaban con rapidez en un mundo en el que las distancias geográficas desaparecían de la noche a la mañana. Pero también empezaban los problemas. La congestión se convirtió en uno de ellos y también la seguridad en los mensajes enviados. Así emergieron los mensajes codificados que transmitían información valiosa y secreta sobre transacciones comerciales, los cambios en la Bolsa o simplemente apuestas para carreras de caballos. La criptografía floreció, pues, a caballo de la nueva tecnología y de la misma forma empezaron a aparecer *hackers* que intentaban romper los códigos secretos. En paralelo a todos estos nuevos cambios, la creciente comunidad de operadores de telégrafo empezó a adquirir su propia personalidad.

Como ocurre a menudo en otros momentos de la evolución de la vida o de la historia humana, una innovación (biológica o tecnológica) es reemplazada por otra. La primera se extingue y la segunda triunfa y se impone. Sólo tenemos que recordar el ejemplo de la máquina de escribir: en un abrir y cerrar de ojos (en la escala histórica) un invento histórico que había persistido durante cien años dio paso al ordenador. También para el telégrafo llegó un punto final con la aparición del teléfono. Este último suponía una mejora enorme en la comunicación, dado que en lugar de emplear operarios que codificaran los mensajes y los transmitieran o recibieran, un usuario podría simplemente hablar de forma directa con la persona interesada. Nada podía competir con semejante invento y, aunque el telégrafo sobrevivió aún durante algunas décadas, ya nunca tuvo la importancia de sus mejores tiempos. Con su caída, arrastró a toda la comunidad humana que se había desarrollado a su sombra y que había dado lugar al primer experimento de creación de una sociedad digital. Las esperanzas y dudas generadas por el telégrafo reaparecieron con la emergencia de Internet a mediados del siglo XX. La historia, y nunca mejor dicho, se repetía. Tal y como nos dice Tom Standage acerca de unos hipotéticos viajeros de la época victoriana que viajaran en el tiempo y nos visitaran:

> «Seguramente encontrarían los vuelos espaciales y los viajes intercontinentales en avión mucho más impresionantes que los hitos tecnológicos alcanzados por nuestra red global de comunicaciones. Al fin y al cabo, pensaban que

una máquina voladora más pesada que el aire era imposible. Pero sobre Internet... bueno, ellos ya tenían la suya». (Standage, 1998.)

La red telefónica sustituyó a la red telegráfica, y heredó así parte de la tecnología que generó la invención del telégrafo. Un siglo más tarde, una nueva red apareció para cambiar el mundo y hacerlo más pequeño aún.

Redes de información

La invención de Internet tuvo lugar en un contexto muy distinto al que uno imaginaría. La idea de la red digital no surge de un proyecto de ingeniería orientado a un objetivo concreto. A finales de 1969, un grupo de ingenieros que trabajaban para el Gobierno de Estados Unidos (específicamente, para ARPA, siglas en inglés de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados) decidieron conectar entre sí cuatro ordenadores situados en diversos puntos del país, que llegaron a diecinueve en 1972. Esta red, llamada ARPANET, fue la semilla del mayor cambio tecnológico y social de nuestra historia reciente. Poco a poco, la red crecía y sus potencialidades se hacían cada vez más evidentes (figura 3.2).

Al principio, este sistema servía para estudiar el flujo de paquetes de información a través de un reducido sistema de ordenadores interconectados y permitía desarrollar formas de enviar estos paquetes con la seguridad y eficiencia adecuadas. A este conjunto inicial de ordenadores, conectados por medio de los denominados «protocolos de comunicación», se le bautizó como «Internet». Al cabo de diez años el esqueleto de la red ya comenzaba a funcionar, y distintos tipos de redes empezaron a interconectarse, y un grupo de físicos del CERN (el Laboratorio Europeo de Física de Partículas) en Ginebra, liderado por Tim Berners-Lee, creó el lenguaje que permitió desarrollar los servidores y dar paso a la más importante de

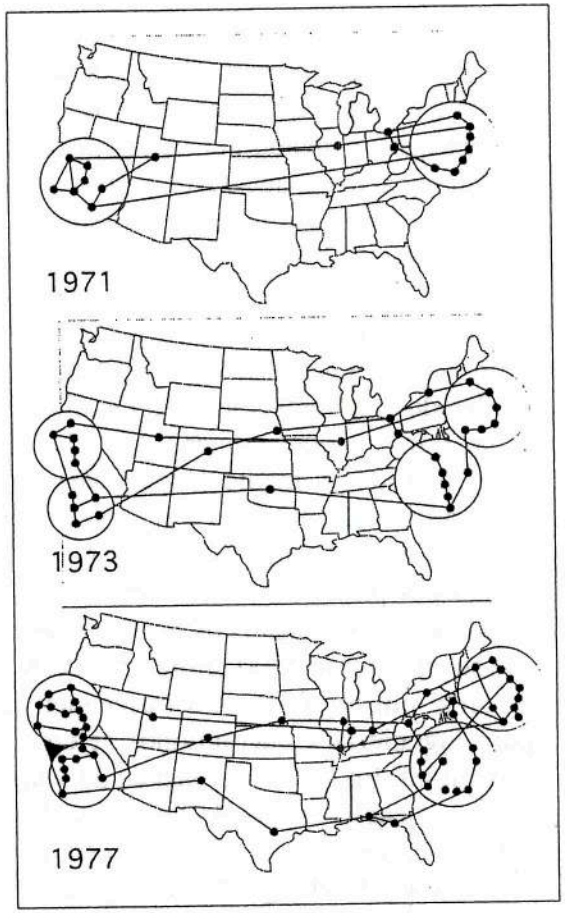


Figura 3.2. Evolución de la estructura de ARPANET, en la que se muestra su estado en 1971, 1973 y 1977, ocho años después de su creación. Cada nodo representa un ordenador (u ordenadores) asociados a diversas universidades y centros de investigación. El mapa sitúa de forma aproximada su localización geográfica, de costa a costa de Estados Unidos. (Gráfico de Ricard Solé.)

las aplicaciones que emplea Internet: la World Wide Web, una red *virtual* de información. En un gesto desinteresado de los científicos del CERN, el *software* desarrollado para la WWW se distribuyó de manera gratuita, lo que facilitó una rápida difusión que ya fue imparable.

Aunque la red original fue diseñada de forma bien definida, su complejidad aumentó muy deprisa: a principios del año 2006 ya poseía mil cien millones de usuarios. Este crecimiento exponencial tuvo lugar fuera del alcance de un comité de expertos capaz de organizar la red global. Diferentes países, grupos de interés o simplemente individuos contribuyeron a generar una red cuya evolución no es dirigida por una autoridad central sino distribuida. Podríamos preguntarnos cómo se halla organizada semejante estructura. Tal vez se trate de algún tipo de mapa que podamos trazar sobre una superficie, no muy distinto en último término de lo que esperaríamos de una cartografía clásica (como los de la figura anterior). Quizá la red sea una malla desordenada en la que los elementos se conectan de forma aleatoria entre sí, sin un patrón bien definido. Al fin y al cabo, no esperaríamos encontrar nada especialmente interesante si las reglas de conexión dependieran de decisiones locales que no tienen en cuenta el comportamiento global de la red. Hay que añadir a este problema el hecho de que sobre la red física también crece y cambia la WWW, en la que documentos y textos están conectados entre sí por enlaces que podemos establecer con cualquier elemento deseado (la página web de un grupo de música, de una asociación literaria o tal vez una casa de subastas) simplemente tecleando la dirección o mediante un buscador adecuado como Google. Si introducimos algunas palabras clave, podemos acceder a cientos de miles de millones de páginas web.

Antes de responder a las preguntas anteriores, debemos considerar una de las propiedades más llamativas de Internet: su enorme eficiencia. Cuando navegamos a través del océano digital en busca de una imagen, un documento o tal vez la letra de una canción, somos poco conscientes de lo vasto de sus dimensiones. Tal y como ya hemos mencionado, no podemos expresarlas en términos de conceptos geográficos. La información disponible es abrumadora: todo un universo de ideas, imágenes y textos que no cesa de expandirse en múltiples direcciones. Cada elemento posible tiene muchas capas de significado en las que podemos buscar y cada elemento a su vez se halla conectado potencialmente con otros muchos, tal vez pertenecientes a categorías muy distintas. Tomemos por ejemplo la palabra «relatividad». Una búsqueda de «relatividad» abre miles de documentos posibles, y en muchos de ellos encontraremos a Albert Einstein en mil imágenes distintas y detalles biográficos conocidos o raros. Podemos conectar desde aquí con la cosmología, con Ernst Mach, con el Proyecto Manhattan, con Israel o con Alfred Nobel. Cada una de estas entradas abre las puertas a mundos enteros. Y pese a lo vasto de este universo, la búsqueda de información es enormemente eficiente. No precisamos esperar varios días para acceder a nuestro objetivo, aunque éste pueda ser una aguja en el pajar de millones de elementos. Al cabo de unos segundos, disponemos de lo que buscábamos y, con suerte, de otros materiales relacionados que pueden sernos útiles o quizá mucho más interesantes de lo que esperábamos. ¿Cuál es la clave de esta eficiencia? La respuesta está en la estructura de la red. Su arquitectura, lejos de ser una telaraña desordenada, posee unas propiedades muy especiales.

Leyes de escala

La red digital ha crecido a gran velocidad, sin detenerse, como una gran ciudad en mitad de la jungla. Incapaces de ver a través de los árboles, recurrimos a la tecnología adecuada que permite rastrear la red de forma automática. Este rastreo se lleva a cabo mediante sistemas artificiales de exploración de la red que generan un mapa sistemático de ésta. Al explorar la red mediante estas llamadas *arañas* o *robots*, llevamos a cabo la tarea de los cartógrafos, pero esta vez en las fronteras del mundo digital. Los mapas de este mundo son complejos, extrañamente organizados en su desorden. La figura 3.3 muestra un ejemplo de ello. Wikipedia, una enciclo-

pedia virtual de acceso libre, ofrece una buena medida del enorme potencial de la red: una biblioteca en constante crecimiento y que cambia y se desarrolla a partir de la contribución desinteresada de decenas de miles de usuarios. La imagen nos muestra una red en la que inmediatamente detectamos dos propiedades: la gran mayoría de elementos poseen sólo una conexión y un pequeño número de ellos (como el que se muestra con un *zoom)* están conectados a un gran número de nodos. En la red virtual se puede trazar un mapa semejante con propiedades similares.

Los investigadores que estudian estos sistemas emplean una representación gráfica de su conectividad que mide el grado de heterogeneidad. Ésta puede medirse determinando el número de elementos *N(k)* del sistema que poseen una, dos o en general *k* conexiones. Si dibujamos la gráfica de *N(k)* frente a *k*, tenemos una visión estadística del sistema, dominada por un máximo para los elementos con sólo una conexión, seguidos por los de dos, y así sucesivamente (figura 3.4). Vemos también que hay una cola larga: a medida que nos desplazamos hacia conectividades cada vez más altas, es más difícil encontrar elementos con muchas conexiones, pero existen. Estas redes se denominan «libres de escala» y la ley matemática que las describe se denomina «ley de potencia» (o «ley de escala»). En estas redes, los conectores desempeñan un papel especialmente importante como responsables de la gran eficiencia de estas redes. Debido a su presencia, la navegación por la red es fácil y fluida. Son de hecho los responsables de la estructura de mundo pequeño: imaginemos que deseamos alcanzar un nodo concreto a partir de un elemento de partida dado. Aunque la red posea cientos de miles de nodos, partiendo de un nodo cualquiera elegido al azar, tarde o temprano daremos con algún conector principal. Una vez alcanzado, las posibilidades de desplazarse en la dirección adecuada se multiplican con rapidez, dado que este elemento posee muchísimas alternativas para acercarnos al lugar que deseemos. En una red libre de escala, tal vez no todos los caminos lle-

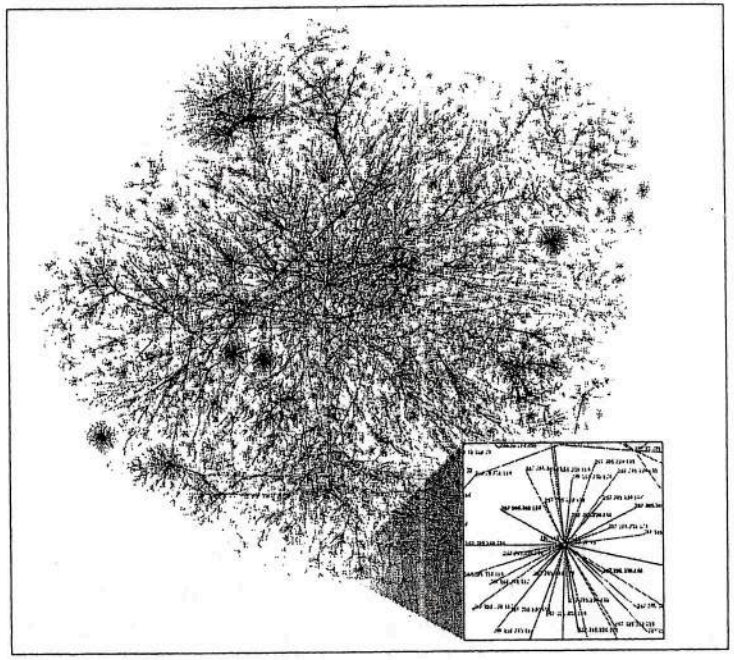


Figura 3.3. El mapa de Internet nos muestra un sistema conectado en un espacio distinto al de nuestra geometría diaria. La red posee una enorme complejidad, marcada por la superabundancia de elementos con pocas conexiones pero también por la presencia de unos pocos elementos con un gran número de conexiones. Abajo a la derecha se muestra un *zoom* de uno de estos elementos altamente conectados. (Imagen reproducida por cortesía de Matt Britt.)

van a Roma, pero algunos atajos nos acercan a nuestro destino con mucha rapidez.

La pregunta inmediata es cómo se origina esta estructura. ¿Por qué algunos elementos están hiperconectados mientras que la mayoría apenas poseen una o dos conexiones? Si la red no ha sido diseñada y controlada por ninguna mente oculta, ¿cómo ha adquirido su organización?, ¿cuál es su significado, si lo hay? Curiosamente la respuesta a estas preguntas está muy relacionada con una observación común: en un país cualquiera, la gran mayoría de personas poseen ingresos bajos o muy bajos, pero también existen algunos individuos que poseen fortunas comparativamente descomunales. Esta distri-

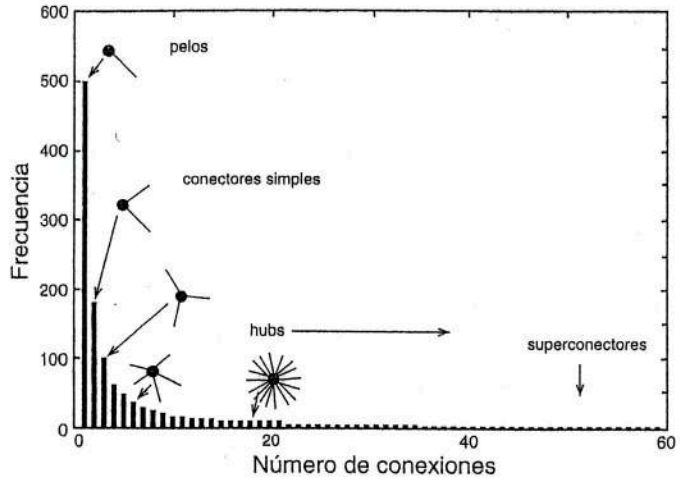


Figura 3.4. Las redes libres de escala presentan una abundancia de conexiones enormemente heterogénea. Si contamos el número de elementos (eje vertical) que poseen uno, dos o —en general— *k* conexiones (eje horizontal), la curva resultante sube con rapidez para valores pequeños y decae a medida que buscamos elementos con un número mayor de conexiones. La caída es lo bastante lenta como para que podamos encontrar elementos muy conectados. (Gráfico de Ricard Solé.)

bución desigual de la riqueza parece ser un fenómeno común en la sociedad de libre mercado y las curvas matemáticas que se emplean para describir su comportamiento resultan ser también leyes de escala. Aunque riqueza y conexiones parezcan cosas distintas, están íntimamente ligadas entre sí. En 2000, los físicos Laszlo Barabási y Reka Albert, de la Universidad de Notre Dame de Indiana, en Estados Unidos, propusieron un mecanismo de crecimiento de la red que se basa en la dinámica de «el rico se hace más rico» *(rich gets richer)* y que da cuenta del fenómeno de forma muy natural y convincente. La idea es en el fondo muy simple: si un elemento posee un mayor número de conexiones que otro, será de alguna forma más «popular» y tenderá a atraer mayor atención. En el mundo del dinero, los individuos que poseen mayor número de recursos económicos se hallan en mejor posición de explotarlos para conseguir aún mayores ganancias. En ambos

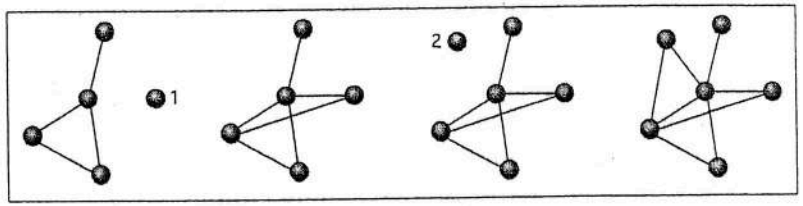


Figura 3.5. Una receta para obtener redes libres de escala. Se parte de una pequeña red inicial (no importa cuál, izquierda) y se van añadiendo elementos. Supongamos que cada elemento nuevo (1) puede conectarse con dos elementos anteriores. Las nuevas conexiones pueden hacerse con cualquier nodo, pero lo más probable es que se lleven a cabo con los nodos más «populares» que poseen un mayor número de conexiones. Lo mismo ocurre con el siguiente elemento (2) y así sucesivamente. Podemos ver que el elemento central (que poseía más conexiones al principio) incremente su conectividad. (Dibujos de Ricard Solé.)

casos, se da un proceso de amplificación que hace más ricos a los ricos y más pobres a los pobres. Lo segundo puede entenderse si tenemos en cuenta que los recursos que circulan por el sistema son limitados (el dinero no es infinito) y por lo tanto la atracción de la riqueza hacia los individuos adinerados se hace a costa de aquellos que no lo son. Imaginemos que Internet sigue una pauta parecida. En este escenario, en lugar del dinero hablaremos de número de conexiones (que también tiene su importancia económica o social). Los nodos de la red que sean más populares atraerán con facilidad a otros que se conectarán a ellos. Aquellos que sean poco conocidos lo seguirán siendo o a lo sumo aumentarán débilmente en importancia. Albert y Barabási imaginaron un sistema simplificado en el que una red recibe nuevas conexiones cada vez que un nuevo elemento se añade al sistema (figura 3.5). Así crece el tamaño de la red y también su conectividad. En concreto, supongamos que cada elemento nuevo se conecta con un número dado de nodos de la red. Pero las conexiones obedecen al principio de «el rico se hace más rico»: lo más probable es que se realicen de forma proporcional a la popularidad del elemento elegido. De esta manera, un nodo que posea el triple de conexiones que otro tendrá el triple de posibilida-

des de adquirir conexiones adicionales. Este mecanismo genera redes libres de escala: a medida que el tiempo pasa, la red crece y los elementos más conectados ganan nuevas interacciones con rapidez, y se convierten en los conectores principales *(hubs)* del sistema. El mecanismo amplificador crea una red compleja a partir de reglas muy simples.

Esta estructura reaparecerá en los próximos capítulos en contextos tan insospechados como el genoma humano o la propagación de epidemias. Pero como veremos a continuación, la enorme eficiencia de las redes de escala tiene un talón de Aquiles.

Complejidad y fragilidad

¿Cuáles son las consecuencias de las redes libres de escala, más allá de su enorme eficiencia? Esta cuestión es de enorme importancia, y ya fue abordada (en un contexto distinto) en los años cincuenta del siglo pasado por Paul Baran, de la RAND Corporation (Research and Development). Este investigador fue un pionero en el diseño de redes de comunicaciones fiables capaces de resistir ataques externos. Este objetivo encajaba muy bien con el espíritu de la guerra fría de la época y abordaba un problema muy relevante para la seguridad nacional: hasta qué punto la destrucción de parte de la red de comunicaciones (como la red telefónica) podría comprometer la estabilidad de Estados Unidos y su capacidad defensiva. Ya entonces parecía claro que en un sistema altamente centralizado, donde las líneas de comunicación presentaran nodos clave, la pérdida de tan sólo algunos de ellos conllevaría consecuencias nefastas. La cuestión que planteó Baran era en el fondo simple: si se pudiera diseñar desde el principio una red de comunicaciones de forma que mostrara la menor fragilidad, ¿qué tipo de estructura sería óptima? Baran exploró este problema mediante análisis teóricos y empleando el ordenador como un laboratorio donde llevar a cabo experimentos virtuales. Su estudio reveló que las redes muy jerárquicas, dependientes de elementos especialmente conectados entre sí (figura 3.6) serían frágiles: bastaría con atacar el nodo central (el más conectado) para que todo se veniera abajo.

Al otro extremo del espectro de posibilidades, podríamos considerar una red muy distinta, a modo de red de pesca que cubriese la superficie del país, y en la que cada nodo estuviera más o menos igualmente conectado a un número parecido de vecinos. Esta red ideal, que Baran denominó «red distribuida», resultaba ser la más estable: al destruir o dañar un elemento, esta pérdida no daría como resultado un cambio apreciable en el comportamiento de la red. Si imaginamos una red telefónica, la pérdida de un elemento se compensa por otros que permiten mantener vías de comunicación alternativas. En esta red, quedar desconectado es realmente difícil, puesto que siempre existirán caminos múltiples por los que discurrir. Ésta sería por lo tanto la elección ideal para minimizar los riesgos de colapso en una red de transporte de cualquier tipo. A medio camino entre ambas posibilidades, se encuentra la red descentralizada, que combina ingredientes de ambos extremos y que por lo tanto está expuesta a la posibilidad de colapsar pero no de forma inmediata. Cuando Paul Baran desarrolló sus ideas, Internet era sólo un sueño que se hizo realidad unas décadas más tarde, aunque los problemas de seguridad eran en realidad extensibles a cualquier tipo de sistema de comunicación. Sin embargo, ninguna red anterior había llegado a ser tan importante. Ningún sistema de escala mundial había generado tal número de interdependencias. ¿Estaría Internet amenazada por su propia forma de organización? Así es: en un trabajo de enorme influencia, el físico Barabási y sus colaboradores Reka Albert y Hawoong Jeong demostraron que esta red (y cualquier otra con una estructura similar) posee un talón de Aquiles del que no podemos escapar con facilidad: la pérdida de los conectores da como resultado la destrucción del sistema. Para comprender este fenómeno, basta tener en cuenta que los conectores principales

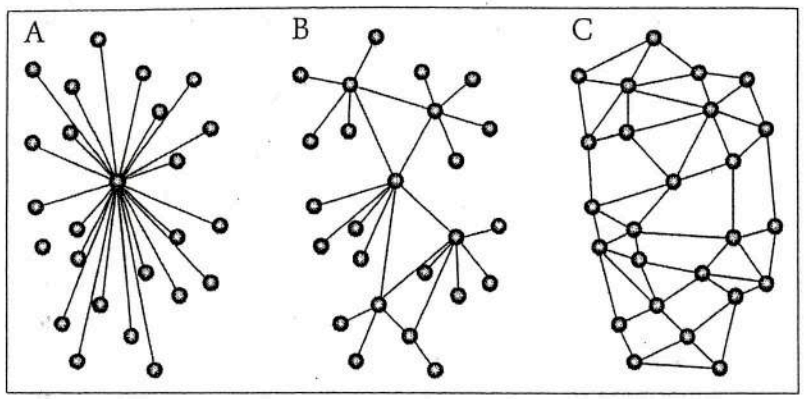


Figura 3.6. De izquierda a derecha, tenemos (a) una red totalmente centralizada, con un único nodo conectado con todos los demás, (b) una red descentralizada con cierto número de nodos centrales y muchos periféricos y (c) una red distribuida en la que ningún elemento posee un número especialmente grande de conexiones. Cada elemento está conectado con un número limitado de nodos cercanos. (Dibujos de Ricard Solé.)

actúan como el pegamento que mantiene la cohesión de la malla. Dado que la mayoría de elementos poseen una o dos conexiones, estas redes están globalmente poco conectadas y un buen mecanismo para mantenerlas cohesionadas es precisamente la presencia de los *hubs*. Si los eliminamos (tal y como Baran ya había predicho) el resultado es la fragmentación.

Internet comparte esta fragilidad con otra red no menos importante: la red de suministro eléctrico. Esta red es en gran medida la sangre que abastece nuestra sociedad, basada en la energía. Desde las estaciones generadoras de electricidad, el flujo eléctrico transcurre a través de la malla pasando por estaciones transformadoras y finalmente proporcionando la energía a los usuarios, sobre todo ciudades e industria. Aunque la red eléctrica no posee una estructura libre de escala (no hay elementos con muchas conexiones) sí es un mundo pequeño y presenta también una enorme fragilidad ante la eliminación de los nodos más conectados. Ambos sistemas plantean un reto importante en relación con los daños que causarían a la economía en caso de que un ataque intencionado las fragmentara. Internet está claramente amenazada por los *hackers*, expertos informáticos con capacidad de burlar los sistemas de seguridad más sofisticados y dañar o apropiarse de bases de datos sensibles. La red eléctrica lo está en dos frentes. Uno es el ataque terrorista, que podría aprovechar la inevitable fragilidad para provocar daños económicos de largo alcance. El segundo es la propia dinámica del consumo energético que, a caballo del crecimiento demográfico y de un mayor consumo por habitante, da lugar a una carga excesiva que se traduce ocasionalmente en apagones que afectan a grandes áreas de un país. Así ocurrió por ejemplo en Italia en septiembre de 2003, cuando casi sesenta millones de personas se quedaron a oscuras en apenas veinte minutos. Inicialmente, el motivo del apagón fue un misterio, pero un estudio detallado reveló que se debió a una combinación de daños causados por una tormenta en la línea de suministro de energía procedente de Suiza, junto con un exceso de demanda de electricidad. Aquella situación local generó una cascada de caídas imparable que se propagaron por gran parte del país. Un mes antes, un apagón de grandes proporciones tuvo lugar en el noreste de Estados Unidos, afectó a cuarenta millones de personas y causó grandes pérdidas económicas estimadas en unos seis mil millones de dólares. A medida que pasa el tiempo, los apagones van haciéndose más corrientes y su magnitud parece también aumentar. Por otra parte, dado que su comportamiento obedece a propiedades de la red, deberíamos ser capaces de predecir un posible comportamiento anómalo o una mayor fragilidad. En un estudio de las redes eléctricas de todos los países europeos, que llevamos a cabo en colaboración con Martí Rosas Casals, profesor de la Cátedra Unesco de Sostenibilidad, de la Universitat Politècnica de Catalunya, vimos que existen diferencias importantes entre países con respecto a la fragilidad frente a posibles fallos en los elementos más conectados. Mientras que un grupo de países presentaba una fragilidad compatible con la que predicen los modelos teóricos, basados en aproximaciones que no tenían en cuenta la

geografía, otro grupo resultaba ser menos frágil de lo esperado. En estos últimos, parecen existir reglas de organización que podrían mejorar de forma sensible la estabilidad del sistema. Estos estudios podrían ayudar a la planificación futura de las redes de transporte de energía, considerando sus posibles puntos débiles desde una perspectiva global.

Globalización en red

Quienes han vivido el último cuarto del siglo XX sabrán muy bien cuál ha sido el impacto del mundo conectado en red. La ciencia y la tecnología han desempeñado un papel primordial, así como la iniciativa de personas con visión de futuro que fueron capaces de apostar fuerte por innovaciones en las que otros apenas creían. El desarrollo de la máquina de vapor ya había empezado a cambiar las cosas: las distancias se habían reducido y los antiguos medios de transporte, mucho menos eficientes, habían sido sustituidos. Y cuando los hermanos Wright llevaron a cabo su modesto ensayo de vuelo en 1903, pocos habrían sospechado que al cabo de tan sólo unas décadas la aviación sería una parte esencial del sistema económico mundial y que millones de personas viajarían de un lado a otro del mundo de forma constante. Pero el proceso de cambio, y en especial su impacto en la economía, se hizo más evidente en las últimas décadas del siglo XX. La llamada globalización fue tomando forma con rapidez y aunque poco visible al principio, terminó haciéndose obvia incluso para el ciudadano de a pie. En nuestros mercados podemos comprar frutas y verduras procedentes de cualquier parte del mundo, y cuando viajamos al otro lado del océano cada vez nos sentimos menos extraños: en cualquier esquina de Nueva York, pero también en muchas otras ciudades, podemos toparnos con un Starbucks, y lo mismo ocurre con restaurantes y marcas de ropa. La globalización conlleva no sólo un proceso de intercambio comercial a gran escala, también es un fenómeno de homogeneización cultural y social que tal vez sea imparable. Este proceso se refleja muy bien en el estudio de los intercambios comerciales entre países. El proceso no ha sido en absoluto lineal, tal y como ha demostrado la física María Ángeles Serrano, actualmente en la Universidad de Indiana, en Estados Unidos, y que estudió con detalle los datos existentes acerca de los balances comerciales entre distintos países.

Serrano y el también físico Marian Boguñá, de la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona, así como Alessandro Vespignani, de la Universidad de Indiana, han analizado la estructura de la red de intercambios comerciales y han descubierto que ésta refleja las enormes asimetrías que caracterizan la economía de mercado: la red es libre de escala, dominada por países con un nivel de intercambios muy bajo (países pobres con economías de subsistencia y pocas conexiones), pero también organizada en torno al pequeño grupo de los países más desarrollados, que poseen un gran número de intercambios comerciales. De este modo, la red mundial de comercio presenta las propiedades características de Internet. Es un mundo particularmente pequeño: menos de dos saltos separan a cualquier país de otro, conectados entre sí por intercambios comerciales de distinta intensidad. Sólo las redes ecológicas, como veremos más adelante, son comparables en este sentido. Además de estudiar las relaciones, estos investigadores midieron la intensidad de los intercambios comerciales y cómo la red podría influir en la dinámica del sistema.

La red de comercio muestra varias propiedades interesantes, en particular (como era de esperar) la distribución de las riquezas sigue también una ley libre de escala, ya que sólo unas pocas economías dominan el mundo, acumulando la mayor parte de la riqueza, mientras que la mayoría sólo puede llevar a cabo intercambios muy limitados. Además, la red muestra con claridad que existen países que son consumidores netos, para los que la exportación no supera la importación, y países que son productores netos, en caso contrario.

Existe así un flujo de países productores a países consumidores, con un conjunto de flujos dominado por unas pocas transacciones en cuanto a peso total, pero con muchos otros intercambios de peso muy inferior. Esta red posee muchas conexiones, por lo que Serrano y sus colegas aplicaron un método que les permitía extraer el esqueleto. Sencillamente, eliminaban todas las conexiones por debajo de cierto umbral (relaciones de muy poco peso), de tal manera que la red final mantiene, pese a todo, alrededor del 50 % del flujo de comercio mundial. En la figura 3.7 aparecen dos ejemplos de la arquitectura de estas redes en dos momentos concretos: 1960 y 2000. La primera corresponde a la red en un periodo de guerra fría en el que Rusia aparece esencialmente aislada del resto del mundo y China apenas es visible. Cuarenta años más tarde el gigante asiático es una economía en plena alza. Países como Japón o Francia experimentan también importantes cambios en sus relaciones comerciales y otros como Inglaterra (que era su único competidor en esta red en 1948) parecen declinar. Estados Unidos mantiene su preeminencia en todo este periodo.

El estudio se completó con un experimento de simulación, que los autores llamaron «el experimento del dólar». La idea es generar un dólar (como referencia) en un punto de la red y dejar que éste se vaya transfiriendo entre distintos nodos empleando las conexiones existentes y su importancia relativa. El dólar se genera en nodos que sean exportadores netos. Concretamente, si nuestro dólar se encuentra en el nodo de Estados Unidos del año 2000, podrá desplazarse a muchos países que comercian con Estados Unidos, pero lo más probable es que se dirija a China, Canadá o Japón, con menos probabilidad a México o Alemania, y con menor probabilidad aún hacia otro país. Una vez alcanzado el nuevo país, repetimos la operación, a menos que el dinero sea «absorbido», lo cual puede ocurrir si el país es un importador neto. Si repetimos estas operaciones muchas veces, tendremos una red en la que se dará un flujo constante de dinero en circulación.

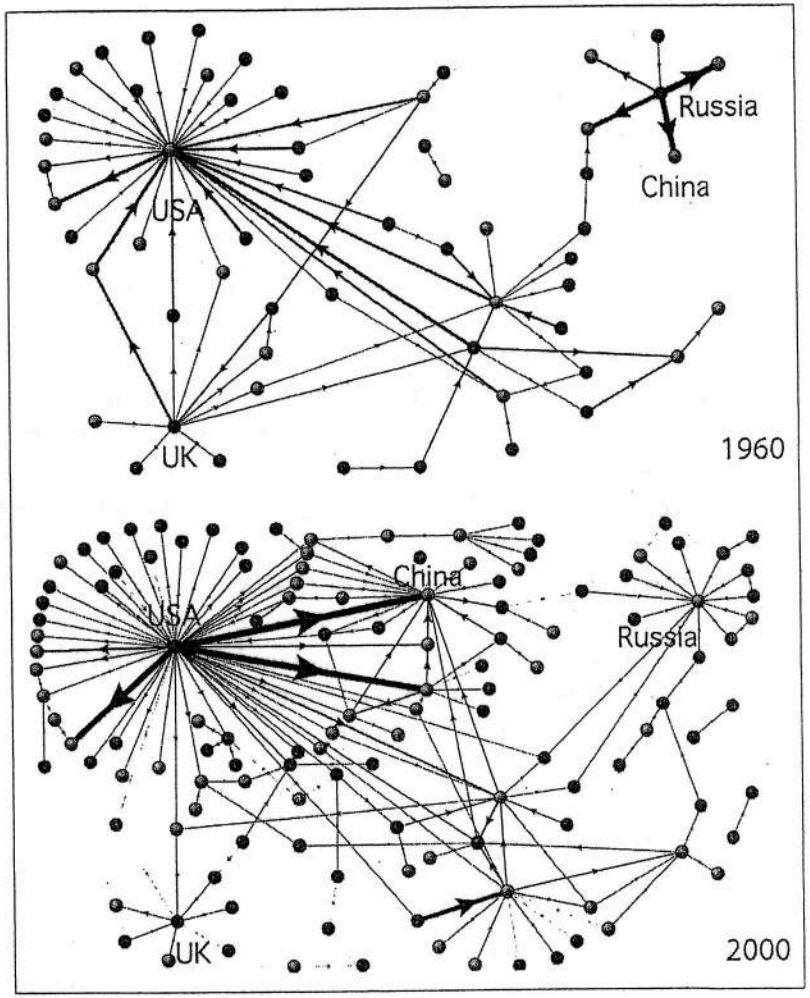


Figura 3.7. Evolución en la estructura de la red mundial de comercio (basado en Serrano, Boguñá y Vespignani, 2007). Aquí se muestran dos redes correspondientes a los años 1960 y 2000 en las que aparecen las conexiones más relevantes por encima de cierto umbral. Cuarenta años después, los balances de los flujos comerciales han cambiado enormemente como consecuencia de la globalización y los cambios ocurridos en los países del este de Europa, entre ellos el hundimiento de la Unión Soviética. (Imagen reproducida por cortesía de Marian Boguñá.)

Serrano y sus colegas emplearon estos flujos para definir una nueva red: la que nos dice, para cada par de países, la probabilidad de que un dólar emitido en el primero sea absorbido en el segundo. De esta forma, podemos estudiar adónde va a parar el dinero invertido por un país dado. Puesto que este intercambio puede haberse llevado a cabo a través de un camino cualquiera, la red nueva no es una red de interacciones directas, sino que incluye también posibles caminos alternativos a través de segundos o terceros países. El estudio dio lugar a algunos resultados inesperados. En particular, se observó que países que poseen un peso aparentemente menor en la red mundial de comercio resultan ser muy importantes por cuanto se refería a estos flujos. Rusia, por ejemplo, importa sobre todo de Alemania, pero el análisis global mediante el experimento anterior revela que una tercera parte de lo que Rusia gana en dinero a partir del comercio procede, directa o indirectamente, de Estados Unidos. Asimismo, de cada dólar neto que se inyecta en China desde Estados Unidos, sólo un 9,3 % se retiene en el país asiático, pese a la importancia de la conexión directa que puede apreciarse en la figura 3.6. Un país como Suiza, por otra parte, resulta ser un inversor importante en países con los que no mantiene relaciones de intercambio directas, tales como Japón, Indonesia o Malasia.

Tal y como señalan estos físicos, las complejas relaciones que define la red de comercio mundial impiden llevar a cabo extrapolaciones gratuitas. Aunque parece razonable considerar las relaciones directas entre países como orientación para entender y predecir el cambio en la economía a gran escala, el experimento del dólar nos sugiere que debemos ser cautos. Si las relaciones causales están mediadas por cadenas de interacciones, entonces predecir el curso de los acontecimientos bajo una crisis económica puede ser una tarea muy ardua. Los cambios que se produzcan en un país dado repercutirán sobre otros de forma más o menos importante, dependiendo no tanto de sus intercambios directos, sino de todas las posibles vías de conexión que permite la red.

¿Qué nos depara el futuro? ¿Seguirá la sociedad conectada cambiando en direcciones insospechadas? Es difícil saber qué ocurrirá, pero no cabe duda de que el siglo XXI traerá de la mano nuevas formas de manejar la información y de sumergirnos en ella. La propia red puede evolucionar espontáneamente en formas imprevistas. Entre otros estudios acerca del desarrollo de comportamientos autónomos en la red, destacan dos ideas: la de desarrollar un sistema inmunitario informático y la de crear una reserva de la biodiversidad formada por organismos digitales. Diversos investigadores, como Stephanie Forrest o Thomas Ray, ambos miembros del Instituto de Santa Fe, han contribuido de forma crucial al desarrollo de estas ideas. Forrest y sus colaboradores han estudiado la posibilidad de generar sistemas informáticos (programas de ordenador) capaces de distinguir lo propio de lo ajeno, como ocurre con nuestro sistema inmunitario celular. Lo ajeno correspondería a virus de ordenador, usuarios no autorizados o códigos extraños. Idealmente, este sistema debería poseer cierto grado de adaptación y capacidad, no sólo para detectar nuevos intrusos, sino para poseer una memoria interna de anteriores ataques. A su vez, Ray ha investigado la evolución de programas que emplean la memoria del ordenador como su hábitat y fuente de recursos. En estos experimentos, las formas de «vida» digital pueden copiarse pero también mutar (como ocurre con los sistemas biológicos), y dar así la posibilidad de crear nuevas formas de organización. Ray descubrió que la evolución de estos ecosistemas virtuales genera parásitos, sexo, cooperación y otras formas de organización similares a las de la biosfera, y ha sugerido la posibilidad de crear una contrapartida computacional en la que se podría desarrollar a gran escala estas formas de vida artificial. Así, utilizando la red mundial de ordenadores, podríamos tal vez tener la oportunidad de observar un experimento de evolución a gran escala en el que podría surgir una nueva biosfera

digital. ¿Qué ocurriría? Éste es un experimento enormemente interesante pero no exento de problemas, dado que si las criaturas virtuales pueden cambiar, nada nos previene de que en algún momento puedan expandirse sin cesar e invadir nuestros sistemas.

La imaginación de algunos escritores de ciencia ficción ya ha considerado algunas posibilidades. En su cuento titulado «Marque F de Frankenstein», Arthur C. Clarke describía un futuro (que debía situarse en diciembre de 1975) en el que la red telefónica se conectaba globalmente a través de satélites y provocaba la aparición de una inteligencia cibernética. Antes del final, algunas señales anuncian el cambio: errores en la gestión de los bancos, el control del tráfico o las líneas telefónicas. La nueva entidad tomaba el control de la sociedad y la llevaba a su fin: «Para el *Homo sapiens,* el timbre del teléfono había sonado». Parece improbable que algo así tenga lugar, pero sí podemos esperar que la red alcance nuevos umbrales de complejidad que la lleven a generar comportamientos propios. Tal y como nos dice el ingeniero y matemático Daniel Hillis, pionero de la computación paralela:

> «A medida que la información accesible a través de Internet se haga más rica y las formas de interacción entre los ordenadores conectados entre sí sea más compleja, espero que Internet empiece a exhibir comportamientos emergentes que vayan más allá de lo que nadie haya programado explícitamente dentro del sistema». (Hillis, 1998.)

La red posee algunas propiedades especiales no muy distintas del clima o la economía, como la existencia de tormentas de congestión, y un fascinante papel facilitador de los movimientos sociales. Pero la información intercambiada entre las máquinas que definen esta telaraña no es realmente manipulada por éstas. Se envía y se recibe, se almacena o elimina. Los ordenadores no toman decisiones sobre qué información es relevante para sí mismos o cómo emplearla en su propio beneficio. La red aún es un sistema a nuestro servicio y tiene poco que decir como sistema autónomo, dado que hasta hoy somos nosotros los que tomamos las decisiones. En cierta forma, Internet es un organismo que se está desarrollando y que, como un embrión en crecimiento, atraviesa fases de complejidad creciente. Cabe preguntarse si, como el animal que termina su desarrollo, la red mundial cambiará de forma inesperada y, a su manera, despertará.

4
Virus y epidemias

La peste es como un incendio.

Daniel Defoe, *Diario del año de la peste*

Algunos dicen que el sida nos ha hecho estar más alerta a los nuevos virus. Desearía que eso fuera cierto.

Joshua Lederberg

Sólo cuando nos enfrentemos a la arquitectura del mundo social real podremos apreciar lo verdaderamente difícil que resultará detener la epidemia del sida. No obstante, al mismo tiempo, una comprensión más profunda puede proporcionarnos unas pistas importantes acerca de la mejor forma de intentarlo.

Mark Buchanan, *Nexus*

La epidemia

Un viejo sueño de la humanidad es la posibilidad de predecir lo que ocurrirá con nuestra vida, nuestro trabajo o con la vida de aquellos a los que amamos, por no hablar de las posibles desgracias que nos amenazan. Una tarea ardua, sin duda, ya que, como dijo con ironía el físico danés Niels Bohr: «Predecir es difícil, especialmente el futuro». A lo largo de la historia, reyes y príncipes han querido saber lo que les deparaba el destino acudiendo a todo tipo de supuestos visionarios. Los llamados astrólogos, ayudados en su empeño por cartas astrales, bolas de cristal, vísceras de pollo o simplemente su imaginación se empeñaron durante siglos en vislumbrar lo que iba a acontecer. Las estrellas, se decía, permitían interpre-

tar en el firmamento el destino de los hombres, su fortuna o desgracia. A veces algo totalmente inesperado ocurría en aquel cosmos que, de acuerdo con Aristóteles y la Iglesia católica, era inmutable: un eclipse de Sol que oscurecía la luz del día o una estrella repentinamente brillante reclamaban la atención de los ciudadanos de medio mundo, que alzaban su mirada al cielo. En algunas ocasiones memorables, la incapacidad de los astrólogos para predecir aquellos fenómenos sorprendentes era castigada de forma severa y en China incluso les costaba la cabeza. Cuando uno enciende hoy la televisión y ve a las nuevas generaciones de adivinos se pregunta por qué algunas tradiciones se han perdido.

Un episodio de gran importancia tuvo lugar poco antes del gran incendio de Londres de 1666, cuando un cometa muy brillante cruzó el cielo de Europa entre finales de 1664 y principios de 1665, aterrorizando a muchos de sus habitantes. Por los relatos que nos han dejado diversos documentos, el asombro estaría más que justificado: el cometa brillaba sin rival en mitad del cielo nocturno y era bien visible incluso en algunos momentos del día. Sería fantástico poder viajar en el tiempo, detenerse en una de aquellas calles atestadas y mirar a lo alto, contemplando la cola enorme y espectral que barrería la noche helada.

Para los londinenses de aquella época, llena de supersticiones y pocas luces, el cometa no era recibido con alegría sino como un mal augurio. La peste, resultante de la infección de la bacteria *Yersinia pestis,* que ya había diezmado Europa a mediados del siglo XIV, reapareció con la llegada del cometa y fue, de hecho, sólo un pálido reflejo de la devastación anterior. En aquella ocasión, la plaga se había extendido con tal rapidez que, antes de que nadie pudiera reaccionar, había ya acabado con un tercio de la población europea. Como es habitual cuando se prepara un cóctel de miedo, religión y superstición, muchos inocentes pagaron aquella desgracia con su vida. Los buenos cristianos, por ejemplo, asesinaron a dos mil judíos en Estrasburgo en febrero de 1349 en una de las muchas masacres emprendidas contra esta comunidad. El pecado de los judíos era el hallarse misteriosamente menos afectados por los efectos de la peste, debido a unos hábitos algo más higiénicos que los del resto de conciudadanos. Y en el mundo musulmán, las mujeres estuvieron en el punto de mira de la represión, basada en la idea de que la «impureza» de éstas podría causar la plaga.

Daniel Defoe (autor de la célebre novela *Robinson Crusoe)* nos dejó un diario excepcional de la epidemia en el que narraba su extensión barrio tras barrio y calle tras calle durante 1665, «el año de la Peste». La peste bubónica empezó a causar bajas en la parroquia de Saint Giles, para extenderse progresivamente como un incendio por toda la ciudad, y acabar con la vida de una quinta parte de sus habitantes, la mayoría de ellos pobres. El relato de Defoe es a la vez una narración del horror y el desconcierto de una población atrapada por la epidemia y un fiel registro de las bajas humanas que ésta generó. El relato es también la memoria de las luces y sombras de un tiempo en el que los conceptos de patógeno y de vacuna estaban aún muy lejos de ser conocidos.

La peste ya no volvió a Londres, en gran parte gracias a los cambios surgidos del gran incendio que destruyó las zonas más pobres e insalubres y también acabó con las ratas y las pulgas que portaban el bacilo. La ineficacia de los remedios mágicos sin ninguna base ni sentido pasó factura a la irracionalidad, dejando a la alquimia y a los curanderos impostores en una posición lamentable. Lentamente, la observación y la praxis científica se abrieron paso a través de la oscuridad. Pero casi dos siglos después, el cólera fue el instrumento de la muerte, atacando una ciudad ya entonces de enormes proporciones (con dos millones de habitantes) que estaba lejos de ser un ejemplo de higiene: las aguas contaminadas (figura 4.1) y la ausencia de mecanismos adecuados de eliminación de residuos prepararon el escenario de una epidemia mortal que acabó esta vez con la vida de decenas de miles de personas sólo en Londres. Los documentos de la época permiten situar

Figura 4.1. El cólera fue una de las últimas epidemias que azotaron las ciudades europeas durante el siglo XIX. En esta representación satírica de la enfermedad, aparecida en el semanario decimonónico londinense *Punch,* la muerte aparece remando sobre las aguas del Támesis.

exactamente su inicio: el 28 de agosto de 1854 Sarah Lewis, cuyo hijo se encontraba gravemente enfermo con fiebre alta y diarreas constantes bajó a la calle, frente a su casa del número 40 de Broad Street para vaciar un cubo de agua contaminada. «Así es como empezó», nos relata Stephen Johnson en *El mapa fantasma,* un relato emocionante y humano de la peor epidemia de cólera que haya afectado nunca a una ciudad de Occidente. Una vez más, un bacilo mortal se llevaba por delante la vida de adultos y niños, sin distinción alguna y sin cura aparente, propagándose por la ciudad como un espectro. Al final, la epidemia fue vencida y su origen comprendido, pero por desgracia la enfermedad siempre se abre camino en los frentes más débiles, y doscientos años después, Londres y todo el planeta sufrían el embate de una nueva pandemia, esta

vez transportada por un virus: el VIH o virus de la inmunodeficiencia humana.

Desde aquellos tiempos en los que se ignoraba todo acerca de los orígenes de la plaga y sus posibles remedios, la humanidad se ha visto azotada una y otra vez por grandes y pequeñas epidemias, algunas de ellas silenciosas, pero más devastadoras que la peste negra. En algunas ocasiones, una pandemia mortal como la encefalitis letárgica, que causó estragos en los años veinte del siglo pasado, desapareció sin dejar rastro. Y nada parece indicar que estemos libres de ser atacados de nuevo en el futuro. Pero las cosas se han complicado: hoy carece de sentido pensar en epidemias que se propagan a través de ciudades, calle tras calle. Nuestro mundo, este mundo pequeño en el que habitamos, ha borrado las fronteras entre ciudades y países. En un mundo pequeño, un virus o una bacteria pueden abrirse camino con enorme facilidad a través de la red de comunicación que permite a cualquier individuo volar desde una ciudad de Asia a otra de Sudamérica en cuestión de horas. Para predecir los posibles escenarios futuros de infección, debemos una vez más mirar hacia un mundo sin geografía.

La propagación

Una epidemia requiere dos condiciones clave para prosperar. La primera es la presencia de un organismo patógeno simple, un parásito que emplee a su huésped como sistema de transporte en el que replicarse y prepararse para infectar de nuevo. La segunda es una población de portadores lo bastante adecuada para que el proceso de infección sea efectivo. Los organismos patógenos, particularmente los virus y las bacterias, han desarrollado complejas estrategias que les permiten burlar las defensas de sus huéspedes e infectar poblaciones enteras. Estas estrategias son muy variadas, y abarcan desde mecanismos de reconocimiento de moléculas concretas en las membranas de algunos tipos de células hasta formas de engaño

sofisticadas. Una elección perfecta es propagarse a través del aire, reproducirse en el aparato respiratorio del huésped y forzar a éste a expulsar cientos de miles de virus empleando estornudos. El virus de la gripe o el del resfriado común son dos buenos ejemplos en este sentido. Algunos virus utilizan como huéspedes a las células que deberían defender al propio organismo (como es el caso del virus de la inmunodeficiencia humana o VIH). El VIH y otros virus de la familia de los lentivirus poseen además un tiempo de desarrollo muy dilatado (antes de que aparezcan síntomas graves) que se extiende a lo largo de varios años, lo que les permite permanecer asociados a su huésped y seguir infectando a otros individuos. Ser demasiado eficiente, por otra parte, puede resultar poco adecuado. Así, el virus del Ébola, con sus elevadísimas tasas de mortalidad (las mayores conocidas), resulta enormemente eficaz al replicarse e infectar los tejidos, pero da muerte al portador con demasiada rapidez, lo que limita enormemente el alcance de sus efectos.

El proceso de aparición de una infección incorpora varios aspectos de azar, el primero de los cuales es la generación de una mutación en el genoma de un virus o una bacteria que les permita infectar con mayor eficiencia. En el caso de los virus, sus genomas pueden imaginarse como pequeños conjuntos de instrucciones simples. Estas instrucciones definen el programa de cómo infectar, penetrar en el interior de la célula, tomar el control de la maquinaria genética y de cómo salir una vez el genoma se ha copiado y empaquetado adecuadamente. La mutación es un fenómeno aleatorio e implica un cambio habitualmente mínimo en el genoma del organismo en cuestión. Un cambio muy pequeño puede bastar para que un virus hasta aquel momento inocuo se convierta en letal. Podemos pensar esta variación como una minúscula modificación de alguna de las instrucciones del programa. Con mucha frecuencia, estos cambios tienen un impacto negativo: el programa se hace defectuoso y el virus no podrá funcionar correctamente. Pero en ocasiones el virus se hace más infeccioso, más estable e incluso más mortífero.

¿Cómo tiene lugar el proceso de extensión de una epidemia en una población? Podemos visualizarlo con facilidad empleando un modelo del fenómeno: en lugar de pensar en seres humanos que se mueven en el espacio y entran en contacto, realizaremos una simplificación mental del problema. Supongamos que nuestra población ocupa las casillas de un enorme tablero. En cada casilla cabe un individuo y sólo se puede poner en contacto con sus cuatro vecinos más cercanos (figura 4.2a). Supongamos que el individuo en la casilla central está infectado, e indiquemos este estado con una bola oscura. El resto de individuos están sanos y su estado aparece indicado por una bola clara. Un individuo infectado puede recuperarse y convertirse en un individuo sano o permanecer en el mismo estado. Supongamos, para simplificar, que la probabilidad de que sane es la misma que la de permanecer enfermo: cada posibilidad se decide con el lanzamiento de una moneda. A continuación debemos considerar un elemento adicional: nuestro individuo infectado puede contagiar a aquellos con los que entra en contacto. La probabilidad de que ello ocurra será una medida de la eficiencia del agente infeccioso: si es baja, nos dirá que el virus o la bacteria tienen dificultades para saltar a nuevos individuos. Si es alta, significa que el patógeno lo hará con facilidad. Imaginemos que al principio nuestro tablero está ocupado únicamente por individuos sanos con excepción de la casilla central, que ocupa un individuo infectado. Este individuo entra en contacto con sus cuatro vecinos, cada uno de los cuales puede ahora ser infectado. Si la probabilidad de infección es baja, lo que ocurrirá es que la epidemia no dispone de suficiente patogenicidad como para propagarse, de manera que domina la recuperación sobre la infección y el tablero termina tarde o temprano vacío de individuos infectados. En este caso, lo que veremos a lo sumo es un ensayo fracasado de propagación que termina por remitir. Por el contrario, si la capacidad de infección es alta, lo que ocurrirá es que los vecinos de nuestro individuo central serán infectados con casi toda seguridad

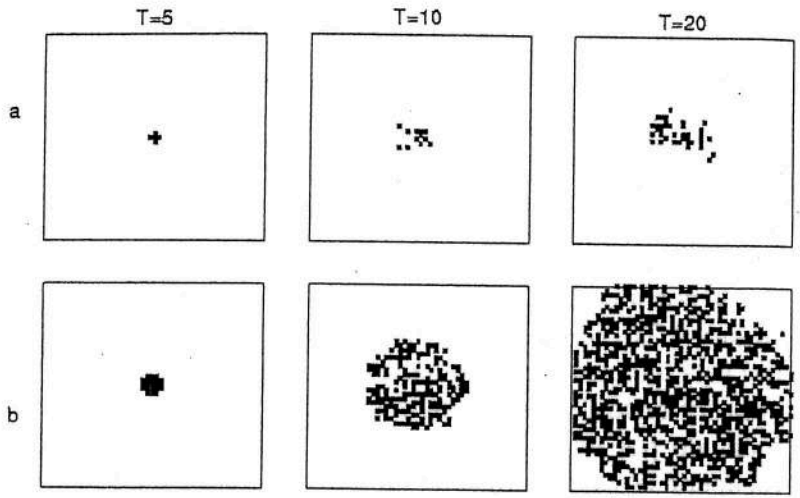


Figura 4.2. Propagación de una epidemia en un mundo virtual, definido como una red cuadrada (un tablero de ajedrez) en el que cada casilla está ocupada por un individuo. Los individuos infectados se indican como cuadrados negros. La fila superior (a) corresponde a una epidemia fallida que a la larga termina extinguiéndose. La fila inferior (b) es un ejemplo de propagación efectiva, que termina infectando a un gran número de individuos. (Gráficos de Ricard Solé.)

e infectarán posteriormente a su vez a sus vecinos y así sucesivamente (figura 4.2b).

El fenómeno de propagación se parecerá a un incendio que encuentra pastos secos por todas partes. La epidemia se establecerá sin dificultad y permanecerá. Estos dos casos extremos encajan bien con nuestra intuición. La conclusión que extraeríamos es que cualquier situación intermedia será una mezcla de ambos extremos: a mayor tasa de infección, mayor número de individuos infectados. Pero como ocurre muy a menudo al tratar con sistemas complejos, las cosas resultan ser bien distintas. Lo que ocurre en realidad es que, por debajo de cierta tasa mínima de infección, la epidemia siempre termina por desaparecer, mientras que por encima de ésta siempre acaba persistiendo. Esta idea se resume en la figura 4.3, que muestra el número final de infectados en función de la tasa de infección. Para probabilidades de infección menores

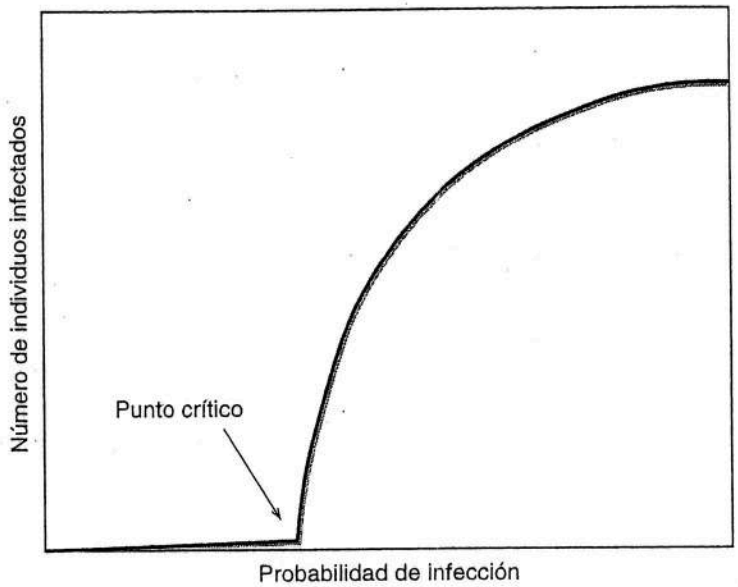


Figura 4.3. Transición de fase en epidemias. El número de individuos infectados se representa aquí en función de la probabilidad de infección. Cuando ésta es inferior a cierto umbral crítico, la epidemia es incapaz de establecerse y se extingue. Por el contrario, superado el umbral, la epidemia siempre tiene éxito. (Gráfico de Ricard Solé.)

que la probabilidad de recuperación, vemos que la epidemia es incapaz de persistir, mientras que, superado este umbral crítico, el impacto de la epidemia crece con rapidez. Este escenario de todo-o-nada es de enorme importancia por muchos motivos, sobre todo porque nos indica que se requiere una capacidad mínima de infección que si no es alcanzada impide que la población propague la enfermedad. Los patógenos que no puedan alcanzar este umbral simplemente desaparecerán.

Este comportamiento tiene además una implicación práctica inmediata: si vacunamos a una cantidad suficiente de individuos, éstos harán de barrera a la propagación, dificultando la aparición de un proceso epidémico. De hecho, si el número de individuos inmunizados es lo bastante grande, lo que

sucederá es que el umbral crítico se desplazará a la derecha de la gráfica: el patógeno deberá ser lo bastante eficiente como para superar el nuevo umbral y es muy posible que no lo consiga. En este concepto descansa en gran medida la efectividad de las vacunas, no sólo como prevención individual sino como arma para protegernos de la aparición de pandemias. Una aplicación intensa de esta aproximación puede conseguir incluso eliminar por completo un patógeno a escala mundial. Así ocurrió por ejemplo con la viruela, que tras causar, sólo en Europa, unos sesenta millones de muertes, y se estima que entre trescientos y quinientos millones en todo el mundo durante el siglo XX, fue erradicada por completo en 1977, con lo que se confirmó la predicción de uno de los pioneros de la vacunación, Edgard Jenner, que ya indicó esta posibilidad en el siglo XIX.

El modelo de infección que hemos presentado se basa en una imagen de la sociedad en la que cualquier individuo puede infectar en promedio a unos pocos. No es una aproximación del todo incorrecta, y de hecho la teoría basada en este modelo ha permitido establecer programas de vacunación efectivos en muchos casos. Pero ya sabemos que los individuos se relacionan a través de una trama social cuyo tejido tiene una estructura peculiar, alejada de la estructura de tablero que acabamos de comentar. Para complicar aún más las cosas, la aparición de Internet ha dado paso a un nuevo tipo de criaturas digitales que también se propagan y generan problemas. Al estudiar cómo tiene lugar este fenómeno, dos físicos terminaron por descubrir que las cosas pueden resultar muy distintas cuando tienen lugar en un mundo pequeño.

Virus digitales

Los sistemas complejos en evolución suelen desarrollar formas de organización similares y todos ellos parecen poseer en común la presencia de parásitos. Los virus y las bacterias

de las que hemos hablado antes son el ejemplo más conocido, pero sospecho que el parasitismo es un fenómeno tal vez universal e inevitable. Podríamos afirmar que cualquier sistema complejo que posea un contenido de información lo bastante elevado y la capacidad de explotar recursos externos para sobrevivir será susceptible de ser parasitado por alguna entidad de menor complejidad, incapaz de emplear eficientemente los mismos recursos pero capaz de extraerlos de su sistema huésped. Esta definición abstracta de parasitismo incluye como casos especiales los virus y bacterias patógenos, y abre la puerta a una clase adicional de criaturas: los virus digitales.

Nadie sabe cuándo apareció la primera forma de parásito molecular en nuestro planeta y es probable que nunca lo sepamos con certeza, aunque es más que probable que fueran desde el principio uno de los elementos clave de la evolución de la vida. Lo que sí podemos afirmar con total precisión es cuándo se originó el primer virus digital, precursor de los que posteriormente convirtieron la red en un lugar menos hospitalario de lo que uno desearía. A lo largo de varios años hubo diversos intentos de crear sistemas digitales capaces de reproducirse y propagarse entre ordenadores, hasta que en 1983 Fred Cohen, un ingeniero electrónico en busca de tema para su tesis doctoral generó el primer virus digital: un programa simple que poseía la capacidad de transferirse a sí mismo y copiarse en distintos ordenadores conectados en un sistema de entorno UNIX. En aquel momento Internet aún no existía y la propagación se podía llevar a cabo empleando el sistema de distribución de archivos: dado que todos los usuarios empleaban ciertos programas comunes, el virus se instalaba en éstos para así saltar a la máquina que los solicitara junto con el programa requerido. Aunque la parte del programa del virus que permitía su propagación era simple (y Cohen la programó en cinco minutos), existía una segunda parte que Cohen introdujo como sistema de seguridad: el usuario que recibía el virus debía pedir permiso a su creador antes de copiarlo. En to-

tal, el virus y sus reglas de comportamiento quedaban descritos por unas doscientas líneas de código en lenguaje de programación C. Una vez implantado dentro de un programa específico al que los usuarios accedían, el virus buscaba en el sistema de ficheros del receptor hasta encontrar un lugar en el que copiarse (eligiendo el programa más popular) y el proceso seguía adelante. En cuestión de minutos, se había propagado a todo el sistema. La primera forma de parásito digital capaz de infectar ordenadores acababa de ver la luz.

Pese a la importancia del resultado, su acogida significó una de cal y otra de arena. Los resultados de Cohen se acogieron con cautela e incluso con preocupación. En una ocasión, después de dar una conferencia en Canadá acerca de sus trabajos, fue advertido por un oficial estadounidense de que, de haberlo sabido el departamento de Estado, no habría sido autorizado a llevar a cabo sus investigaciones. Y lo cierto es que nadie entonces sospechaba hasta qué punto los virus digitales resultarían una amenaza. En aquel momento, era un resultado de gran importancia, dado que demostraba que, como ocurre en el mundo natural, en presencia de un ambiente adecuado y de los recursos apropiados para ello, la aparición de un sistema de información parásito era casi inevitable. Y como a menudo ocurre en la realidad, si las cosas pueden ir mal, terminan yendo mal.

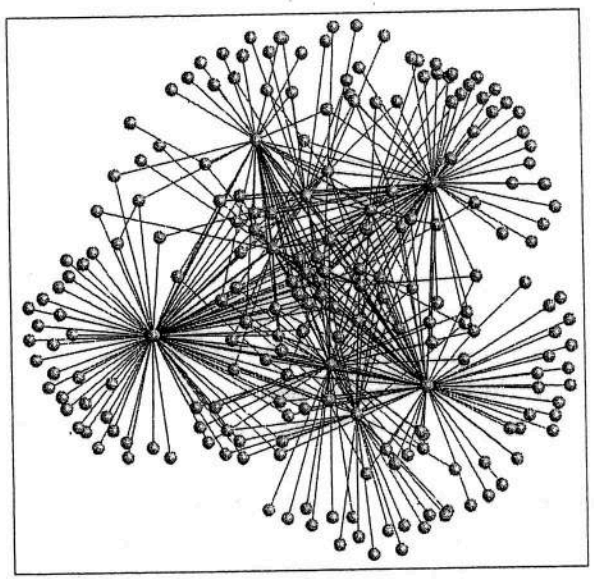
En noviembre de 1988, un estudiante de 21 años de la Universidad de Cornell, en Estados Unidos, liberó un virus que se dio a conocer como «el gusano de Internet» y que, a diferencia del virus de Cohen, escapó rápidamente a cualquier tipo de control y afectó a miles de ordenadores, que se colapsaron. Era el inicio de una nueva era en la que los virus digitales y los sistemas de defensa frente a éstos (los conocidos como antivirus) comenzaban una carrera armamentística imparable.

Hoy en día los virus digitales complican nuestra vida: son programas con capacidad para invadir nuestra privacidad y destruir lo que se les antoje. Algunas de estas invenciones han alcanzado una fama tan breve como nefasta, y han llegado a protagonizar las portadas de periódicos y revistas de gran tirada. El virus *I love you,* por ejemplo, infectó a más de medio millón de usuarios a través del correo electrónico y causó cuantiosos estragos económicos. Numerosos organismos públicos, entre ellos el Pentágono o el Parlamento británico, se vieron obligados a cerrar sus cuentas de correo electrónico para evitar daños mayores. Como ocurre también en la naturaleza, el sistema termina desarrollando una resistencia basada en mecanismos de defensa y a su vez los virus se hacen más complejos en su interacción con nuestros ordenadores. A lo largo de los años, virus digitales cada vez más agresivos empezaron a causar pérdidas económicas importantes y a dejar de ser una mera curiosidad. A sus ataques respondieron sistemas antivirus que fueron capaces de reconocer con mayor efectividad a sus presas. Pero la carrera continúa, y los virus digitales se han hecho más silenciosos y sutiles, buscando un punto débil en el sistema e instalándose sin despertar sospechas para acceder a la información y propagarse de nuevo.

En algunos casos, las similitudes entre la evolución de los virus artificiales y sus contrapartidas biológicas son notables: al igual que ocurre en la naturaleza, una estrategia muy apropiada es un desarrollo lento, oculto en el interior del huésped, que permita que la presencia del invasor pase inadvertida. Los antivirus, a su vez, crean una barrera para evitar la infección y así contribuyen a contener la propagación. Y sin embargo, pese al empleo de antivirus, los virus digitales suelen permanecer largo tiempo en circulación, durante periodos de incluso varios meses. Esta observación resulta extraña si se tiene en cuenta que los antivirus suelen estar disponibles al cabo de apenas unos días después de la primera detección. Intentando comprender esta extraña paradoja, los físicos Romualdo Pastor-Satorras y Alessandro Vespignani se preguntaron cuál sería su origen. Al dirigir su estudio hacia el efecto de la arquitectura de la red, descubrieron algo inesperado. Dado que los virus se propagan de ordenador a ordenador, el nú-

mero de conexiones de la máquina afectada será alto y cuantas más conexiones, mayor será el número de posibles infecciones. Si emplea el sistema de correo electrónico, el virus puede disponer de una pequeña o gran lista de direcciones de correo que seguir. En general, un usuario concreto sólo empleará un número reducido de direcciones, que forman la lista de amigos, conocidos o contactos profesionales. Pero ¿qué ocurre si la lista es enorme? En ese punto el virus desencadenará una explosión de infecciones y tal vez miles de ordenadores resultarán infectados. Podemos dibujar de nuevo la gráfica del número de infectados en función de la tasa de infección para comprobar el impacto de estas redes sobre la presencia de un umbral crítico de infección. Al hacerlo, Pastor-Satorras y Vespignani se encontraron con que el punto crítico se había esfumado (figura 4.4). El umbral dejaba de existir y la curva resultante indicaba que siempre se produciría la propagación.

Este resultado cambia las cosas de forma alarmante. No importa que el virus sea poco o muy efectivo: basta con que infecte algún elemento de la red y que alcance en algún momento uno de los conectores principales. Esta conclusión nos dice que debemos estar preparados para proteger los elementos más conectados si queremos mantener el sistema a salvo. Cálculos matemáticos y simulaciones realizados por varios investigadores, entre ellos Stephan Bornholdt, Damián Zanette, Laszlo Barabási y Robert May, demuestran que de hecho esta cualidad especial de los elementos más conectados podría emplearse de forma efectiva para proteger la red de forma más eficiente. Un control cuidadoso de éstos permite bloquear la propagación, dado que su efectividad está limitada por la posibilidad de que el patógeno alcance un conector esencial (un individuo con muchas conexiones). Y esta lección no se limita al mundo virtual. Otra red no menos importante, asociada a una amplia clase de enfermedades humanas, está sometida a las mismas reglas.



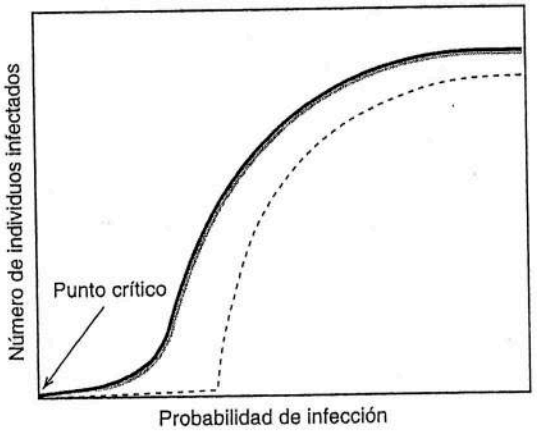


Figura 4.4. La propagación de epidemias en redes libres de escala tiene un efecto sorprendente (compárese con la figura anterior). Arriba se muestra un ejemplo de la red de correos electrónicos de un grupo pequeño de miembros de una compañía. La red es libre de escala, con una mayoría de individuos intercambiando correos con unos pocos miembros pero también con algunos individuos que intercambian muchos correos. En estas redes, la propagación de virus se comporta de forma muy distinta a lo que esperaríamos: el umbral crítico se desvanece (se va a cero), el virus se propaga siempre. Por comparación se muestra la curva anterior (discontinua). (Dibujo y gráfico de Ricard Solé.)

El estudio de las pandemias digitales y las consecuencias de la estructura libre de escala de Internet no se limitan tan sólo a los sistemas artificiales. Por el contrario, resultan ser relevantes, y mucho, para entender una clase especialmente crítica de enfermedad infecciosa: las enfermedades de transmisión sexual. Éstas son numerosas y entre las más conocidas figuran el sida, la gonorrea o el herpes. Por lo que hemos visto, es bien seguro que su éxito se debe a su efectividad en el momento de la infección pero también, y tal vez en gran medida, a la estructura de la red social (además de factores diversos, en los que no faltan elementos económicos y culturales nada despreciables). Dentro de esta red nos encontramos con un subconjunto de interacciones que implican sexo. ¿Son estas redes mundos pequeños? Esta pregunta fue respondida de forma afirmativa por Fredrik Liljeros y sus colaboradores, cuando analizaron la estructura de la trama de contactos sexuales entre grupos de riesgo y concluyeron que este tipo de relación tiene puntos en común con Internet y otras redes. Este equipo estudió datos recogidos en una encuesta sobre el comportamiento sexual llevada a cabo en 1996 en Suecia. Dicha encuesta, realizada en forma de entrevista y de cuestionario y en la que participó una muestra aleatoria integrada por 2810 suecos con edades comprendidas entre los 18 y los 74 años, reveló que casi todas las personas de la red habían tenido contactos muy ocasionalmente con otras personas, mientras que unos pocos de ellos habían tenido un gran número de contactos. Esta diversidad quedó plasmada en la correspondiente red de contactos, que resulta ser muy similar a la que mostrábamos en la figura anterior. En concreto, se concluyó que el 10 % de los hombres más conectados copaban el 48 % de las conexiones sexuales, siendo la cifra del 40 % en el caso de las mujeres. Por otra parte, el 50 % de los hombres menos conectados presentaba el 12 % de los contactos sexuales, cifra que en el caso de las mujeres era del 15 %. Estudios independientes de otras redes sexuales en otros países y con distintas situaciones sociales confirmaron este resultado de manera general. En el análisis que Liljeros llevó a cabo, los individuos más activos habían tenido del orden de decenas de relaciones a lo largo del último año. Cuando se analizaba la misma información pero solicitando el número total de relaciones a lo largo de toda la vida, los individuos más activos llegaban a sumar cientos (cerca de mil en un caso) de conexiones. En palabras del físico estadounidense Eugene Stanley, Don Juan existe.

Como acabamos de mencionar al estudiar los virus digitales, este modelo de conexiones tiene importantes consecuencias en la propagación de un patógeno, y ello incluye también a los virus reales, en particular aquellos asociados con enfermedades de transmisión sexual. Al igual que ocurre con las redes informáticas, estas redes sociales, de carácter tan marcadamente heterogéneo, facilitan la propagación de epidemias, incluso de aquellas enfermedades con bajas tasas de infección. Esto supone que este tipo de enfermedades se convierte en algo prácticamente imposible de erradicar dado que las personas que mantienen numerosos contactos sexuales (principalmente en el mundo de la prostitución) actúan como concentradores para la propagación de la enfermedad. Cuando un individuo es altamente promiscuo, también aumenta la probabilidad de que en un momento dado contraiga una enfermedad. Es más, cuando una persona con muchos contactos sexuales se infecta, aumentan enormemente las posibilidades de que la enfermedad se transmita a otras personas, dado que por definición ésta posee muchos contactos posibles. La teoría muestra con toda claridad que, a menos que los esfuerzos de inmunización afecten a los elementos muy conectados, la estrategia seguramente fallará. Pero una estrategia de vacunación adecuada, que tenga en cuenta que existen elementos especialmente sensibles dentro de la red social, puede tener un éxito considerable.

En el caso de las enfermedades de transmisión sexual, las peculiaridades de la red son notables. Ya hemos mencionado

antes que la estructura es muy heterogénea. Numerosos ejemplos ilustran esta organización. En un análisis de las redes de contactos sexuales en Burkina Faso, llevado a cabo por el físico italiano Vito Latora y sus colaboradores, se comprobó que la red era libre de escala para la población masculina con un número medio de relaciones bajo (alrededor de dos), con un máximo de una veintena en el caso más extremo, lo que confirma los resultados de Liljeros. Pero al estudiar la población femenina, surgían con claridad dos clases bien diferenciadas. En la primera figuraban mujeres en su mayoría ligadas a una relación de pareja única, con una frecuencia de contactos similar a la de los hombres, aunque el máximo se reducía a cinco en el individuo más activo. El segundo grupo incluía a las prostitutas, cuya media de contactos anual se acercaría a los cuatrocientos. Aunque este grupo era de tamaño reducido (apenas una treintena de mujeres), la lección que hemos aprendido acerca de la erradicación de virus en Internet se aplica aquí con igual contundencia: el grupo altamente conectado pone en riesgo a toda la población, no importa si ésta está formada mayoritariamente por hombres y mujeres poco promiscuos. Para ser realmente efectivo, junto con las campañas de planificación familiar y educación sexual debe invertirse un esfuerzo centrado en el pequeño conjunto de hombres y mujeres que de alguna forma definen el corazón de la red. Sin este esfuerzo, la contención de la epidemia tiene pocas posibilidades de éxito.

Como vemos, las redes de contactos humanos poseen una estructura que facilita la propagación de enfermedades. Pero el principal problema futuro tiene que ver con varios ingredientes importantes de los que no hemos hablado. Por un lado, la explosión demográfica ha llevado a nuestro mundo a niveles de población nunca vistos, junto a un cambio continuo y acelerado hacia la vida en la ciudad. Desde finales de mayo de 2007, vivimos en un mundo distinto, en el que hay más personas en los centros urbanos que en el campo, lo que plantea problemas importantes de sostenibilidad a largo plazo. Por otro, el transporte comercial (sobre todo por avión) ha reducido las distancias enormemente. Por último, los virus y bacterias que pueden infectarnos no son entidades estables: evolucionan sin cesar. La combinación de estos tres ingredientes puede ser una magnífica receta para el desastre.

Espectros de 1918

Aunque el ejemplo del sida es sin lugar a dudas el más ilustrativo de los llamados virus emergentes, y aunque su propagación a gran escala es pavorosa, el mayor asesino de la historia ha sido el aparentemente inofensivo virus de la gripe. Entre 1918 y 1919, este virus mató a más de cuarenta millones de personas en todo el mundo en la peor pandemia que se recuerda. Fue un virus excepcional por diversos motivos, además de ser muy letal entre individuos jóvenes, que fueron sus víctimas más frecuentes. Aunque ninguna pandemia posterior ha resultado tan mortífera, nada garantiza que las cosas vayan a seguir así de forma indefinida. Todos los años el virus de la gripe reaparece renovado por nuevas mutaciones que obligan a sintetizar una nueva vacuna. Este virus posee un genoma fragmentado: nada menos que ocho cadenas de ARN (la molécula que transporta la información en la mayoría de virus de importancia epidemiológica) se hallan empaquetadas en su interior (figura 4.5). Las cadenas múltiples permiten recombinar el material genético de forma muy eficiente, con lo que la diversidad genética del virus aumenta. Dos elementos son de la máxima importancia para su ciclo vital y eficiencia en la infección. Se trata de dos moléculas que porta en su cubierta y que habitualmente se indican por H y N. Estas letras se refieren a dos proteínas: la hemaglutinina y la neuraminidasa. La primera es la llave que franquea la entrada a la célula. La segunda proteína participa en la segmentación del virus y es importante para hacer eficiente el proceso de infección. Como el resto de componentes del vi-

rus, sus secuencias se hallan codificadas en la información genética que se encuentra en su interior. Podemos imaginar de forma idealizada la información de las cadenas como un conjunto de cartas. Cada una de las cartas define cierta función y dos de estas cartas nos dicen qué tipo de proteínas H y N se encontrarán en la superficie. Pero si disponemos de una baraja de cartas, como las ocho que se encuentran en el interior del virus, las posibilidades son enormes. Debemos contar además con el hecho crucial que da lugar a variantes letales: la recombinación entre virus procedentes de especies distintas.

De forma general, la evolución de variantes víricas en una especie determinada hace que se dé una adaptación entre virus y huésped. Esta relación suele dar pie a la aparición de una barrera entre especies: el virus infecta fácilmente a su especie huésped, pero a su vez deja de ser capaz de infectar a otras con la misma facilidad. Sin embargo, las barreras pueden caer si se dan las circunstancias adecuadas. Esta posibilidad aparece de forma frecuente con la proximidad física entre humanos y animales, que se ve altamente favorecida por la cría intensiva en grandes granjas en las que pueden hacinarse decenas de miles de aves. Cuando el virus infecta a un animal, penetra en sus células y produce nuevos virus. Si en su diseminación se encuentra con un ser humano ya infectado por una variante vírica humana, una infección casual puede ocurrir de forma que un humano reciba partículas víricas procedentes de un ave. Ahora, dos virus de distinta procedencia infectan simultáneamente la misma célula humana y lo improbable se hace posible. En el interior de la maquinaria celular, segmentos de virus de diversa procedencia se encuentran y se empaquetan juntos.

El virus de 1918 fue tal vez singular, pero nada impide que una variante similar reaparezca en un futuro. De hecho, el comienzo del siglo XXI apareció marcado por una nueva amenaza: una variante muy agresiva del virus de la gripe H5N1 surgió en el sureste asiático y causó la muerte de la mitad de las personas que fueron infectadas y de todas las

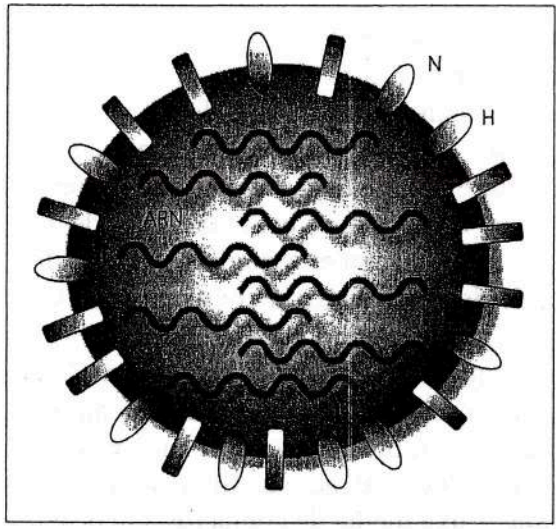


Figura 4.5. Representación esquemática del virus de la gripe, en la que la cubierta exterior muestra dos tipos de moléculas (H y N, que indican las proteínas hemaglutinina y neuraminidasa, respectivamente) y en su interior el material genético portador de la información necesaria para infectar a su huésped y reproducirse. (Dibujo de Ricard Solé.)

aves que se vieron expuestas al mismo. Esta variante consiguió de hecho saltar la barrera que separaba a su huésped habitual (las aves) y alcanzar a los humanos que estuvieron en estrecho contacto con éste. Sin embargo, la receta para la pandemia es incompleta. El virus requiere algo más: la combinación necesaria para propagarse eficientemente *entre* humanos. La contención, basada en medidas muy estrictas, ha dado resultado, pero los expertos temen que a la larga una variante letal se abra camino algún día. Los esfuerzos encaminados a limitar esta posibilidad requieren considerar muchos aspectos. Un ingrediente importante es la disponibilidad de vacunas adecuadas, que los gobiernos —en caso de amenaza de pandemia— deben almacenar en cantidad suficiente. Es preciso informar a la sociedad de las medidas de prevención y tratamiento. Pero estas medidas carecen de sentido si ignoramos la realidad del mundo conectado en el que vivi-

mos. Los virus desconocen el significado de las fronteras y las iniciativas nacionales han dado paso a las internacionales. En la misma balanza se incluyen la distribución de medicamentos y el impacto de los viajes en avión que pueden acelerar la expansión. En un estudio de este problema, el grupo de Alessandro Vespignani, en la Universidad de Indiana, ha simulado el efecto de la estructura de la red de aeropuertos a escala mundial con el objetivo de comprender los efectos de las estrategias de contención sobre virus de distinta patogenicidad. La conclusión más interesante de este estudio es que hizo patente la necesidad de cooperación entre naciones y la importancia de compartir los stocks de vacunas almacenadas. Que los países más preparados distribuyan una décima parte de estas vacunas puede frenar o desacelerar la pandemia y retardar sus efectos en un año o más. Un tiempo precioso para desarrollar vacunas y afrontar la situación en mejores condiciones.

¿Estaremos alguna vez a salvo? Como resultado del crecimiento demográfico, así como de la invasión y destrucción de ecosistemas, las poblaciones humanas modifican los balances ecológicos y dan lugar a oportunidades antes inexistentes para los llamados virus emergentes. Estos virus (entre otros, el Hantavirus, el Ébola, etcétera) infectan en condiciones normales a poblaciones de roedores o primates, pero muy raramente entraban en contacto con humanos. Ya sea por la caza llevada a cabo para suministrar carne fresca a centros urbanos en desarrollo o por la explosión de las poblaciones de roedores que se benefician de los depósitos de cereales, las posibilidades del salto hacia un huésped humano se multiplican. A lo largo del siglo XX se sucedieron los ejemplos de virus emergentes que fueron capaces de saltar la barrera. Algunos de forma ruidosa (como el Ébola) y otros silenciosamente pero en último término con una efectividad terrible (como el VIH). La invasión de los ecosistemas y su destrucción para llevar a cabo agricultura o ganadería intensivas no ha cesado pese a todas las señales de alarma. En un ecosistema, una especie con una gran población tiene más oportunidades de ser atacada por virus y parásitos, y no somos inmunes a esta regla. La evolución de nuestra especie ha corrido siempre paralela a la de nuestros patógenos. Si miramos atentamente la información contenida en nuestro código genético, encontraremos las trazas de esta historia común en forma de secuencias incompletas de virus que en algún momento del pasado se insertaron en el ADN y permanecen allí dormidas e incapaces (al menos en principio) de escapar de su prisión celular. Las epidemias vienen y se van, en ocasiones parece que para siempre, pero en realidad la carrera evolutiva nunca se detiene. En la novela *La peste,* Albert Camus lo evoca así en boca del antihéroe de la historia, el doctor Rieux: «El bacilo de la peste no muere ni desaparece jamás». Rieux sabe que el causante de la enfermedad puede quedarse «dormido en los muebles, en la ropa, esperando pacientemente en las alcobas, las bodegas, las maletas, los pañuelos y los papeles, y que llegará el día en que la peste, para desgracia y enseñanza de los hombres, despierte a sus ratas y las mande a morir a una ciudad feliz». En la obra de Camus, la peste es una metáfora de la guerra pero también una forma de reflexionar sobre la soledad y la moral humana. A pesar de las plagas, el dolor y el olvido, Camus nos hace ver que existe en el ser humano el germen de la solidaridad. Algo que le hace ser honesto a pesar de todo. Las nuevas pandemias que han de venir ocurrirán en un mundo que tiene poco que ver con el que retrata el diario de Defoe pero mucho con la advertencia de Rieux. Para bien y para mal, nuestra sociedad es a la vez un lugar donde la información llega a todos con rapidez, pero también el escenario en el que las nuevas criaturas emergentes surgirán sin que podamos hacer nada para evitarlo. Cooperar en este mundo conectado será la única forma de afrontarlas y, tal vez, de sobrevivir.

5
El agutí y el jaguar

> Hay grandeza en esta concepción de la vida, [...] mientras este planeta ha girado según la constante ley de la gravitación, se han desarrollado y se están desarrollando, a partir de un comienzo tan sencillo, infinidad de formas cada vez más bellas y maravillosas.
>
> Charles Darwin, *El origen de las especies*

> La extinción de una especie es para siempre. Esto no es *Parque Jurásico*. No podremos volver a recuperarlas.
>
> Stuart Pimm

> Si se extingue un número suficiente de especies, ¿se derrumbarán los ecosistemas, y poco después seguirá la extinción de la mayoría de las demás especies? La única respuesta que uno puede dar es: posiblemente. Sin embargo, tal vez cuando lo averigüemos sea ya demasiado tarde. Un solo planeta, un solo experimento.
>
> Edward O. Wilson, *La diversidad de la vida*

El barroco de la naturaleza

Cuando era niño fui testigo accidental de un pequeño capítulo del saqueo de la naturaleza. Mi padre era marino mercante y pasaba largos periodos de tiempo en lugares lejanos, como Guinea Ecuatorial o Sudamérica. Solía traer a casa animales que había cambiado por dinero, unas cajetillas de tabaco o unas botellas de cerveza. La filosofía del asunto era que los niños estábamos muy alejados de la naturaleza y que no debíamos tener miedo de los animales, así que lo mejor era estar en contacto estrecho con éstos. La diversidad de es-

pecies que nos visitaban era considerable: monos, loros, cotorras y diversos reptiles. La mayoría terminaban vendidos en las Ramblas de mi ciudad natal y todos dejaron alguna huella en mi memoria. De hecho, en mitad de aquel trasiego de animales, mi colección de recuerdos guarda el registro de un cocodrilo que pasó una semana en casa ocupando la bañera. Así que si bien nos ayudó a superar nuestro miedo a los cocodrilos, la situación dejaba poco margen para la higiene familiar. Pero mi favorito fue una iguana enorme que correteaba por nuestra vivienda cada vez que tenía la oportunidad de escapar de su caja de cartón. En la fotografía (figura 5.1), aparezco con mi abuelo paterno y la iguana, capturados bajo el sol en un día cualquiera de primavera, dos humanos risueños asiendo (creo que con excesivo cuidado) a uno de aquellos inquilinos que se cruzaban temporalmente en nuestro camino. Aún recuerdo una ocasión en que la iguana desapareció durante unas horas y acabé encontrándola debajo de una cama bajo la que me arrastré en la oscuridad. Fue un encuentro extraño entre un niño barcelonés aficionado a la lectura de novelas de aventura y un animal sacado de una de aquellas novelas. Por primera vez, fui vagamente consciente de lo extraño de la situación y de que nuestro huésped había sido arrancado de un mundo que nada tenía que ver con aquella Barcelona en la que los niños aún podían jugar en la calle. El Mundo Perdido al que no regresaría jamás.

La caza de especies exóticas se había iniciado mucho tiempo antes de las modestas incursiones de mi padre. Mucho antes y con un alcance devastador. A lo largo del siglo XIX el descubrimiento de África por los colonizadores europeos atrajo inevitablemente a las hordas de cazadores ansiosos por derribar un elefante o matar un león (en una acción que nunca me ha merecido especial admiración). Fue así como los grandes depredadores y herbívoros de las sabanas, junto a primates y aves raras fueron masacrados a gran escala hasta bien entrado el siglo XX para conseguir marfil, pieles, ejemplares de museo o simplemente una buena fotografía para el álbum familiar. El fotógrafo Peter Beard lo describía así en 1977: «La naturaleza de hace tan sólo cincuenta años, entonces tan completa, ha sido diezmada, árbol tras árbol, animal tras animal, sombra a sombra, roca a roca». Estas palabras ilustraban los acontecimientos que se sucedieron en África durante cien años de cacería (el llamado *«Big Game»),* una actividad que se llevó en paralelo junto con la sobreexplotación salvaje de materias primas como el caucho, las más de las veces apoyadas en la esclavitud y el pillaje.

Figura 5.1. El autor en compañía de su abuelo y de un ejemplar de iguana, que se prestó de forma involuntaria para la fotografía.

En otros lugares del mundo, sus habitantes nativos no corrían mejor suerte. Entre los ejemplos más emblemáticos de

la pérdida de una especie única estaría el dodo de Isla Mauricio. Su aspecto peculiar, parecido a una gallina gigante, lo ha convertido en un icono de la biodiversidad amenazada. Esta ave, de aspecto rechoncho e inofensivo, era incapaz de volar (resultado de una larga ocupación en una isla sin depredadores) y se convirtió rápidamente en presa favorita de los marineros que llegaban a la isla. Los dodos desaparecieron con rapidez, presa de sus cazadores y de las ratas que, llegadas en los mismos barcos, invadieron esta isla y muchas otras y dañaron su biodiversidad de manera irreversible. En apenas unas décadas, el dodo dejó de existir.

El relato de la desaparición del dodo es uno de los muchos que lamentablemente podríamos citar en una lista que crece con el paso del tiempo. Existen en la actualidad un gran número de especies que se hallan en el filo de la extinción, además de algunas «especies fantasma» que aunque todavía poseen individuos supervivientes, se encuentran en tales condiciones críticas que su existencia está condenada. El destino de estas especies nos conmueve: en algún momento, sus poblaciones terminaron reduciéndose a un solo individuo. Un solitario representante de un patrimonio evolutivo único e irrepetible de un grupo de organismos que tal vez habitaron sus ecosistemas durante millones de años, mucho antes de que el ser humano aprendiera a dominar el fuego. Cuando pensamos en la extinción acuden a nuestra mente los gorilas de montaña, el lince ibérico, la ballena azul o el guepardo. Especies emblemáticas que desearíamos no perder. Bajo el paraguas de este pensamiento —sin duda positivo— surge una visión de la conservación orientada a preservar especies concretas a toda costa. Incluso en el caso de que su pérdida sea inevitable, se acude en ocasiones a la conservación de células criogenizadas que, tal vez, servirán un día para clonar nuevos individuos. ¿Es éste el enfoque correcto? ¿Podemos esperar recuperar un ecosistema perdido simplemente devolviendo a un pedazo de hábitat unos cuantos ejemplares de las especies previamente desaparecidas? Salvo raras excepciones la extinción de una

especie conlleva fenómenos de reorganización en los ecosistemas que pueden impedir la reintroducción de la especie ausente. El ejemplo de las pesquerías sobreexplotadas es contundente: cuando la sobrepesca empuja a una especie por debajo de cierto valor umbral (aunque no la elimine por completo), se desencadenan cambios en la estructura de interacciones entre el resto de especies que normalmente terminan con una nueva especie ocupando el lugar de la especie desaparecida. Pero aún más importante en la discusión que sigue es el hecho de que las especies no son entidades aisladas. Participan en el ecosistema como piezas de un gran juego en el que todas las especies obedecen a ciertas reglas de organización.

Este juego es el juego de la ecología, algo así como un ajedrez en el que de vez en cuando se echan los dados para decidir qué ocurrirá. Cada jugada implica una pieza en movimiento, pero el movimiento no es arbitrario y se da sobre un tablero con muchas otras piezas. Al mirar globalmente, vemos que carece de sentido entender la partida aislando las piezas entre sí. En el juego de la ecología, quién se come a quién puede resultar más importante que la propia naturaleza de las piezas en juego.

La hormiga que sostiene el ecosistema

La isla de Barro Colorado emerge en mitad del canal de Panamá como un castillo verde, con árboles gigantes de hasta sesenta metros de altura que parecen surgir del agua. Cuando te acercas al embarcadero, el dosel vegetal se hace cada vez más imponente y los gritos de los monos aulladores te recuerdan que ya no estás en la civilización. Tuve el privilegio de visitar la isla hace años (en compañía de mi colega Susanna Manrubia), guiada por el ecólogo Egbert Leigh, con quien ascendimos al cielo por una de las torres metálicas cerca de la estación biológica del Centro de Estudios Tropicales de la Institución Smithsoniana. Allí en lo alto se apreciaba la in-

mensidad y belleza del bosque en todo su esplendor. Al caminar por la selva, se podía uno topar con ejércitos de hormigas cortadoras de hojas en hileras interminables u hormigas soldado que, en marabuntas de cientos de miles de individuos, barrían incesantemente el suelo en busca de alimento. En lo alto, se podían ver los movimientos y gritos de los monos aulladores y por todas partes insectos, arañas, reptiles, pájaros y anfibios lo invadían todo. Sólo de forma puntual, con las lluvias de la tarde, el estruendo del agua se imponía sobre la cacofonía de sonidos que emanaban de la vida. Entre sus inquilinos más visibles, el agutí (figura 5.2) resultaba omnipresente: un roedor de unos sesenta centímetros de longitud y unos diez kilos de peso que caminaba tranquilo de un lado a otro pero que se mostraba huidizo frente a los que nos cruzábamos en su camino, al igual que el coatí (emparentados con los mapaches) y la paca (otro roedor de gran tamaño). Después de mucho caminar, la pregunta inevitable para el explorador neófito era obvia: ¿dónde estaban los depredadores? Por mucho que uno lo intentara, era imposible captar la imagen de un jaguar, el depredador número uno de los agutíes en las selvas de América central. Pero en Barro Colorado los jaguares desaparecieron no mucho después de la construcción del canal de Panamá y por un motivo simple: un gran depredador requiere áreas amplias en las que cazar y que garanticen la presencia de un número adecuado de presas. La formación de la isla representó en realidad la creación de una parcela aislada de selva tropical en la que ni jaguares ni pumas podrían sobrevivir. Cuando éstos desaparecieron, la presión sobre sus presas inmediatas desapareció a su vez, y las poblaciones de sus presas se multiplicaron por diez en poco tiempo.

Tal y como señala el ecólogo Edward O. Wilson, el impacto de esta explosión se propaga en todas direcciones a través de la cadena trófica: los agutíes y otras especies consumen sobre todo grandes semillas procedentes de los árboles, en especial las acacias. Las semillas son consumidas en mucha mayor

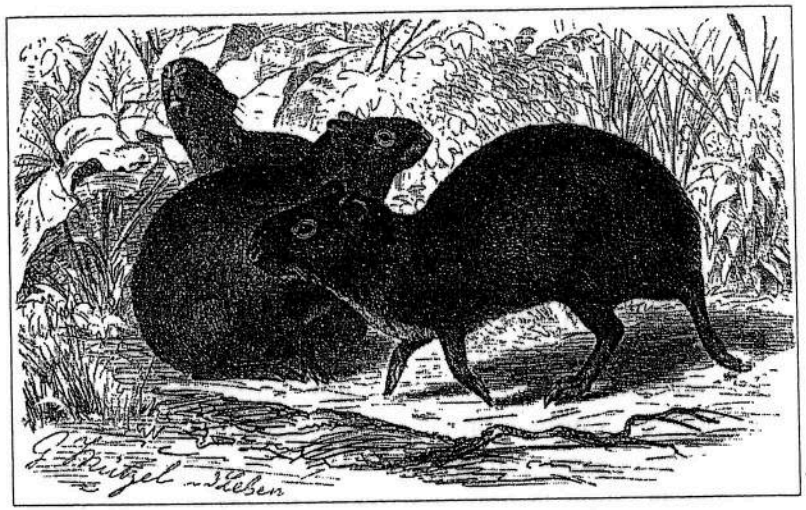


Figura 5.2. El agutí es uno de los representantes más prominentes de los herbívoros en ecosistemas tropicales. En la isla de Barro Colorado, la ausencia de los grandes depredadores debida a la pérdida de hábitat dio lugar a una explosión demográfica. El número de individuos creció hasta multiplicarse por diez.

cantidad, con lo que las posibilidades de reproducción de los árboles que las producen se reducen enormemente y se desencadena así un mecanismo de supresión de ciertas especies en beneficio de otras. Aquellos árboles y plantas que produzcan semillas más pequeñas se verán súbitamente favorecidos por el declinar de los primeros, iniciando así una secuencia lenta pero persistente de recambio en la estructura del bosque. Las especies consumidoras de estas semillas crecerán, y lo mismo sucederá con sus depredadores. Y si miramos con atención, veremos con el tiempo cómo otras especies menos visibles pero no menos importantes son también reemplazadas: los hongos y las bacterias que colonizaban las semillas ahora en declive tal vez se extingan también mientras otros tomarán el relevo aprovechando la ventaja de los nuevos ganadores. Así, la perturbación inicial crea una onda que se propaga por el ecosistema y sus vibraciones poseen un alcance que puede resultar inesperado y se mantiene durante décadas.

El ejemplo anterior es sólo una nota en la fuga ecológica, y nos sugiere algo importante: los cambios desencadenados por la pérdida de una especie relevante pueden ser de gran calado. En ocasiones, el resultado final es totalmente inesperado, como nos lo muestra la historia de la introducción del virus de la mixomatosis. Este virus fue introducido como elemento de control para reducir las poblaciones de conejos en Australia, que a su vez fueron llevados al continente entre los siglos XIX y XX. El virus tuvo efectos devastadores, y redujo una población estimada de 600 millones de animales a menos de cien millones en sólo dos años. En Inglaterra, la caída en picado de la población de conejos tuvo una consecuencia inesperada: la extinción en 1979 de una especie de mariposa conocida como la gran mariposa azul *(Maculinea arion)*. Puesto que todo el mundo sabe (excepto tal vez George W. Bush) que las mariposas no comen conejos, esta afirmación parece difícil de sostenerse. ¿Qué ocurrió?

Para comprender su origen debemos mirar las cadenas de relaciones que conectan distintas especies, cuya naturaleza y complejidad era muy distinta (figura 5.3). Desentrañar esta red supuso un trabajo de campo intenso, pero revelador. Tal y como demostró el ecólogo Jeremy Thomas, del Centro de Ecología de Dorset, lo que ocurrió fue lo siguiente. Los conejos se alimentaban fundamentalmente de un tipo de planta herbácea que bajo la presión de los primeros se encontraba en desventaja al competir con otra especie de hierba, de poco interés para los conejos y libre por lo tanto de su presión. De esta forma, las praderas de hierba baja dominaban un paisaje verde en el que debemos situar al siguiente elemento de la cadena. Éste es una especie de hormiga roja que construía sus nidos entre las hierbas bajas que permitían el paso de la luz del sol y así zonas de temperatura adecuada en el que las hormigas podían vivir. Esta especie de hormiga se relacionaba con las larvas de la mariposa de forma mutualista: las hormigas cuidan de las larvas de mariposa mientras que las orugas proporcionan a las hormigas sustancias en forma de ali-

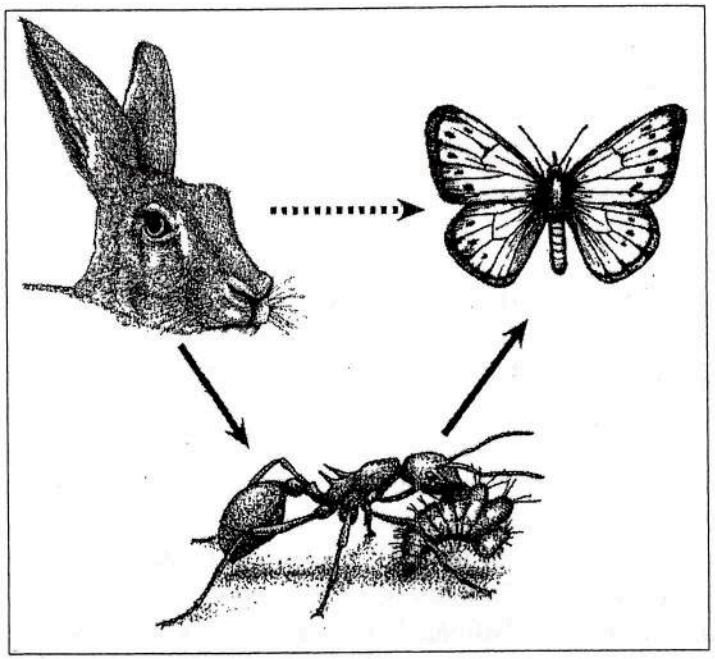


Figura 5.3. Tres de los protagonistas de la extraña extinción causada por el declive de las poblaciones de conejos en Inglaterra: conejos, hormigas rojas y la gran mariposa azul. A través de su interacción con cierta especie de hormiga que habitaba los pastos en los que medraban los conejos, una cadena de acontecimientos indirectos terminó eliminando del escenario a la mariposa. (Dibujos de Ricard Solé.)

mento líquido, a la vez que consumen huevos de hormiga. Esta relación es tolerada debido al intercambio mutualista y al hecho de que la larva adopta el olor de las hormigas rojas e imita sus sonidos. La última parte de la metamorfosis tenía lugar en el interior del nido de las hormigas, del que las mariposas adultas salían para reproducirse. Al introducir el virus, la pérdida de la presión sobre el primer tipo de vegetación le permitió competir eficientemente con la vegetación dominante, de mayor talla, y finalmente reemplazarla. El paisaje se transformó de forma profunda en muchas zonas de Inglaterra y un observador atento hubiera visto que las hormigas, en aquellas condiciones, dejaban de construir sus nidos, esen-

cialmente debido a la ausencia de condiciones de temperatura adecuadas. Nadie se ocupaba de las orugas y la mariposa terminó desapareciendo.

Aunque se reintrodujo en 1983, conseguir una población estable de esta mariposa ha resultado costoso y requiere un esfuerzo de modificación del hábitat que permita la vuelta de vegetación baja, lo cual se consigue con el pastoreo. Un mensaje importante surge de este ejemplo (y de muchos otros): perder un eslabón en la estructura del ecosistema puede desencadenar respuestas complejas y permanentes, y como ocurre con otros sistemas complejos, la naturaleza y consecuencias del cambio pueden ser impredecibles. Estas cadenas de cambios que conectan dos especies aparentemente no relacionadas a través de unos pocos pasos intermedios hacen de los ecosistemas redes complejas. Redes que han cambiado a lo largo de millones de años, que poseen leyes de organización universales y que debemos comprender para preservar.

La arquitectura de la complejidad ecológica

Los ejemplos anteriores nos hablan de algunas notas particulares de la música de los ecosistemas. Nos muestran lo frágil que es la biodiversidad y los peligros que la amenazan. La trama de las interacciones ecológicas puede proporcionar estabilidad a un sistema pero también ser responsable de su fragilidad. Volvemos así a las redes: ¿cuál es la arquitectura de las redes ecológicas? No es preciso decir que determinar con detalle la totalidad de las interacciones entre las especies de un ecosistema es una tarea de enorme dificultad. Exige un trabajo de campo que requiere una gran inversión de tiempo y este trabajo tiene sus límites. Sin embargo, décadas de estudio han permitido delinear un mapa de las interacciones entre especies. En algunos casos, como lagos o ríos, la cartografía resultante es completa y detallada. En otros casos, como el de la selva tropical, los cartógrafos se encuentran

con múltiples dificultades. Una de ellas es que los ecosistemas tropicales suelen mostrar una estructura que nos recuerda una colección de muñecas rusas: un ecosistema contiene en su interior ecosistemas que a su vez contienen otros ecosistemas.

Una ilustración de esta jerarquía de ecosistemas nos lo proporciona el estudio del interior de una planta carnívora del género *Nephentes*. Estas plantas (como la mostrada en la figura 5.4) son muy abundantes y poseen una estrategia de caza simple pero efectiva: los insectos que entran en su interior resbalan hasta el agua almacenada y mueren. Su materia orgánica es la base de una verdadera pirámide ecológica. Un ejemplo de esta pirámide se muestra en la misma figura, a la derecha. Empleando como fuente de materia los insectos que se han ahogado, así como microorganismos y materia suspendida, toda una fauna de especies se sostiene definiendo tres niveles tróficos. Esta red es coronada en su vértice por una especie de hormiga que se alimenta de varios niveles. Estas hormigas son así el depredador de alta cadena, que posee muchas conexiones: un generalista que obtiene sus recursos de múltiples especies inferiores. Este ejemplo es sólo uno de tantos. El naturalista Edward O. Wilson cita una especie de escarabajo que vive en los troncos de árboles y que carga líquenes a sus espaldas (probablemente como camuflaje). En estos líquenes vive a su vez todo un pequeño ecosistema. Del mismo modo, muchas aves tienen en sus plumas toda una fauna específica de parásitos que a su vez sostienen toda una biodiversidad de especies que aprovechan este hábitat minúsculo. Esta repetición que nos recuerda a un conjunto de muñecas rusas se debe a la naturaleza fractal de la complejidad ecológica, que presenta estructuras dentro de estructuras, y que genera una jerarquía de sistemas encajados. Citando a Wilson, «en un mundo fractal, todo un ecosistema puede vivir en el plumaje de un pájaro».

En la actualidad existen diversos casos de redes ecológicas de gran diversidad que han sido completamente cartogra-

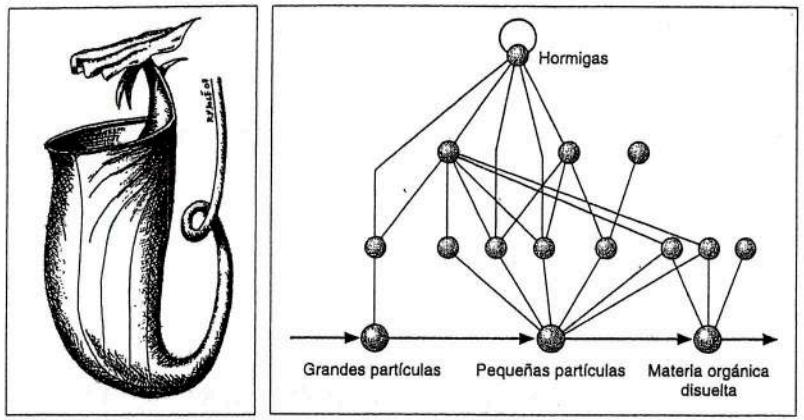


Figura 5.4. La complejidad ecológica se da en muchas escalas. En el interior de una planta carnívora del género *Nephentes* (izquierda) podemos encontrar todo un ecosistema. A la derecha se muestra un esquema de este ecosistema, que presenta distintos niveles tróficos y que puede incluir docenas de especies y larvas de distintos invertebrados, sus adultos u hormigas. La línea inferior indica el flujo de materia orgánica y su transformación desde insectos muertos a partículas de pequeño tamaño. (Dibujo y gráfico de Ricard Solé.)

fiadas. Tenemos, por ejemplo, la red de Silwood Park, en el sur de Inglaterra, formada por casi doscientas especies de insectos. O la red del estuario de Ythan, en Escocia, también muy conocida y bien caracterizada. En estas redes aparecen algunas especies que poseen un gran número de conexiones, lo que las convierte en especies generalistas, capaces de explotar múltiples recursos. Por otra parte, la mayoría de especies poseen un número pequeño de conexiones, lo que indica que la especialización es la regla. Su estructura es por lo tanto heterogénea, aunque no tanto como las de otras redes que hemos visto anteriormente. ¿Son estas redes frágiles? Esta cuestión no era nueva: algunos ecólogos como mi colega Stuart Pimm habían estudiado el problema empleando modelos de simulación. Pimm ya vio que la posición de las especies en la red y su grado de especialización podrían dar lugar a distintas respuestas frente a perturbaciones. Pero hasta que no se dispuso de las redes completas, resultaba difícil estar seguro

de hasta qué punto podían estas perturbaciones dañar un ecosistema. Hace unos años decidimos explorar este tema en el Laboratorio de Sistemas Complejos de Barcelona. Junto con el ecólogo José Montoya, obtuvimos un conjunto de redes que incluían un gran número de especies, procedentes de diversos lugares del mundo y de diversa naturaleza. El primer paso en nuestro estudio era analizar los datos disponibles y su calidad. Algunas redes tuvieron que ser reconstruidas a partir de publicaciones en las que los científicos que las estudiaron habían definido largas tablas de relaciones. De ellas extrajimos meticulosamente, a lo largo de semanas, las redes de interacciones para procesarlas en nuestros ordenadores. Finalmente tuvimos en nuestras manos un conjunto de redes ecológicas con las que podíamos por primera vez explorar la cartografía de la complejidad ecológica desde una perspectiva global. Durante una semana intensa trabajamos hasta altas horas de la madrugada y sólo interrumpíamos nuestro trabajo para ir a la última sesión de cine, de forma que la mayor parte de las veces cenábamos palomitas, para regresar de noche al laboratorio a seguir con nuestra exploración. Poco a poco, los datos dieron paso a los primeros mapas y éstos terminaron por revelar sus secretos.

En primer lugar, descubrimos que las redes ecológicas de las que disponíamos presentaban el efecto mundo pequeño y lo hacían de forma espectacular: en promedio, dos especies estaban separadas por sólo dos saltos en la red (¡dos grados de separación!), lo que representaba una proximidad muy grande, indicando que los ecosistemas se hallan muy bien comunicados y que cualquier perturbación debería propagarse con facilidad a través de los mismos. La segunda fue aún más interesante. Analizamos los efectos de la pérdida de diversidad, simulada mediante la eliminación de especies de la red. Debemos tener en cuenta que la eliminación de una especie dada puede tener efectos secundarios: si una especie depende de la que ha desaparecido y no posee alternativas, esta segunda especie también desaparecerá. Así, por ejemplo, la desaparición

de una presa determinada que posee uno o más depredadores especializados sólo en esta presa (su única dieta) conlleva la pérdida de sus depredadores asociados: tienen lugar *extinciones secundarias* o *coextinciones* (figura 5.5). El primer paso era analizar qué ocurría si eliminábamos una especie al azar. Sería algo así como asignar un número a cada especie, hacer girar la ruleta y sacar del sistema a la especie perdedora.

Al simular la pérdida fortuita de especies, pudimos comprobar que las redes estudiadas eran notablemente estables. En la mayoría de casos, la especie perdedora solía ser algún especialista del que no dependían otras especies. Asimismo, muchas de estas eliminaciones de ruleta se llevaban a alguna especie de la que dependían otras, pero éstas a su vez poseían alguna fuente alternativa de alimento y podían por tanto sobrevivir. De algún modo, la estructura de la red hace difícil que se produzcan extinciones secundarias, lo que denota una considerable estabilidad estructural. Debemos tener presente que esta situación puede darse a menudo en los ecosistemas: muchas especies son de hecho raras y a lo largo del tiempo podemos comprobar que algunas aparecen en un área deter-

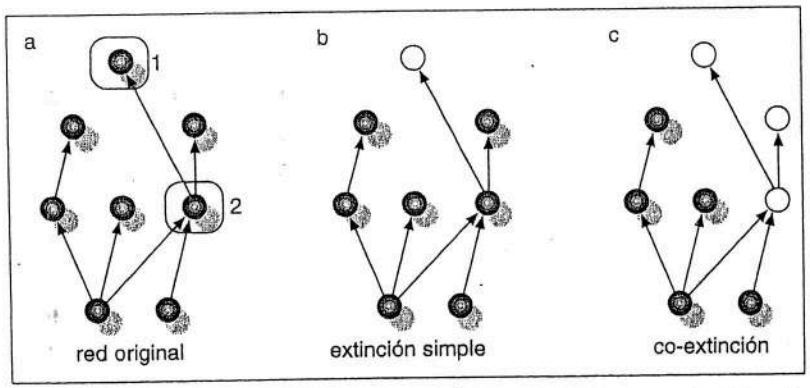


Figura 5.5. Extinción y coextinción en redes ecológicas. Una red trófica (a) puede perder una especie especialista (como la indicada por 1) sin más consecuencias (b) o bien puede perder una especie (2) de la que dependen otras para sobrevivir. En este caso estas especies también desaparecen (c), con lo que tiene lugar una coextinción. (Dibujos de Ricard Solé.)

minada para luego desaparecer. Esta renovación constante es también parte del ritmo de la vida.

Lo más revelador apareció, sin embargo, cuando introdujimos la eliminación selectiva (figura 5.6). En este caso, abandonábamos nuestra ruleta imaginaria y elegíamos los elementos clave del sistema de forma específica. Nuestro papel aquí era el de un factor externo que, directa o indirectamente, determinaría la extinción de una especie concreta. En nuestros ordenadores simulábamos la caza intensiva de un gran depredador o la destrucción del hábitat de un gran herbívoro. Descubrimos que, cuando eliminábamos una tras otra de las especies más conectadas, se producía un colapso muy rápido de la diversidad: una extinción daba lugar a la pérdida de otras especies que a su vez arrastraban en su caída a otras. Estas especies representan las piedras angulares de la arquitectura ecológica y pudimos comprobar que su pérdida desencadenaba múltiples cascadas de extinción. Un ejemplo de nuestros resultados se muestra en la figura 5.7, donde vemos la enorme diferencia en el impacto generado por los dos mecanismos de eliminación de especies. Si medimos el impacto de la eliminación en términos de las especies que desaparecen, vemos que la eliminación por ruleta es un proceso lento y gradual (círculos blancos), mientras que la eliminación selectiva rápidamente genera una extinción masiva. Así pues, nuestro análisis sugería una nueva situación previamente no considerada en estudios anteriores acerca de la fragilidad ecológica: al tener en cuenta no sólo las especies de un ecosistema sino también sus interacciones, descubrimos que la forma en la que se pierde biodiversidad podría ser muy rápida. La lección de este estudio es muy clara: no podemos seguir contemplando los ecosistemas como sacos de especies más o menos independientes.

Si contemplamos los ecosistemas como especies en interacción, los efectos de la pérdida de especies por la acción humana se multiplican con rapidez. Al otro lado del Atlántico, un grupo de investigadores de California, liderado por los

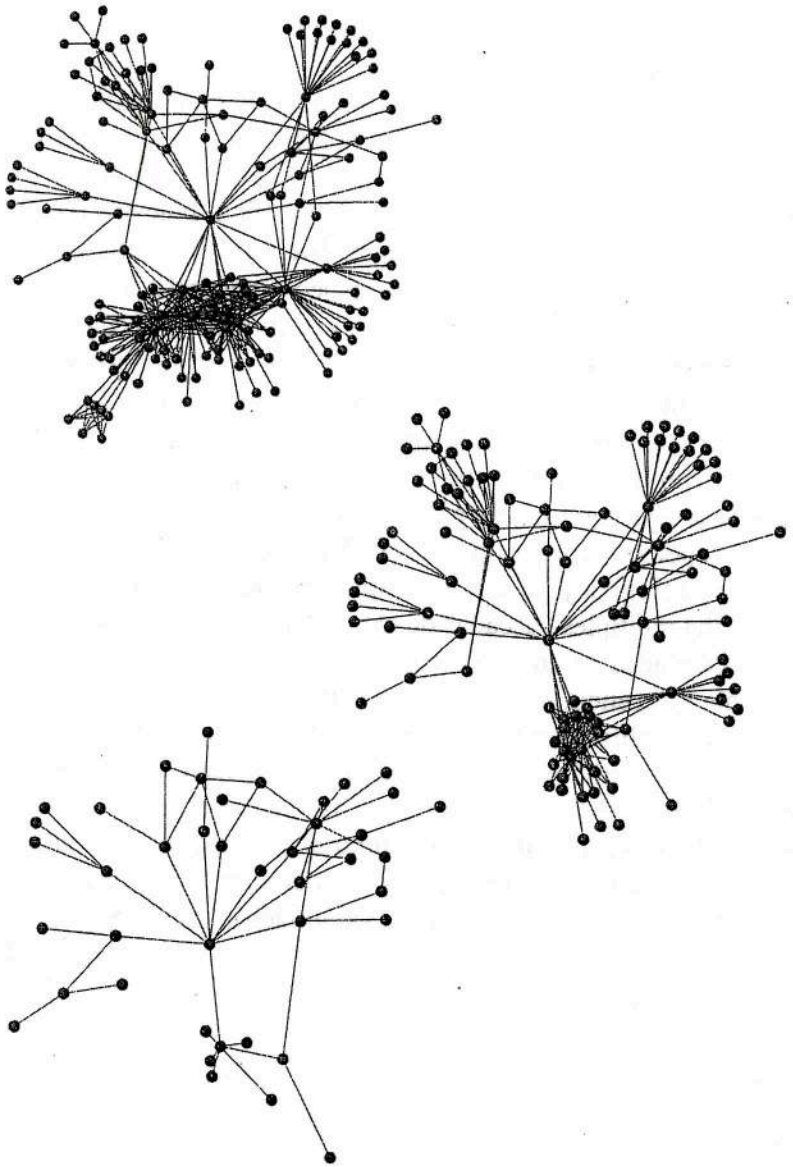


Figura 5.6: Un ejemplo de colapso de una red ecológica compleja (Silwood Park, arriba), en la que las especies se indican mediante círculos y sus interacciones mediante flechas. Las conexiones entre círculos indican relaciones de presa a depredador. En la red intermedia se han eliminado cuatro especies y en la inferior se han eliminado catorce especies. (Dibujos de Ricard Solé.)

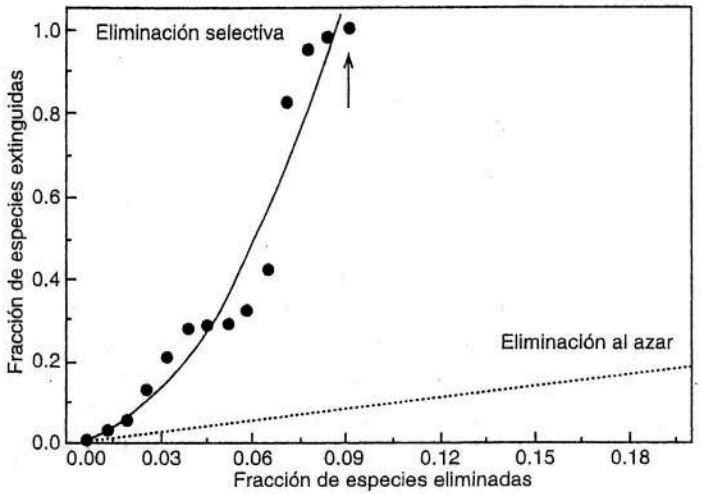


Figura 5.7: Fragilidad ecológica y extinción: aquí representamos el efecto de la eliminación de especies sobre la red de Silwood Park. El eje horizontal corresponde a la fracción de especies que se extraen de la red, normalizado entre cero y uno. El eje vertical nos dice cuántas especies en total han desaparecido, ya sea porque son extraídas o porque se extinguen al no disponer de presas. Cuando se eliminan especies al azar, como indica la línea discontinua, la pérdida de especies por coextinción apenas se hace notar. En cambio, al elegir las especies más conectadas las cascadas de extinción son muy importantes y el sistema se colapsa con mucha rapidez. Apenas se ha eliminado un seis por ciento de las especies clave y la mitad de las especies se han extinguido. (Gráfico de Ricard Solé.)

ecólogos Jennifer Dunne y Neo Martínez llegaba a conclusiones similares a las de nuestro trabajo. En paralelo con estos estudios, el ecólogo Jordi Bascompte lideraba en Sevilla, junto con sus colaboradores Pedro Jordano y Jens Olesen, el primer análisis de otro tipo de redes ecológicas no menos importantes: las redes mutualistas. En estas redes, las interacciones son de distinta naturaleza ya que, en lugar de definir quién come a quién, relacionan especies de plantas y animales a través de procesos de polinización y de dispersión de semillas. Estas redes también son heterogéneas y presentan patrones similares de pérdida de diversidad y colapso al experimentar la eliminación de sus elementos más conectados.

El grupo de Bascompte fue pionero en este campo, dado que hasta entonces las redes mutualistas nunca se habían explorado bajo esta perspectiva global. Estos investigadores han estudiado además la relación existente entre las redes mutualistas y su evolución, y han descubierto que la extinción de una especie arrastrará en su camino a otras que se hallan emparentadas evolutivamente, con lo que al quitarlas de la red, también arrancamos ramas enteras del árbol filogenético al que pertenecían, lo que representaría la pérdida irreversible de páginas completas de su historia evolutiva.

Una implicación inmediata de estos estudios era que la arquitectura de los ecosistemas puede experimentar daños irreversibles con la destrucción de sus especies clave. La pregunta más importante sin embargo es si las especies más afectadas por la presión de las actividades humanas se corresponden con las más conectadas. ¿Son estas especies las que hemos mencionado antes? La respuesta es en lo esencial afirmativa: las especies que de una forma u otra ejercen un control sobre la dinámica global y cuya ausencia daría lugar a cascadas de cambios están especialmente afectadas por los factores de presión humana responsables de la sexta extinción: la pérdida y fragmentación del hábitat natural y la caza indiscriminada de grandes mamíferos. La destrucción de hábitat comporta no sólo la reducción de la superficie total de recursos disponibles para un gran depredador o un gran herbívoro como el elefante, sino también la reducción de las posibilidades de reproducción debido a la fragmentación del espacio en parcelas aisladas entre sí. Del mismo modo, la caza y supresión de poblaciones de depredadores u herbívoros de gran tamaño rompe la estabilidad del sistema y puede transformarlo por completo. Una ilustración excelente de este hecho nos la dan los estudios acerca del efecto de la caza de elefantes africanos sobre la estructura de la sabana. Dado que los elefantes ejercen una presión enorme sobre árboles y arbustos, hacen que éstos no prosperen como podrían y por el contrario crean condiciones especiales de cambio constante (árboles desarraigados que dejan espacio nuevo para arbustos y hierbas) en las que pueden prosperar diversos tipos de vegetación en la que a su vez medran herbívoros de menor tamaño. Cuando los elefantes desaparecen, el flujo del cambio se interrumpe y es reemplazado por un sistema en el que el bosque de acacias surge como estructura dominante. La sabana abierta da paso así a una nueva forma de organización, el bosque seco, en el que muchos de sus protagonistas no serán viables o experimentarán cambios poblacionales de gran calado.

Así pues, elefantes y jaguares son claves para preservar los ecosistemas en los que habitan con toda su diversidad y riqueza natural. Una vez más, al concretar nuestros ejemplos en estas especies parece que la estrategia adecuada es, en último término, conservar las especies clave. Si éstas corresponden a grandes animales, no parece que la tarea sea difícil. Pero ser una especie relevante no necesariamente pasa por un tamaño corporal grande. Las hormigas soldado que barren las selvas de medio mundo nos dan la contrapartida en la pequeña escala. Estas especies presentan un comportamiento característico en el que pasan por fases nómadas durante las cuales se desplazan a diario por el suelo de la selva, barriendo como una sábana viviente todo lo que hallan a su paso y agrupándose en el crepúsculo para formar una bola hirviente de individuos. Al barrer la selva cazando y recolectando de forma coordinada, llevan a cabo un proceso de limpieza que no sólo les reporta alimento, sino que crea cambios en el suelo del bosque que favorecen a otras especies, a la vez que son aprovechados por un buen número de especies de aves que medran en los límites de las marabuntas, capturando los insectos que escapan de la marea de hormigas. La importancia de las hormigas y otros insectos sociales no debe menospreciarse en absoluto. De hecho, si medimos su biomasa en una selva, nos encontraremos con que alcanzan aproximadamente cuatro veces la biomasa total del resto de animales.

La pérdida de diversidad asociada a la extinción de una especie clave es a menudo difícil de estimar si tenemos en

cuenta un aspecto que hemos mencionado anteriormente: la fractalidad de los ecosistemas. En una selva tropical esta fractalidad es muy evidente y explica una parte importante de la riqueza de especies. Dado que el suelo de los ecosistemas tropicales es muy pobre, la evolución de estos sistemas ha dado lugar a soluciones que en una forma u otra intentan aprovechar al máximo el flujo de agua y nutrientes en su camino desde lo alto de la bóveda forestal al suelo. De esta forma se logra que la biomasa pueda crecer en múltiples niveles intermedios, dejando poco para su degradación en el suelo. Tenemos así multitud de fenómenos que ocurren a distintas escalas, formando, en palabras del ecólogo Evelyn Hutchinson, el teatro ecológico en el que tiene lugar la obra de la evolución. El teatro es amplio y vasto, y una mirada global —como veremos— resulta ser de lo más interesante.

Gaia

Nuestro planeta cambia, y lo hace a menudo de formas inesperadas. Durante su larga vida, ha experimentado épocas de frío y de calor. Durante su infancia, hace más de cuatro mil millones de años, sufrió el impacto de multitud de meteoritos. Si miramos nuestro satélite, la Luna, donde la ausencia de atmósfera preservó las marcas de estas colisiones, podemos hacernos una idea de su intensidad. Distintas evidencias geológicas y paleontológicas indican que más tarde la Tierra llegó a congelarse casi por completo, de forma que desde el espacio la habríamos visto como una gran bola de nieve (probablemente parecida a Encelado, una de las lunas de Saturno). Al salir de este estado, hace unos 550 millones de años, la vida floreció en una explosión única de creatividad, de la que surgieron todos los diseños corporales esenciales del reino animal (aunque quedaba mucho por hacer). La inventiva de la naturaleza no dejó de generar criaturas que colonizaron hasta el último rincón de la Tierra. Algunos grupos, como los

dinosaurios, dominaron los ecosistemas terrestres y marinos a lo largo de millones de años. Ocasionalmente, algo interrumpía el flujo de la evolución y una gran extinción terminaba con muchas formas de vida y una nueva etapa de cambio se ponía en marcha. El episodio más violento en esta historia interrumpida de nuestro planeta viviente fue la gran extinción que marcó el fin del periodo Pérmico, hace 250 millones de años. Alrededor del noventa por ciento de las especies desaparecieron en lo que el paleontólogo Douglas Erwin llamó «la madre de todas las extinciones».

Pese a todas las vicisitudes con las que se ha enfrentado, la vida ha sido capaz de persistir. Es un ingrediente esencial en la dinámica de nuestro mundo, y lo es de una forma profunda. El primer científico que intuyó esta relevancia de la biología en nuestra comprensión de la dinámica planetaria fue el químico inglés James Lovelock, quien llegó a esta idea reflexionando acerca de la vida en otros mundos. Lovelock recibió el encargo de la NASA de definir algún protocolo que permitiera decidir, inspeccionando la atmósfera de un planeta, si éste albergaba vida o no. El problema parece de enorme dificultad pero Lovelock reflexionó a fondo acerca de esta posibilidad y descubrió que de hecho existía un criterio de vida planetaria que podría reflejarse en la composición de su atmósfera. La química atmosférica se halla influida por diversos factores, pero en particular se puede calcular cuál sería su composición si las reglas de la química pura fueran las únicas en juego. La química nos enseña que, si no hay otros factores, las reacciones entre moléculas tienen lugar hasta que se alcanza cierto estado de equilibrio. En este estado final podemos medir las cantidades de oxígeno, dióxido de carbono (CO_2), metano, nitrógeno e hidrógeno, por ejemplo. ¿Cuál sería la predicción de estas abundancias para nuestro planeta y para sus dos vecinos más cercanos, Marte y Venus? Lo que Lovelock encontró es revelador: las atmósferas de Marte y Venus se corresponden bien con lo que la química del equilibrio predice. En estos planetas el oxígeno se halla

prácticamente ausente, mientras que el CO_2 aparece en grandes cantidades. Del mismo modo, gases como el metano o el hidrógeno son apenas detectables, mientras que el nitrógeno parece presente en baja concentración. Estas observaciones apoyan decididamente la hipótesis de que ambos planetas se hallan en equilibrio químico. Sin embargo, al mirar la composición de nuestra atmósfera, lo que vemos es muy distinto, muy alejado de hecho de lo que esperaríamos si la química fuera la única responsable de su dinámica. El oxígeno abunda, con un 21 %, acercándose al límite más allá del cual la Tierra virtualmente ardería (este límite está en el 25 %). El dióxido de carbono por el contrario aparece en una concentración muy inferior y el nitrógeno en mucha mayor abundancia. Finalmente, metano e hidrógeno están presentes en pequeñas pero importantes cantidades. Todas estas especies químicas difieren por lo tanto de lo que esperaríamos de un sistema inerte. La Tierra es, en un sentido muy evidente, un sistema alejado del equilibrio. ¿Cuál es el origen de esta diferencia entre planetas? Aunque Marte y Venus fueron, en cierto momento de su historia geológica, mundos de clima suave y poseyeron océanos de agua dulce, el primero evolucionó hacia un mundo helado y el segundo hacia un infierno con lluvias de ácido sulfúrico. La Tierra, por el contrario, adquirió una propiedad que marcó toda una diferencia: en sus océanos se desarrolló una forma de materia capaz de evolucionar y reproducirse. La vida entró pronto en escena, posiblemente poco después de que nuestro planeta se enfriara lo suficiente, y cambió la faz del planeta. De hecho, hablamos de biosfera para referirnos a la vida a escala planetaria y un efecto inmediato de la presencia de lo vivo es la huella que ha dejado en la atmósfera.

Desde el espacio, nuestro planeta azul es un mundo en el que una nave espacial detectaría la presencia de una anomalía química de enormes proporciones. Esta diferencia enorme es la firma de la vida, que desaparece al desviar la mirada hacia nuestros vecinos en el sistema solar. Tanto en Marte como

en Venus, la huella molecular nos habla de un sistema en equilibrio, posiblemente porque la vida, si existió alguna vez sobre su superficie, hace tiempo que desapareció. Marte es tal vez nuestra única posibilidad de encontrar los restos de alguna forma de vida en el sistema solar, en la esperanza de que frente a la hostilidad de un clima helado y una atmósfera en retroceso, sus habitantes se hayan desplazado a las profundidades del suelo marciano, tal vez evolucionando en direcciones nuevas.

En nuestro mundo, las condiciones básicas que han permitido preservar la vida y su evolución se han mantenido estables a lo largo de millones de años. Y ello a pesar de que la aportación de energía desde el Sol ha cambiado a medida que nuestra estrella ha consumido su combustible nuclear. Lovelock ha formulado una hipótesis en la que la vida sería la responsable de mantener esta estabilidad constante. Vista a una escala planetaria, la interacción entre atmósfera y biosfera (figura 5.8) daría lugar a una homeostasis global que aseguraría la presencia de vida. Para bien o para mal, Lovelock llamó Gaia a este concepto de un planeta vivo. El planeta como sistema biológico, con un «metabolismo» bien definido, es una idea controvertida pero atractiva y posiblemente testable. De hecho, podemos mirar a Gaia desde la visión de las redes y comprobar si la red global que describe su atmósfera es la que esperaríamos de un sistema vivo.

En colaboración con mi colega, la astrofísica Andreea Munteanu, abordamos este problema con el objetivo de analizar la estructura de las reacciones químicas a nivel global tanto en nuestro planeta como en otros planetas de nuestro sistema poseedores de atmósfera. Si nuestro planeta posee una atmósfera fuertemente influida por la presencia de la vida, tal vez esta presencia haya dejado una traza que podamos detectar y medir. Nuestra aproximación se basó en el estudio de las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera de Marte, Venus, Titán (un satélite de Saturno) o los planetas gigantes, compuestos esencialmente de gases. Una reacción

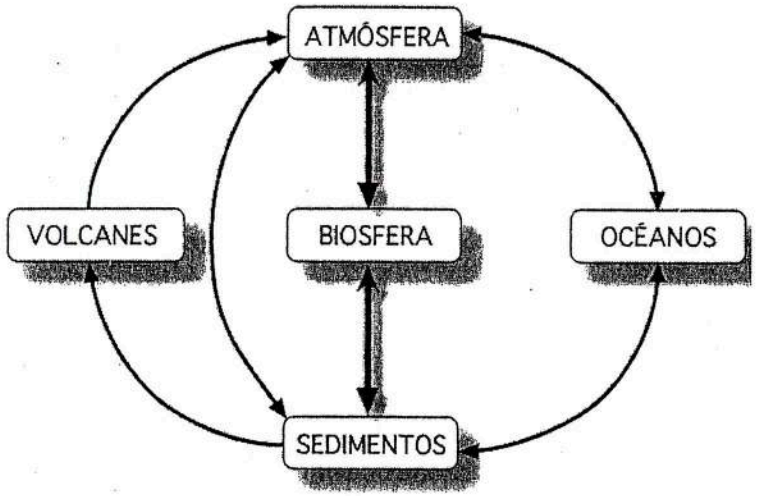


Figura 5.8. La red de interacciones básica existente entre biosfera, atmósfera y océanos, así como volcanes y sedimentos. (Gráfico de Ricard Solé.)

química estándar puede describirse mediante una expresión simple, del tipo:

$$H + HCl \rightarrow H_2 + Cl$$

en la que hidrógeno atómico (H) reacciona con ácido clorhídrico (HCl) para dar como resultado hidrógeno molecular (H_2) y cloro (Cl). Otras reacciones podrían ser por ejemplo:

$$HCl + O \rightarrow Cl + OH$$
$$HCl + OH \rightarrow Cl + H_2O,$$

siendo el último componente que aparece en la última reacción el agua, también especialmente abundante en nuestro mundo, ausente en Venus y congelada en Marte bajo el subsuelo. Aunque cada reacción posee sus componentes específicos, podemos construir un mapa global que incorpore todas las reacciones en una sola red. El proceso que hay que seguir se indica en la figura 5.9a para las tres reacciones que hemos mostrado.

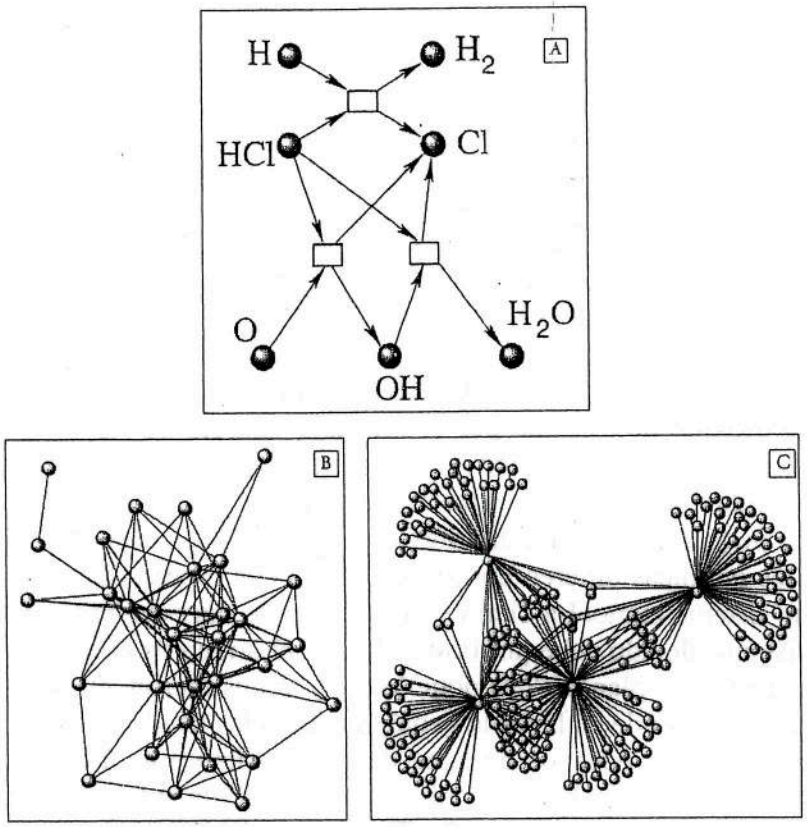


Figura 5.9. Cómo se construye una red de reacción a escala planetaria. Las reacciones químicas permiten definir las reglas básicas de construcción. A partir de la lista de reacciones, podemos trazar una primera red (a) que las conecta entre sí (los cuadrados blancos simplemente indican la presencia de reacción). Empleando estas reglas, podemos reconstruir los grafos de reacciones que definen la atmósfera planetaria (a grandes trazos). En (b) y (c) se indican la red de Marte y parte de la red de la Tierra. (Dibujos de Ricard Solé.)

¿Qué podemos esperar de estas redes? Gracias a numerosas evidencias obtenidas mediante sondas planetarias y al desarrollo de teorías y modelos, sabemos mucho de lo que les ocurrió a nuestros vecinos en el sistema solar y de cómo se transformó su química. Marte albergó agua en un pasado remoto pero los mares del planeta rojo desaparecieron a medi-

da que su atmósfera se enrarecía y su superficie se enfriaba, en un proceso de cambio acelerado que nada podía detener. El dióxido de carbono y el agua fueron secuestrados por el suelo marciano y allí permanecen congelados. El Marte de hoy es un desierto seco que sólo podemos comparar con algunas zonas remotas de la Tierra, como la Antártida o el desierto de Atacama, en Chile. Venus, en cambio, posee una atmósfera dominada por el dióxido de carbono, que lleva al límite sus efectos de gas de efecto invernadero. Venus también es el resultante de otro proceso de cambio acelerado en el que los gases de efecto invernadero fueron calentando el planeta, aumentando los niveles de dióxido de carbono de forma imparable hasta llevarlo prácticamente a la cocción (la superficie de Venus está más caliente que la de Mercurio). La historia que podemos inferir revela por lo tanto un nexo común entre estos dos mundos tan distintos: ambos alcanzaron un punto de no retorno en su desarrollo. A medida que caían hacia su destino final, su química resultaba cada vez más predecible.

Ambos planetas poseen una atmósfera pobre y homogénea desde el punto de vista de la diversidad de reacciones y esta simplicidad quedaba patente al analizar las redes de interacciones químicas. En la figura 5.9 vemos dos ejemplos del tipo de red obtenida al representar todas las reacciones de Marte y Venus. Estas redes ofrecen un aspecto simple y uniforme. En cierto sentido, son una forma distinta de mostrar el resultado que esperaríamos de un sistema en equilibrio. Cada componente en esas redes participa de un número similar de reacciones y no hay ningún componente que posea un número especialmente notable de conexiones. Esta homogeneidad contrasta visiblemente con lo que vemos al analizar la red de reacciones de nuestro planeta. El mapa resultante con el que nos encontramos resultó mucho más interesante. Al igual que ocurre con el metabolismo de una célula, la red global de interacciones químicas resultó ser libre de escala, con una gran mayoría de moléculas que participaban en pocas reacciones y algunas moléculas simples que eran la piedra angular del que

podríamos llamar (empleando la analogía de Lovelock) el metabolismo planetario. Grandes familias de reacciones pasaban a través de estos componentes esenciales, que incluían entre otros el agua o el oxígeno como elementos clave. Muchas de estas reacciones aparecen formando grupos coherentes, lo que también concuerda con lo que sabemos que caracteriza las redes del interior de nuestras células. Así, mirando a nuestro planeta de forma global, nos encontramos frente a una visión familiar, que conecta lo microscópico y lo planetario a través de un nexo común: la presencia de vida.

Puntos sin retorno

La llegada del ser humano representa un punto de inflexión en la historia de la vida en la Tierra. El astrónomo Carl Sagan dijo en una ocasión que la historia de la humanidad es sólo una nota en la fuga cósmica: si comprimiéramos toda la evolución de la vida sobre la Tierra en sólo un año, los humanos seríamos los recién llegados, y acudiríamos a la cita en los últimos minutos del día de fin de año. Nuestra impronta apenas se ve desde el espacio, pero una mirada atenta puede captar la presencia de un elemento perturbador. A lo largo de los últimos cientos de años, particularmente desde el comienzo de la revolución industrial, el proceso de cambio que han introducido los seres humanos ha experimentado una aceleración. La necesidad creciente de energía ha sido saciada gracias al empleo de los restos de la vida primitiva convertidos en carbón y petróleo. Esta materia rica en energía quedó en su momento atrapada en los sedimentos de diversas zonas del mundo. Como un inmenso cadáver hecho pedazos, tras sacarlo de su sepulcro, hemos incinerado sus partes y, con ello liberado enormes cantidades de un gas indeseable: el dióxido de carbono. Aunque su abundancia en la atmósfera terrestre es pequeña (un 0,0035 % del total), sus efectos incluso a esas bajas concentraciones son enormes. En su ausencia, nuestro

planeta sería un mundo helado, y en niveles bajos ayuda a retener parte de la radiación que nos llega del Sol mediante el llamado efecto invernadero. Pero en apenas cien años, su abundancia ha crecido de forma brutal. Todas las evidencias disponibles indican que su concentración ha aumentado casi exponencialmente. ¿Qué puede ocurrir en el futuro?

Las lecciones que hemos aprendido del estudio de las redes complejas trazan una visión poco alentadora. En general, y tal y como apuntó el ecólogo Ramon Margalef (figura 5.10) existen asimetrías muy profundas en la dinámica de los ecosistemas que implican escalas de tiempo muy dispares. La ilustración más directa, en palabras de Margalef, es la de «un bosque que necesita cien años para alcanzar su madurez pero que se quema en un día». Esta asimetría es un factor esencial en cualquier análisis del impacto que nuestras acciones puedan tener sobre la biosfera. Y el cambio puede llegar a ser permanente. En este sentido, aunque la temperatura de nuestro mundo aumenta gradualmente, la respuesta de nuestra biosfera dejará en algún momento de ser gradual. Los cambios se observan en todas partes. Aves que dejan de emigrar al llegar el invierno, anfibios cuyas poblaciones declinan, incendios cada vez más frecuentes. En general, vemos también un crecimiento rápido de los fenómenos extremos en todo el mundo, como lluvias torrenciales o sequías persistentes.

La cuestión abierta es la de si estas tendencias se mantendrán en el futuro o si por el contrario experimentarán una aceleración brusca. Esta última posibilidad surge del estudio de multitud de sistemas físicos y biológicos, que incluyen el clima a gran escala y los cambios abruptos en ecosistemas y en los que se ha probado la presencia de transiciones rápidas entre estados alternativos. Un ejemplo de dichos cambios es la transformación del Sáhara, que fue en el pasado una sabana, en el sistema desértico que vemos en la actualidad. Hace miles de años, la vegetación (un Sáhara verde) y una fauna y agua abundantes ocupaban esta zona de África. Los restos de aquellos ecosistemas aún pueden verse en la actualidad: in-

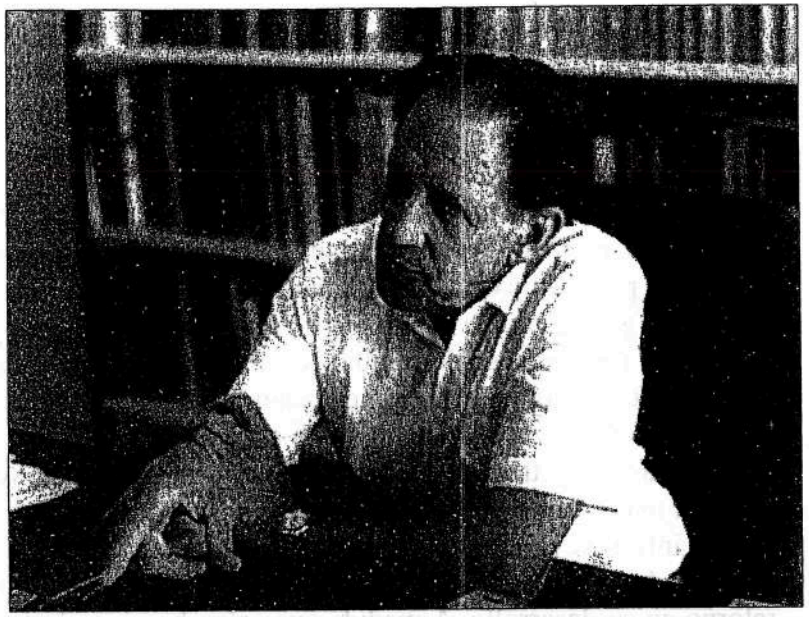


Figura 5.10. El ecólogo catalán Ramon Margalef insistió a menudo en un aspecto importante de la estructura de los ecosistemas: su enorme asimetría histórica. Los procesos que construyen un ecosistema maduro tienen lugar en una escala temporal prolongada (medible en años, décadas o siglos) mientras que aquellos que destruyen son enormemente rápidos.

numerables fósiles de animales, líneas de costa de los antiguos lagos o las pinturas rupestres con escenas de caza y pesca. Hace unos cinco mil quinientos años, aquel tipo de organización experimentó un cambio a gran escala, que llevó a una pérdida de la cubierta vegetal, de su fauna y en último término de su suelo fértil. Nuestra primera explicación sería imaginar una variación en un factor ambiental (precipitación, temperatura, insolación) que tal vez cambió de forma rápida, y llevó al sistema al colapso. En realidad, nada de lo que se ha podido medir sugiere semejante escenario. Por el contrario, los cambios en las variables climáticas fueron continuos y suaves. Pero tal y como han demostrado diversos estudios, las respuestas de los ecosistemas a las perturbaciones pueden ser altamente no lineales: la misma intensidad de perturbación

puede dar lugar a cambios muy superiores a lo esperado de una mera proporcionalidad.

Este tipo de cambio ha sido ya observado repetidamente y es posible que se trate de un fenómeno generalizado, algo muy a tener en cuenta en el futuro, dado que estos cambios no sólo son bruscos sino también difíciles de revertir, de forma que una mejora en las condiciones externas después de la transición no devolverá al sistema a su estado anterior. Formamos parte de esta biosfera frágil y como parte del sistema debemos intervenir de manera sostenible. ¿Seremos capaces? Nos encontramos en una encrucijada en la que las decisiones que se tomen afectarán profundamente al futuro de las próximas generaciones. En nuestro planeta interconectado, los efectos de nuestro uso inapropiado de los recursos naturales puede tener un precio muy alto, en especial si no sabemos aprender de las lecciones del pasado. Nuestro paso por el planeta ya ha dejado una huella irreversible. Nuestra capacidad para anticipar el futuro y actuar de forma responsable son la única esperanza de que podamos evitar lo peor.

6
Genomas, bricolaje y evolución

> El genoma es el libro de la célula en el mismo sentido en que un diccionario es el guión de *Esperando a Godot*. Todo está allí, pero no puedes deducir el uno a partir del otro.
>
> Phillip Ball, *Historias de lo invisible*

> Si la evolución por selección natural puede dar lugar a mecanismos tan sofisticados como el ojo, el corazón o el cerebro, ¿por qué no ha hallado formas de prevenir los ataques al corazón o la enfermedad de Alzheimer?
>
> Randolf Nesse y George Williams, *Evolution and Healing*

Diseños defectuosos

El viaje del joven Charles Darwin a bordo del *Beagle* marcó el comienzo de una nueva era en el conocimiento de la historia de la vida. Cuando salió del puerto de Plymouth con 22 años y apenas pudiendo ocultar su tendencia al mareo, Darwin era un aspirante a predicador que desconocía por completo que aquel viaje cambiaría su vida para siempre. Fue una singladura singular en muchos sentidos. Una travesía larga en la que el joven naturalista sin sueldo no sólo recorrió algunos de los lugares más bellos del mundo. También transitó por territorios intelectuales en los que nadie se había internado antes. Y lo hizo en compañía del capitán Robert Fitzroy, un personaje muy peculiar cuyas ideas a menudo chocaron fron-

talmente con las de Darwin en temas tan diversos como las creencias religiosas o la esclavitud (que Darwin aborrecía y Fitzroy toleraba). Aunque Fitzroy poseía una cultura científica considerable, era también un cristiano ferviente y estaba convencido del valor de los escritos bíblicos como un relato literal de los hechos. En consecuencia, la creación de Dios debía ser entendida tal y como aparecía en el Génesis. Cuando Darwin se encontró con numerosos fósiles de grandes animales, como armadillos gigantes y otros «monstruos de razas extinguidas», el capitán le señaló a Darwin que aquello no era más que una evidencia de lo que ya nos indica el Antiguo Testamento: las grandes criaturas ahora desaparecidas simplemente no cabían en el arca de Noé. Para Darwin, aquellos hallazgos no hacían sino reforzar la visión de una naturaleza en cambio constante, con especies que, incapaces de adaptarse a un ambiente cambiante, desaparecían para siempre.

La abundancia de restos fósiles de criaturas claramente emparentadas con especies vivas hablaba de ecosistemas primitivos que eran totalmente distintos de los que en aquel momento dominaban Sudamérica. Poco a poco, la interpretación literal de la Biblia que Darwin ya había empezado a cuestionar antes de iniciar su viaje dio paso a una visión del mundo vivo elegante y unificadora. Los seres vivos formaban parte de una cadena de cambio permanente, un árbol de la vida en el que la selección impuesta por el ambiente externo y los recursos limitados eran determinantes para decidir quién vivía y quién moría. Así emergió la teoría de la evolución por selección natural, toda una revelación que ha sido comprobada hasta la saciedad. Frente a esta visión, los argumentos de Fitzroy parecen pueriles y difícilmente admisibles para una mente racional. Y sin embargo, incluso en el siglo XXI el llamado «creacionismo» ha dado alas a esta interpretación del mundo en el que todo fue creado hace sólo unos miles de años por la mano de Dios.

El frente creacionista está plagado de personajes curiosos, que a menudo rozan el esperpento. Sus argumentos son débiles y su arrogancia no conoce límites y pese a denominarse a sí mismos cristianos, hacen de la mentira su arma más poderosa. Una de sus estrellas recientes, Kent Hovind, ilustra muy bien la estrategia seguida. Por una parte, los creacionistas presentan la evolución como una «teoría absurda» en la que, dicen, se propone que la complejidad de la vida «surge del azar». Para que entendamos esta metáfora, los creacionistas afirman que aceptar la evolución es como creer que un coche puede aparecer de repente en un garaje vacío. «Una estupidez», nos dice Hovind. Y hay que estar de acuerdo con el ejemplo, aunque es imposible encontrar un solo libro de texto de biología en el que se afirme algo semejante. Y ya puestos, Hovind y sus colegas afirman que los seres humanos (en concreto, Adán y Eva) fueron creados por Dios junto al resto de animales, cielos y Tierra en seis días y que los dinosaurios convivieron con los hombres en armonía. Del mismo modo, el arca de Noé existió y el diluvio universal era el responsable de la desaparición (repentina) de muchas especies hace apenas unos miles de años. La teoría de la evolución no sería más que una religión sostenida por cientos de miles de científicos ignorantes o maliciosos (estúpidos, según Hovind solía decir en sus conferencias) que formarían parte de una conspiración de gigantescas proporciones destinada a contaminar las mentes de los niños en las escuelas. Hovind afirmaba que aquello era una tragedia y que le repugnaba que se enseñara evolución en las escuelas «que pagamos nosotros con nuestros impuestos». Una pequeña contradicción para alguien que acabó condenado a diez años de cárcel por evadir cientos de miles de dólares al fisco. En su defensa, le dijo al juez que, dado que trabajaba para Dios, «no tenía por qué pagar impuestos» y que «pagar impuestos es algo maligno y contrario a la ley divina». Si eso no es una estupidez, que venga Dios y lo vea.

El creacionismo ha intentado hacerse un lugar en las escuelas de Estados Unidos y ha tenido algunos éxitos parciales, aunque temporales. Para adaptarse al sistema judicial y

aprovechándose de las grietas de todo sistema legal, el creacionismo también (¡ay!) ha evolucionado. En su constante transformación adoptó la forma de disciplina «científica» y su representante más destacado es el llamado «diseño inteligente». En esta vuelta de tuerca del viejo creacionismo, la idea de fondo es que los sistemas biológicos son demasiado complejos para «ser fruto del azar» (otra vez el coche en el garaje). De hecho, nos dicen sus defensores, el diseño de la naturaleza y sus criaturas es «tan perfecto» que debe ser el resultado de un «diseñador»: si vemos un coche sabemos que ha sido diseñado y del mismo modo si vemos una célula, una proteína o un pájaro debemos del mismo modo concluir que han sido «diseñados». El diseñador, por supuesto, no es otro que Dios, y los partidarios de esta curiosa idea sugieren que podemos demostrar científicamente esta conjetura observando atentamente la perfección y complejidad de la materia viva.

Es muy cierto que, al observar la naturaleza, y en particular el fenómeno de la construcción de un embrión, nadie puede dejar de asombrarse ante su complejidad. A partir de una sola célula, un proceso continuo de división celular y de diferenciación va generando un organismo completo que posee al final cientos de miles o millones de células. A lo largo del proceso, los tejidos y órganos toman forma. Aparece el corazón, se crea el cerebro, los ojos y las extremidades. Al final, un individuo surgido casi de la nada. ¿Cómo no sentirse abrumado? El mismo Leonardo da Vinci dedicó una parte importante de sus esfuerzos al estudio del embrión humano. Refiriéndose a la perfección que éste exhibía, escribió así en sus *Cuadernos de notas:*

> «Aunque el ingenio humano puede lograr infinidad de inventos, nunca ideará ninguno mejor, más sencillo y directo que los que hace la naturaleza, ya que en sus inventos no falta nada y nada es superfluo». (Leonardo da Vinci, 1995.)

El proceso de desarrollo es un ejemplo extraordinario de la complejidad de lo vivo y uno estaría tentado de coincidir con Leonardo acerca de su perfección y los creacionistas dirían tal vez que es un ejemplo del diseño de la naturaleza que no puede explicarse sin un diseñador. Pero tenemos malas noticias para ellos: si hay algo claro en el quehacer de la evolución es que el diseño óptimo es muy raramente su resultado final. La evolución ha sido capaz de generar extraordinarios ejemplos de complejidad, pero su forma de actuar no es la de un diseñador. En todas partes vemos la labor del bricolaje, en ocasiones chapucero pero en último término enormemente efectivo. En el interior de nuestros genomas yacen los restos de mil cambios fallidos. Nuestro cuerpo no es el que un diseñador habría concebido. Al menos, no un diseñador inteligente.

Evolución y bricolaje

La evolución de la vida sobre nuestro planeta ha generado, tras miles de millones de años de cambio, una extraordinaria diversidad de formas. Este proceso evolutivo ha estado marcado por algunas invenciones de enorme trascendencia, como la visión, el lenguaje, el sexo, la cooperación social o el cerebro. La evidencia de estos cambios proviene de muy diversas disciplinas, como la geología, la anatomía comparada, la genética o la paleontología, por citar sólo algunas. Desde que Darwin propuso su teoría de la evolución por selección natural, el avance hacia una comprensión del fenómeno ha sido espectacular y aunque la tarea continúa lejos de estar concluida (como en cualquier disciplina científica relevante), poseemos en la actualidad una visión bastante completa de la historia de la vida sobre nuestro planeta. Podemos discutir, y lo hacemos a menudo, acerca de los mecanismos exactos que han generado esta complejidad, pero nadie en sus cabales cuestiona el hecho mismo de la evolución y el enor-

me potencial de la selección natural. ¿Qué decir acerca de la forma en la que la evolución tiene lugar? ¿Es un mecanismo que genera estructuras óptimas, como las que diseñaría —en principio— un ingeniero?

Al acercarnos a cualquier nivel de organización biológica nos encontramos con una enorme complejidad estructural (figura 6.1). Si nos detenemos a observar el cuerpo humano, veremos un conjunto de órganos interconectados llevando a cabo sus funciones diversas e interdependientes, asegurando la constancia de nuestras constantes vitales y una percepción del medio externo que nos ayuda a responder inmediatamente a todo tipo de cambios. El cerebro, los pulmones, el corazón o el hígado llevan a cabo tareas de gran sofisticación que requieren la integración de señales, el procesamiento de materia e información y una adecuada homeostasis. Todos estos sistemas son en el fondo redes de interacción. No deja de ser sorprendente que toda esta maquinaria funcione durante tantas décadas pese al uso constante y al desgaste inevitable del tiempo. Pero aún nos asombramos más cuando nos acercamos a los detalles que surgen a escalas menores. Tomemos un órgano cualquiera y observemos la estructura de sus tejidos, con sus cientos de miles de células en interacción, ensambladas entre sí y cooperando para llevar a cabo tareas muy diversas. En el tejido cardiaco, las células se envían señales que hacen que se sincronicen en un solo latido, que seguirá repitiéndose millones de veces hasta que la vida toque a su fin. En el cerebro, grupos de miles de neuronas se comunican mediante transmisores químicos, procesando señales y dando origen a pensamientos. Una inspección cuidadosa nos muestra que de hecho las células que componen distintos órganos son también distintas. Sus formas, tamaños y organización reflejan especializaciones bien definidas. Y si observamos el interior de estas células, nos encontraremos con que también allí la complejidad es extraordinaria: miles de pequeñas nanomáquinas moleculares, las proteínas, llevan a cabo multitud de funciones, como el intercambio de materia y energía

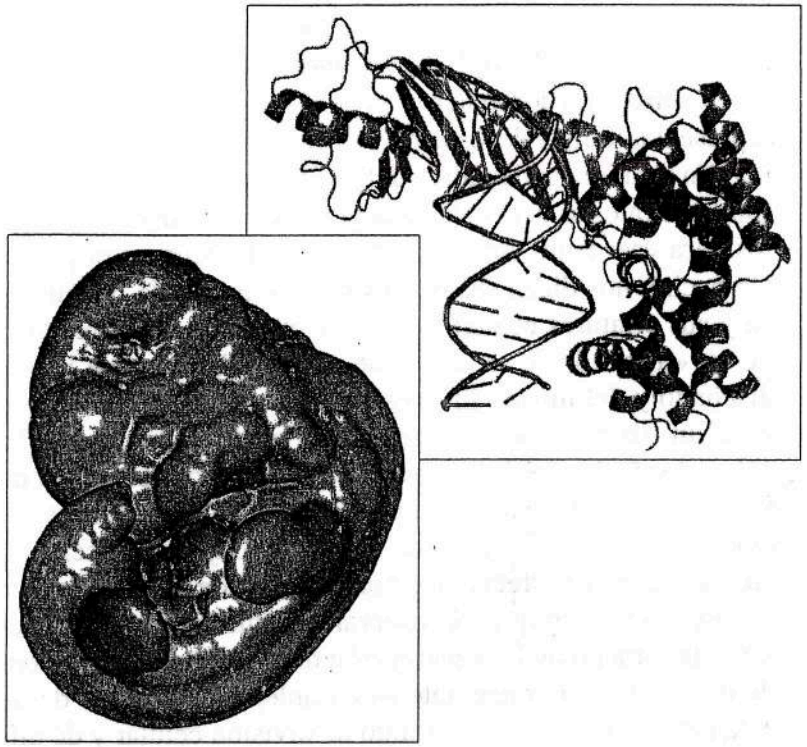


Figura 6.1. Niveles de complejidad. Un ser vivo puede analizarse a distintas escalas, en una jerarquía de estructuras que van del individuo a las moléculas constituyentes. En la imagen superior se muestra la estructura tridimensional de una proteína interaccionando con el ADN (la doble hélice). Muy por encima de esta escala, las estructuras que definen a un embrión (izquierda) no pueden reducirse a las propiedades de sus elementos básicos. (Derecha: dibujo de Ricard Solé. Izquierda: imagen cortesía de Henrik Westenberg y James Sharpe.)

con el exterior, el transporte de materiales de un lado a otro o el procesamiento de información de distintos tipos. Todo esto ocurre en un pequeño universo plagado de otras nanomáquinas que leen e interpretan la información genética, compartimentos encargados de generar energía o degradar otras moléculas y cruzado por todas partes por cables moleculares que permiten dar a cada célula su forma característica. Un micromundo de interacciones sobre el que se sostiene la vida.

La eficiencia con que estas estructuras (y algunas de las soluciones que han alcanzado) ha sugerido a muchos la idea de que la naturaleza genera formas al modo en que las diseñaría un ingeniero. Pero lejos de ser así, el ingeniero y la evolución actúan de modos muy distintos. Jacques Monod especulaba en *El azar y la necesidad** acerca de las propiedades que permitirían, a un marciano que nos visitara, reconocer un objeto vivo y distinguirlo de uno artificial: ¿cómo decidir acerca de la naturalidad o artificialidad de una estructura? Monod nos señala que el visitante de la NASA marciana podría pensar que tanto un cristal como un panal de abejas son sistemas artificiales, dada la regularidad de su diseño. Aunque observara a los organismos que generan el panal —las abejas—, Monod sugiere que, dado que todos los individuos de la colonia son idénticos, el marciano concluiría que son de naturaleza artificial. En realidad, un análisis atento del cerebro de las abejas mostraría diferencias en la forma en que las neuronas se conectan entre sí: ninguna abeja es realmente idéntica a otra. El también biólogo François Jacob (con quien Monod compartió el Nobel de Medicina) describió estas diferencias magistralmente en su artículo «Evolución y bricolaje» publicado en la revista *Science* en 1977. Jacob nos señala acertadamente que el ingeniero diseña con un plan previo, mientras que la evolución no puede por definición prever nada, dado que no posee plan alguno. El ingeniero posee un objetivo bien definido y para llevarlo a cabo puede emplear cualquier estrategia y cualesquiera materiales.

La evolución, por el contrario, está sujeta a una restricción notable: para generar nuevas estructuras, debe emplear los elementos que ya están disponibles. Vemos numerosos ejemplos de esta situación a nuestro alrededor: las viejas pantallas de televisión, por ejemplo, basadas en pesados y voluminosos tubos de rayos catódicos fueron rápidamente reemplazadas por pantallas planas. La tecnología es (al menos hasta cierto punto) muy distinta y el nuevo diseño reemplaza al anterior por completo, incluyendo en este cambio los componentes empleados para definir el anterior diseño. Podemos de hecho imaginar cada diseño como una red de componentes que interaccionan entre sí para generar un dispositivo funcional (un televisor, una máquina de escribir o una bicicleta, por ejemplo). En biología, una nueva organización de las piezas puede dar lugar a un salto cualitativo enorme, pero cualquier innovación se lleva a cabo empleando una y otra vez las piezas antiguas. Esta reutilización está en el corazón del diseño evolutivo y su marca aparece claramente al estudiar cómo las moléculas de la vida interaccionan entre sí.

La idea de Jacob resultó ampliamente confirmada por el estudio del desarrollo de los embriones de distintas especies. Con la ayuda de técnicas moleculares, ha sido posible ver la forma en que distintos genes se emplean en la construcción de un organismo y el resultado es muy revelador. De un lado, muchos genes clave en el desarrollo han permanecido casi inalterados en su secuencia a lo largo de millones de años. La conservación es lo bastante elevada como para que, si reemplazamos un gen de un organismo por el correspondiente de otro (un gen humano por uno de ratón o incluso por uno de levadura, un organismo unicelular), la proteína extraña funcione a la perfección. Esta conservación suele estar asociada a la importante función que dichos genes desempeñan en momentos cruciales de la morfogénesis. Además, y ésta es la prueba más clara, los mismos genes son reclutados en diversas ocasiones para llevar a cabo tareas muy distintas (tal y como esperaríamos de un sistema basado en el bricolaje). Por ejemplo, algunos genes dan lugar a proteínas que se emplearán en la generación de tejido en el aparato digestivo pero también en el desarrollo y organización de partes del sistema nervioso.

* Publicado por Tusquets Editores, colección Metatemas 6, Barcelona, 1981. *(N. del E.)*

El establecimiento de la secuencia completa del genoma humano fue una verdadera hazaña científica. De una forma simplificada, si imaginamos el interior de nuestras células como una fábrica formada por miles de moléculas en constante movimiento y cambio, en el interior de la fábrica habita una larguísima cadena de letras que contiene información para construir nuevos materiales. Esta cadena es el ADN, a menudo llamado «el código de la vida» e incluso «el libro de la vida». Ésta es una definición poco acertada, puesto que el ADN en realidad no nos dice gran cosa acerca de cómo funciona una célula y menos aún un organismo. Como el físico y divulgador científico Phillip Ball ha indicado, un diccionario no nos permite reconstruir la historia que se narra en una novela, aunque ciertamente todas las palabras están ahí. La novela requiere algo más que una lista de palabras. En este sentido, el ADN es una parte de la definición de sistema vivo, pero no la única. En palabras de Ball:

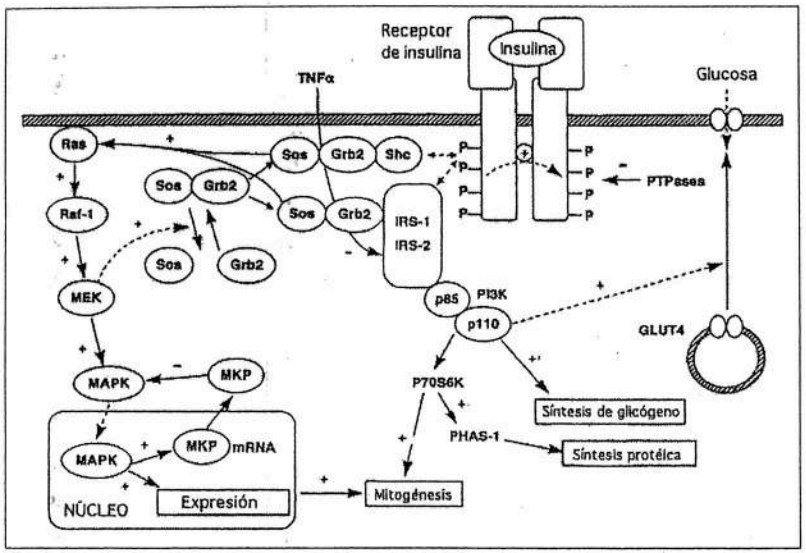
> «El genoma no nos dice nada acerca de los lípidos que forman las membranas, ni por supuesto sobre las fuerzas físicas que les permiten agregarse formando capas y esferas. Los genes no nos dicen cómo funcionan las señales neuronales cómo se codifican los pensamientos y las sensaciones en el cerebro». (Ball, 2001.)

Los genes definen secuencias de letras que, leídas por proteínas específicas, permiten sintetizar proteínas nuevas que pueden llevar a cabo funciones muy diversas. Pero las proteínas no son simples secuencias: una vez que la cadena molecular codificada por el ADN ha sido sintetizada, se pliega de formas muy complejas. Asimismo, las moléculas que forman las membranas de nuestras células y de sus compartimentos internos —los lípidos— son sintetizadas por reacciones dirigidas por proteínas, pero no debemos olvidar que, cuando

ponemos estos lípidos en contacto, forman espontáneamente estructuras complejas (esferas, capas, tubos) que se ordenan en el espacio según las leyes de la física. De alguna manera el ADN es un libro de instrucciones para construir proteínas, pero la complejidad celular no puede reducirse a la complejidad de la secuencia de genes. De hecho, si queremos comprender esta complejidad debemos analizar de forma global la maquinaria que controla la organización celular y la red compleja que definen sus protagonistas.

En la figura 6.2 se muestran las cadenas de interacciones entre distintas proteínas que participan en la respuesta a la estimulación del receptor de la insulina, situado en la superficie celular. Este ejemplo no es un caso especial, sino típico, y la figura sólo es en realidad una aproximación simplificada de todo lo que ocurre en realidad. Las llamadas redes de señalización constituyen de hecho uno de los ejemplos más interesantes de sistemas moleculares capaces de procesar información. Estas redes captan señales del medio y responden a ellas de maneras sofisticadas, en cierta forma como pequeños computadores que llevan a cabo procesos de cálculo celular. Si consideramos todas las redes que participan en este tipo de procesamiento, descubriríamos que rivalizan con un ordenador de gran potencia.

Las posibles redes celulares que pueden definirse son, entre otras, el metabolismo (el conjunto de reacciones que describen los flujos de materia y energía en la célula) o las redes genéticas de regulación (cómo los genes interaccionan entre sí para mantener adecuadamente el estado celular e incluso cuándo replicarse o morir). Todas estas redes cuentan con centenares de elementos y estamos aún lejos de su comprensión total. Una de las redes mejor conocidas es precisamente la de interacciones físicas entre proteínas o *proteoma*. Andreas Wagner, de la Universidad de Nuevo México, y el grupo de Laszlo Barabási demostraron que estas redes presentan la propiedad del mundo pequeño y son a la vez altamente heterogéneas. La presencia de distancias cortas es im-



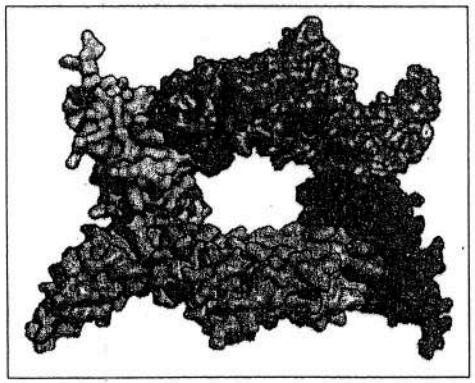


Figura 6.2. Arriba: las proteínas, aquí representadas mediante distintos símbolos, cooperan entre sí para dar lugar a las funciones celulares en las que participan. En este caso se representa una red de señales asociada al receptor de insulina, que provoca una cascada de cambios que en último término desencadenan otros procesos. Cada interacción entre un par de proteínas implica una interacción física, como la que se indica en la figura de abajo, en la que se representan las estructuras moleculares de cuatro proteínas que colaboran entre sí. (Gráfico y dibujo de Ricard Solé.)

portante si pensamos en la red como la maquinaria funcional que sostiene la dinámica celular, y que es de esperar que responda de manera rápida y flexible a cambios de distinta naturaleza. Por otra parte, la heterogeneidad nos indica que la gran mayoría de proteínas se hallan especializadas, entrando en contacto sólo con una proteína o dos. Pero también nos indica que algunas proteínas estarán altamente conectadas. ¿Cuál es el significado de estas diferencias? ¿Qué nos dice un proteoma «libre de escala»? ¿Podemos extraer información acerca de la evolución de la complejidad celular a partir de estas propiedades? Un primer paso en la comprensión de por qué estas redes poseen propiedades similares a las de Internet u otros sistemas requiere identificar la naturaleza de las proteínas que definen la red.

Los primeros estudios revelaron que las proteínas con mayor número de conexiones poseían una relevancia especial. Una de ellas en particular, la llamada proteína p53 (figura 6.3), era una vieja conocida de los biólogos moleculares, que la aislaron en 1979. p53 es un sistema de control de la integridad del genoma y el gen asociado a esta proteína es un *gen supresor de tumores:* en condiciones normales actúa como un freno de la replicación celular, por lo que, si una mutación cambia su secuencia, la proteína puede ser defectuosa. En ese caso, al igual que un coche sin frenos, la célula puede empezar a copiarse de forma descontrolada.

El papel de la proteína es diverso, pero participa sobre todo en el control de posibles daños en el ADN cuando la célula se replica. En caso de que la replicación sea inapropiada, p53 tiene la capacidad de enviar señales que pueden detener el ciclo celular, reparar el ADN e incluso forzar a la célula a su suicidio. Debido a este papel regulador y a su alta conectividad, el oncólogo Bert Vogelstein y sus colaboradores hicieron una comparación reveladora: «Este gen supresor integra numerosas señales que controlan la vida y la muerte celulares. Al igual que cuando falla un nodo altamente conectado en Internet, el bloqueo de p53 tiene consecuencias severas».

Para darnos cuenta de la relevancia de su papel, basta con destacar que p53 aparece mutado en más del 50 % de los tumores humanos. Semejante correlación parece apoyar la idea de que las partes del proteoma que se hallan más relacionadas con otras serán responsables de las fragilidades celulares. De acuerdo con esta idea, un estudio que publicamos en colaboración con los biólogos Carlos Rodríguez-Caso y Miguel Ángel Medina, del departamento de Biología Molecular de la Universidad de Málaga, confirma esta observación. En este estudio nos centramos en aquellas proteínas humanas que interaccionan físicamente con la molécula de ADN. Estos llamados *factores de transcripción* son por lo tanto especialmente importantes, dado que de una forma u otra controlarán el comportamiento del genoma. Nuestro estudio reveló que esta subred (figura 6.3, izquierda) poseía varios nodos clave con alta conectividad y que todos ellos se hallan implicados (cuando sufren mutaciones) en procesos de crecimiento tumoral.

Por otra parte, cabe preguntarse si la otra cara de la moneda que analizábamos en el capítulo 3 tiene aquí también su contrapartida: ¿qué ocurre cuando fallan nodos poco conectados? En Internet, los fallos al azar dan lugar a errores que carecen de relevancia para el sistema: un error fortuito afectará con casi toda seguridad a un elemento con pocas conexiones (dado que son mayoría). Su pérdida pasará probablemente inadvertida y la información se seguirá propagando sin dificultad. No parece obvio que éste sea el caso en la red biológica: si cada proteína participa de una función determinada, su eliminación debería dar lugar a algún tipo de deficiencia e incluso a la muerte del individuo. Sin embargo, no es así. Una técnica de ingeniería genética denominada «noqueo de genes» *(gene knockout)* permite estudiar el efecto de genes individuales sobre las propiedades del organismo estudiado. Los ratones manipulados genéticamente presentan una copia bloqueada o eliminada del gen, con lo que éste no puede expresarse y ejercer su papel. Un resultado más que relevante para nuestra discusión es la observación de un gran número de noqueos que parecen no tener ningún efecto sobre el organismo. A diferencia de lo que ocurriría con, digamos, un circuito electrónico, en el que la pérdida de un componente es sistemáticamente fatal, parece que el genoma puede tolerar un buen número de defectos génicos sin inmutarse. Así pues, los errores aleatorios —que en nuestro contexto llamamos mutaciones— no presentan la importancia de los cambios que puede desencadenar la pérdida de un conector esencial.

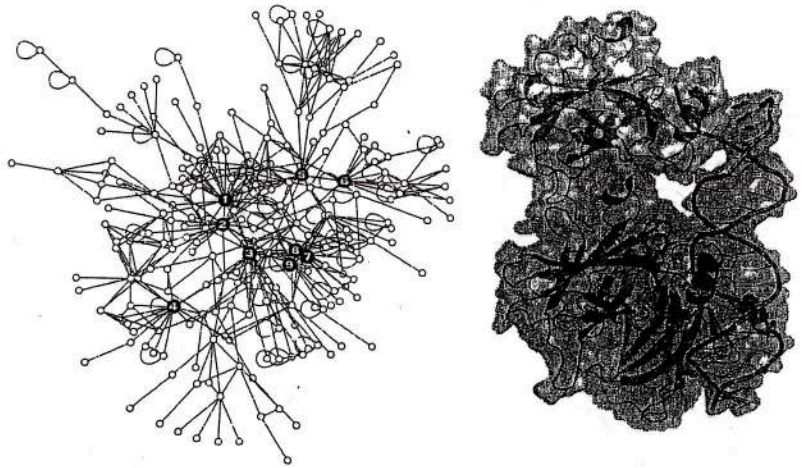


Figura 6.3. Izquierda: esquema de la red de interacciones de proteínas humanas relacionadas con el ADN. Los círculos negros indican las proteínas más conectadas, que poseen varios elementos relacionados con el cáncer. (Gráfico: cortesía de Carlos Rodríguez-Caso.) Derecha: la proteína p53, aquí en interacción con una doble hélice de ADN, es el nodo más conectado, indicado por el número uno. (Dibujos de Ricard Solé.)

Estas ideas son enormemente sugerentes y nos muestran una vez más que hay fenómenos muy generales, comunes a muchos sistemas complejos distintos. Por otra parte, algunos investigadores han apuntado al posible papel de la historia en la aparición de conectores en las redes biológicas, particularmente el metabolismo. Andreas Wagner estudió el mundo pequeño de las redes metabólicas e identificó a sus actores principales. Estas redes pueden entenderse en términos de flujos que conectan moléculas más o menos simples, que cambian

y se combinan mediante la acción de una clase de proteínas denominadas *enzimas*. Wagner descubrió que los nodos más conectados son moléculas muy primitivas, posiblemente incorporadas al metabolismo en etapas iniciales del origen y evolución de las primeras formas de vida. Como resultado de este análisis, Wagner concluyó que la organización del metaboloma (y tal vez de otras redes biológicas) podría estar fuertemente influida por su historia previa. Al fin y al cabo, una molécula simple que haya sido incorporada en una etapa inicial de la evolución celular habrá dispuesto de mucho tiempo —y oportunidades— para ganar nuevas conexiones, con lo que los conectores principales reflejarían esta historia y sus accidentes.

Los dos factores anteriores, tanto la homeostasis frente al error como el papel de la historia, parecen ser de igual importancia. La evolución implica historia, y de acuerdo con la visión de Jacob, el bricolaje habrá dejado su impronta en las estructuras actuales, después de millones de años de cambios. Por otra parte, la evolución darwiniana por selección natural debería actuar de forma implacable, eliminando del sistema aquellos componentes poco eficientes. Así pues, aunque la historia deja una huella, deberíamos esperar que la selección favoreciera ciertas formas de organización en detrimento de otras. La conjetura que parece más razonable en este sentido sostiene que las redes libres de escala que aparecen en el proteoma son el resultado de presiones selectivas. Al fin y al cabo, las ventajas son numerosas: la red posee unos pocos elementos bien conectados que pueden integrar señales de forma muy eficiente y, dado que son sólo unos pocos, raramente sufrirán mutaciones. Por el contrario, un gran número de proteínas poco conectadas permite garantizar que la mayoría de mutaciones no den lugar a daños importantes. ¿Explicaría la selección natural la arquitectura de las redes de proteínas? Como veremos, aunque sin duda la selección natural ha desempeñado y desempeña constantemente un papel, tal vez haya sido un actor secundario en esta obra.

Receta para una red celular

Construir un modelo de la evolución de redes celulares es una tarea enormemente ambiciosa. La tentación inevitable es intentar explicar lo que la naturaleza nos muestra aproximándonos lo mejor posible a su complejidad y a los mecanismos que la generan. El primer ingrediente en cualquier receta que implique la evolución del genoma o de cualquiera de las redes celulares debe considerar el mecanismo dominante responsable del crecimiento del material genético: la duplicación génica. Cuando una célula se replica, toda la secuencia de ADN lo hace, y todos los genes deben copiarse de forma adecuada para que las células hijas sean viables. Inevitablemente, siempre aparecen mutaciones, dado que el enorme tamaño del genoma de un organismo mínimamente complejo siempre da oportunidades para el error. En la mayoría de casos, los errores son limitados (mutaciones en una letra de la secuencia), pero de vez en cuando todo un fragmento de la cadena resulta eliminado o, por el contrario, duplicado. Ocasionalmente, un gen entero experimenta esta duplicación, con lo que tendremos una célula portadora de una copia extra del gen en cuestión (figura 6.4). El nuevo gen será una copia exacta del gen inicial, así que trae consigo información redundante: será responsable de codificar para la misma proteína y por lo tanto no es de esperar que represente ninguna innovación.

Una gran parte de estos genes redundantes terminarán convertidos en genes mutados, sin función: alrededor del 50 % de las copias sufren este destino, dado que si uno de los dos genes muta y deja de funcionar, el defecto no tendrá más consecuencias. Éste es el mecanismo por el que se generan los llamados *seudogenes*, cuya presencia evidente en los genomas de multitud de especies habla alto y claro en favor de la evolución. Sin embargo, de la misma forma que se ha producido de forma fortuita una duplicación, también puede ocurrir que uno de estos genes idénticos experimente una mutación que cambie su función. Ello ocurre cuando la mutación hace que la

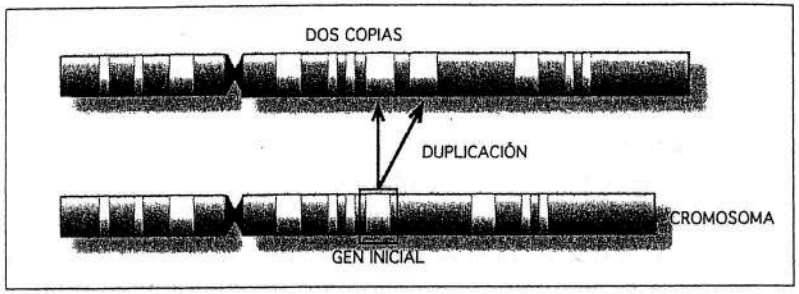


Figura 6.4. El bricolaje en la evolución emplea muy fundamentalmente un mecanismo de error que da lugar a copias extra de un gen. El fenómeno de «duplicación genética» da como resultado una copia redundante de un gen, parte del mismo o incluso de varios o muchos genes. El gen original (abajo) se ve duplicado en el cromosoma hijo (arriba) que a partir de ese momento llevará las dos copias. Si cualquiera de las copias cambia respecto a su molde inicial, podemos obtener nuevas funciones. (Dibujo de Ricard Solé.)

proteína codificada por el gen adquiera un cambio que le permita, por ejemplo, interaccionar con una proteína nueva o bien pierda esta capacidad. Este proceso, conocido como *diversificación*, conlleva la posibilidad de innovación, y es la segunda pieza clave del proceso. La evolución por duplicación y diversificación explica multitud de observaciones que los genetistas han recogido a lo largo de los años y es la materia prima con la que debemos abordar el origen de las redes celulares libres de escala. Por otra parte, para acercarnos a la realidad de la célula, deberíamos tener en cuenta las funciones que llevan a cabo los distintos genes, su localización celular, sus escalas de acción en el espacio y el tiempo. ¿Podemos hacer un modelo que incorpore estos factores?

Mi experiencia personal en esta área fue la de muchos otros científicos embarcados en comprender los mecanismos de acción de la evolución en sistemas complejos: la solución a una pregunta difícil puede llegar a veces de la mano de una idea muy simple pero a la vez sorprendente. La primera vez que intenté sacar algo en claro acerca de este problema, me encontraba de visita en el Instituto de Santa Fe y el primer intento de remedar la evolución del proteoma resultó un fracaso sonado. En mi modelo inicial, preocupado —como parece razonable— por incorporar la función de los genes a la simulación, empleé un conjunto de ecuaciones bastante complicado que intentaba capturar la forma en que los genes se regulan entre sí. La idea era partir de una red muy pequeña, formada por tan sólo unos genes, que interaccionaran entre sí de forma estable (y razonablemente «biológica»). Cada gen regularía o estaría regulado por otros, y estas regulaciones definirían las conexiones entre genes. El siguiente paso era elegir un gen al azar y llevar a cabo una copia. El nuevo sistema tenía así una copia redundante y era posible analizar si su impacto podía generar problemas. De no ser así, se aceptaba la duplicación. Por otra parte, se permitía una variación consistente en añadir o quitar al azar alguna conexión. Este paso era esencial, dado que de lo contrario lo único que podría darse es una red cada vez más conectada y redundante. La idea no parecía mala, pero el modelo era enormemente costoso en términos de cálculos computacionales y el comportamiento de la red poco satisfactorio. Después de un par de semanas batallando con aquellas ecuaciones decidí que no llevaban a ninguna parte, y consideré la posibilidad de abandonar el intento.

Sin embargo, había dejado de lado una posibilidad mucho más simple: ¿qué ocurriría si desestimase por completo la dinámica o la función de los genes? La idea parece descabellada: ¿cómo podemos remedar la evolución sin tener en cuenta la función que llevan a cabo los sistemas biológicos? ¿No es acaso la estructura el resultado de la función? Aunque esta idea es más que razonable, debemos tomar con cautela su extrapolación generalizada. En este sentido, es bueno recordar las reflexiones de Stephen Jay Gould acerca de algunas estructuras que sugieren una función pero que son en realidad un producto secundario de las reglas de construcción del sistema en las que se hallan inmersas. Gould empleaba el ejemplo (controvertido pero didáctico) de las pechinas *(spandrels,* en inglés) de algunas catedrales: en la de San Marcos

de Venecia existen por ejemplo pinturas y motivos artísticos muy decorados que llamaron la atención de Gould y que rellenan el espacio entre varios arcos. A primera vista, nos dice Gould, su vistosidad sugiere una función relevante. Sin embargo, las pechinas son más bien el resultado de una necesidad secundaria: cerrar el espacio abierto que aparece en la confluencia de los arcos. Lo mismo ocurre con el techo de las naves de muchas catedrales góticas (figura 6.5) en los que vemos unas estructuras en forma romboidal, de gran belleza, y que resultan también del mismo tipo de restricciones arquitectónicas. La lección que Gould nos sugiere (sin que debamos tomar el ejemplo arquitectónico al pie de la letra) es que el mecanismo por el que se desarrolla y evoluciona en el tiempo una forma determinada puede dar lugar, como producto secundario, a estructuras que no han sido directamente seleccionadas en ningún sentido.

Supongamos, pues, que nos olvidamos de la función por un momento y nos preguntamos cuán lejos podemos llegar empleando un modelo tan simple que no tenga en cuenta algo tan esencial como la función que desempeñan sus componentes. En mi caso, utilicé el modelo más simple que pude imaginar: tomamos una pequeña red inicial con algunas conexiones, elegimos un nodo al azar y lo duplicamos, y finalmente eliminamos o añadimos conexiones. Otros investigadores, como el físico Alexei Vázquez, de la Escuela Internacional de Estudios Avanzados de Trieste, desarrollaban en aquella época modelos muy similares. Dicho así suena ridículamente simple, y de hecho lo es. En esta descripción no hay genes, ni proteínas, ni células ni nada que se parezca a una función. Es en realidad una simplificación extrema del proceso de copia y divergencia que hemos discutido antes, sólo que reducido a su mínima expresión. Este atajo parece brutal, y tal vez lo sea, pero tal y como hemos discutido anteriormente, en ocasiones debemos reducir la complejidad de un problema a su esqueleto esencial, dejando a un lado los detalles, si deseamos explicar lo que ocurre a una escala superior. Empleando

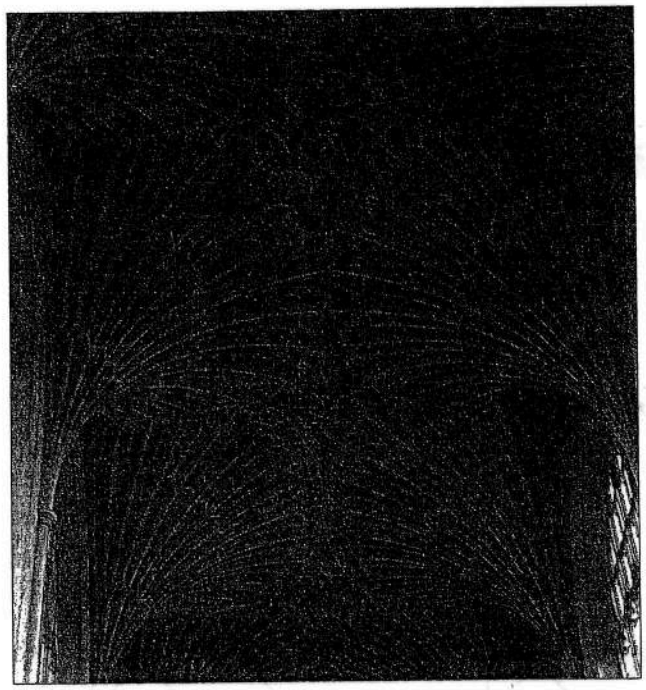


Figura 6.5. En toda estructura compleja es posible identificar elementos que no poseen un significado funcional directo. Empleando una metáfora arquitectónica, el biólogo evolucionista y paleontólogo Stephen Jay Gould sugirió que algunas estructuras que se interpretan como adaptaciones funcionales podrían de hecho no serlo, al igual que los espacios entre arcos de una catedral (aquí se muestra la nave central de la abadía de Bath) que aparecen profusamente decorados. Su estructura es una consecuencia del espacio que hay que llenar entre varios arcos. (Fotografía de Ricard Solé.)

este modelo (figura 6.6) era posible hacer crecer una red compleja y comparar el resultado con las redes reales.

El resultado fue inesperado: la red era enormemente similar a las redes de interacciones de proteínas generadas por la evolución real. Por un lado, presentaban la propiedad del mundo pequeño, con distancias medias muy similares. Por otro, eran muy heterogéneas, con el mismo patrón de las redes reales. Sin necesidad de imponer ninguna funcionalidad o presión de selección hacia redes menos frágiles, el sistema evolucionaba espontáneamente hacia un diseño robusto. Pero

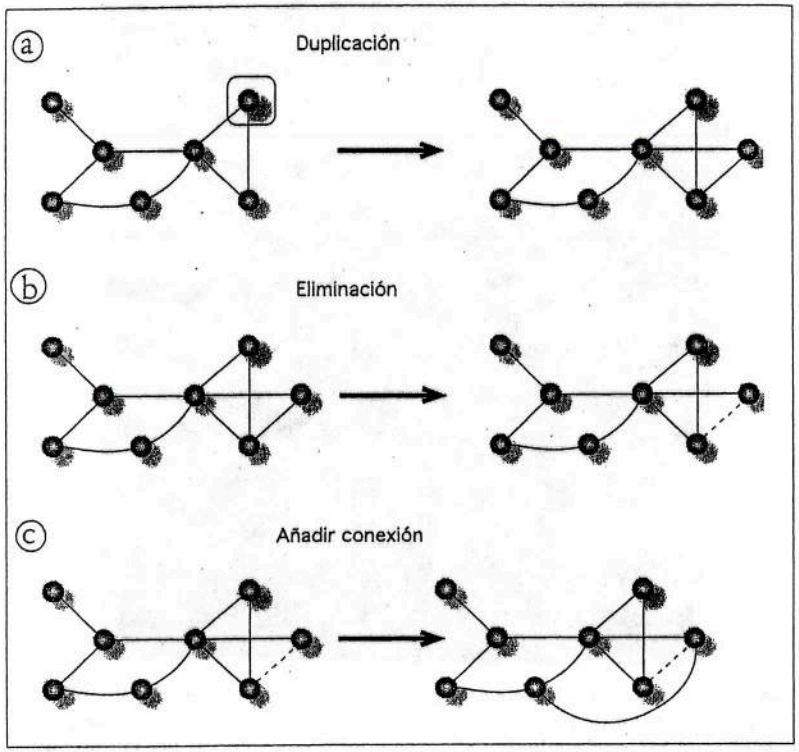


Figura 6.6. Un modelo mínimo empleado para simular la evolución del genoma. En cada iteración, se añade un nuevo elemento copiando al azar uno de los nodos existentes (a), tras lo cual podemos eliminar (b) una de las conexiones redundantes o añadir (c) una nueva. Cada uno de estos cambios de conectividad tiene asociada cierta probabilidad, que se ha estimado a partir de datos reales. (Gráfico de Ricard Solé.)

las similitudes no se detenían aquí. Una propiedad muy importante de las redes biológicas (y no sólo celulares) es la presencia de *modularidad*. Por sistema modular entendemos un objeto cuya principal característica es que está formado por distintas partes que se hallan internamente muy integradas pero a la vez poco relacionadas con el resto del sistema. Una red modular se compone de distintas subredes cuyos elementos tienen más conexiones con los elementos de su propia subred que con los de las demás subredes. Así, estas

subredes definen subsistemas más o menos independientes que se comunican entre sí. La modularidad se considera una de las características principales de la complejidad biológica. Gracias a ésta, podemos lograr la especialización de distintas partes, permitir así que evolucionen de forma más independiente y también se evita que un daño en un módulo se propague hacia los otros (dado que las conexiones entre módulos son más débiles). Diversos estudios han demostrado que las redes celulares presentan modularidad, y ésta puede medirse de forma rigurosa, con lo que podemos determinar —si los hay— cuáles son los módulos constituyentes de una red. Dadas las enormes ventajas que ofrece la presencia de módulos, la mayoría de estudios sugerían que esta propiedad sería objeto de selección y que sólo la selección podría explicar su presencia. La sorpresa fue enorme al descubrir, contra todo pronóstico, que las redes artificiales generadas por el modelo también eran modulares. En la figura 6.7 vemos un ejemplo típico de estas redes, en el que podemos apreciar la presencia de una mayoría de nodos poco conectados frente a una minoría de *hubs*.

El resultado de este modelo y otros desarrollados posteriormente es contundente: gran parte de la arquitectura de las redes celulares sería el resultado imprevisto de las reglas de copia y reconexión que definen el bricolaje a la escala mínima. Aunque la selección natural puede sacar mucho partido de estas estructuras más que deseables, no sería el motor principal. Por el contrario, la amplificación de las reglas mínimas que permiten al genoma crecer y modificarse sería la responsable de la generación de complejidad. Una complejidad inevitable sobre la cual los procesos de cambio de naturaleza darwiniana se verían favorecidos de muchas formas.

¿Se detiene aquí el papel del bricolaje? ¿Podría este mecanismo estar presente en otros ámbitos? Tal vez no. De hecho, podría ocurrir que la distinción que François Jacob estableció entre diseños naturales y artificiales no sea tan clara. Mi colega Sergi Valverde se planteó la posibilidad de anali-

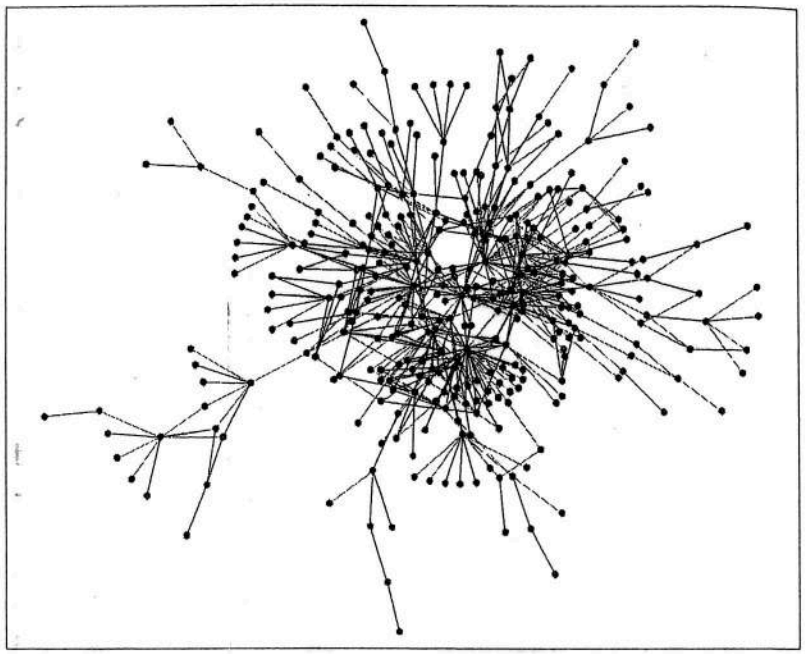


Figura 6.7. Resultado final de la simulación de una red celular obtenida mediante el modelo de duplicación y divergencia definido en la figura 6.6. La red define un mundo pequeño, es libre de escala e incluso presenta modularidad. (Dibujo de Ricard Solé.)

zar la evolución de un sistema tecnológico con ayuda de la idea del bricolaje como modelo. Este sistema no es otro que el de los grandes programas de *software* que mantienen, aunque de forma invisible, gran parte de nuestra economía, todos los sistemas informáticos que empleamos y, cada vez más, múltiples aspectos de nuestra vida diaria. El desarrollo de un sistema de *software* suele necesitar del trabajo coordinado de muchos programadores experimentados. Sin embargo, aunque los programas son inicialmente planificados de forma bien organizada, a medida que su complejidad aumenta resulta cada vez más difícil controlar posibles problemas, que surgen inevitablemente. El sistema deja de ser controlable y distintas partes del mismo se desarrollan en paralelo, no siempre de forma

totalmente compatible. La complejidad de algunos sistemas y los problemas que ésta genera se hacen visibles cuando nuestro ordenador se bloquea por motivos imposibles de comprender.

Sergi pasó algunos años trabajando en una empresa de desarrollo de *software* mientras compatibilizaba sus horas de programador con una tesis doctoral en el departamento de Física e Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde se encontraba entonces mi grupo de investigación. Durante aquellos años comprobó que los programas que se desarrollaban en su empresa crecían a menudo mediante mecanismos cuya naturaleza podría muy bien calificarse de bricolaje. En los lenguajes de programación actuales, todo elemento del sistema es un «objeto» de distinta naturaleza pero en general claramente comprensible como entidad. En esta «programación orientada a objetos», un programa queda definido como un conjunto de estos objetos, que colaboran entre ellos para realizar tareas. Esto permite hacer los programas y módulos más fáciles de escribir, mantener y reutilizar. Cualquiera de estos objetos contiene toda la información que lo define dentro de una «clase», definida como un conjunto de propiedades y comportamientos. Una clase posee un número de características abstractas. La clase «imagen», por ejemplo, incluye objetos muy diversos que comparten propiedades generales pero bien definidas. A su vez, los objetos disponen de mecanismos de interacción (llamados *métodos)* que favorecen la comunicación entre ellos. Los programadores llevan a cabo duplicaciones de código basadas en parte en la copia y posterior modificación de dichos objetos. Dado que estos objetos se relacionan entre sí, la copia de un objeto da lugar (como la copia de un gen) a la copia de las conexiones previas. La modificación a su vez da lugar a cambios en la conectividad (figura 6.8). Al estudiar la estructura a gran escala de los grafos de los programas, descubrimos que aquí también se daban todas las propiedades que acabamos de ver en el proteoma: mundo pequeño, heterogeneidad y modularidad. Y una vez más, pudimos desarrollar un modelo muy

simple de crecimiento de un programa de *software,* basado en un modelo algo distinto de duplicación y divergencia, que también era capaz de reproducir la gran mayoría de las propiedades de las redes reales, sugiriendo así que la reutilización y posterior modificación de objetos es la responsable principal de la macroestructura de estos sistemas, con todas las ventajas y fragilidades que inevitablemente conlleva el bricolaje. El ingeniero estaría así, sin saberlo, remedando los mecanismos de cambio de la evolución biológica.

Hechos para no durar

Los creacionistas, incapaces de entender el argumento de la evolución como un proceso que puede generar complejidad de forma constante, insisten en que semejante complejidad implica un diseño. Argumentan que unir «al azar» un gran conjunto de macromoléculas y que éste dé lugar a una función es imposible. «Sólo el diseñador puede explicar el diseño», afirman. Por lo visto los avances de la biología se pueden ignorar por completo, y estos nuevos predicadores se limitan a seguir el discurso del reverendo William Paley. En 1802 Paley publicó su obra *Filosofía natural,* en la que introduce su famosa metáfora del diseñador como explicación de toda estructura compleja. El argumento se reduce a señalar que, si encontramos un reloj en el bosque, inmediatamente concluiremos que existe un diseñador, así que lo mismo cabe concluir acerca de cualquier forma del mundo natural, en el que el diseñador sería Dios. ¿Existen evidencias de este diseñador en la organización de los seres vivos? Algunos científicos han respondido de forma contundente a estas afirmaciones. De hecho, el argumento del diseñador nos lleva a conclusiones absurdas e incluso contrarias al propio pensamiento religioso. Por ejemplo, considerando la frecuencia con la que se producen interrupciones espontáneas de la gestación (debido a menudo a un rechazo del material «extraño» por parte de la

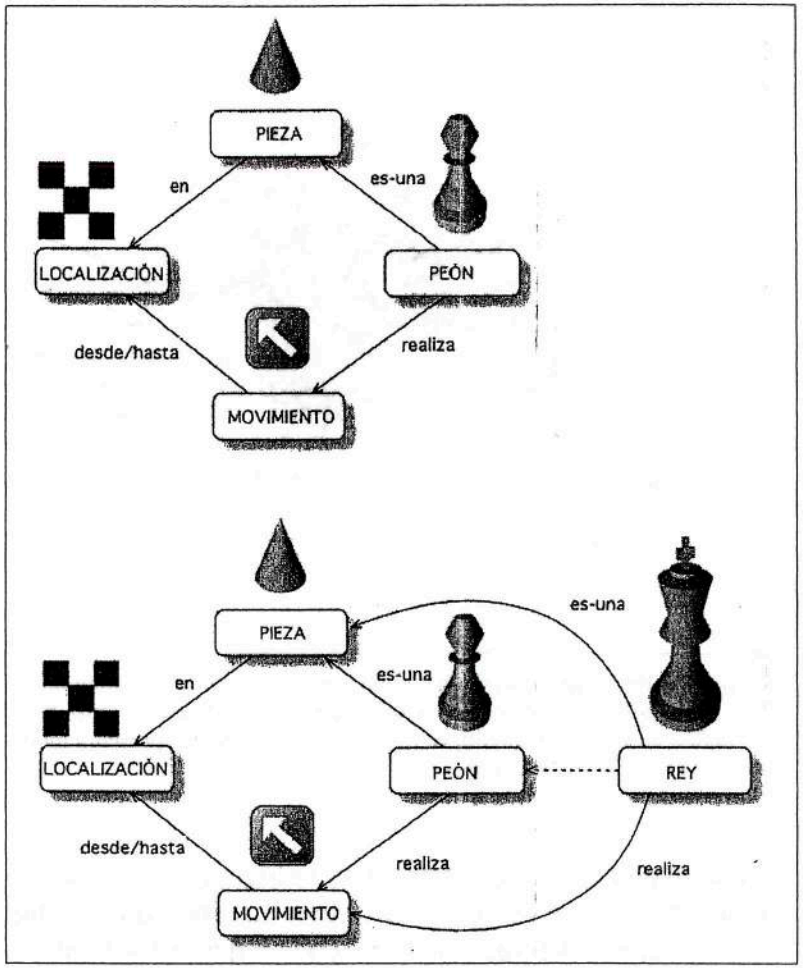


Figura 6.8. Bricolaje ingenieril. Aunque los ingenieros diseñan con un objetivo (a diferencia de la evolución biológica, que se basa en la reutilización de elementos disponibles), en ocasiones no pueden evitar el recurso a algún tipo de bricolaje. Una ilustración de esta idea la dan los programas de *software,* en los que es frecuente copiar estructuras previas para reutilizarlas. Un programa de juego de ajedrez interactivo, por ejemplo, poseerá una descripción de distintos objetos. Al desarrollar el programa, compuesto por diversos módulos (arriba) el programador puede copiar elementos anteriores (como el peón) cuya estructura es la adecuada para definir un elemento nuevo (el rey o el alfil). La copia del objeto (abajo, derecha) obliga a copiar sus relaciones con otras partes del programa: se ha producido una duplicación. (Gráfico reproducido por cortesía de Sergi Valverde.)

madre), Francisco Ayala, uno de los más importantes biólogos evolucionistas y creyente, señala que:

> «Quien dice que Dios es el diseñador de todo está blasfemando. El 20 % de los embarazos acaba en aborto espontáneo durante los dos primeros meses. Dado que los partidarios del "diseño inteligente" mantienen que hay un ser humano desde el momento de la concepción, Dios sería el mayor asesino de la Historia». (Entevista en el diario *El Público,* 2007.)

Tal y como hemos visto, la evolución es pródiga en la chapuza: en ausencia de otra alternativa, echa mano de lo que tiene disponible en cada momento para generar nuevas estructuras. Lo hace de forma no dirigida, puesto que —a diferencia del diseñador, si lo hubiera— carece de la capacidad de prever el futuro. En todas partes vemos la huella del bricolaje. Nuestra inteligencia nos permite sin embargo pensar en alternativas y responder a preguntas interesantes, por ejemplo: ¿cómo sería el cuerpo humano si hubiera sido diseñado para durar? Tres expertos en envejecimiento, Jay Olshansky, Bruce Carnes y Robert Butler, se pusieron manos a la obra y llegaron a una conclusión muy clara: no estamos hechos para durar. Un cuerpo humano a salvo de fracturas, miopía, ligamentos rotos, venas varicosas, pérdidas de audición o hernias (por no mencionar otros problemas) debería poseer un buen número de diferencias sustanciales respecto del «diseño» que sufrimos en la realidad. Necesitaríamos por ejemplo un mayor número de costillas, una rodilla invertida (doblada hacia atrás), orejas grandes, un cuello curvado, brazos y cuerpos más cortos o discos vertebrales más gruesos. Y otros cambios se requerirían para evitar el cruce entre el sistema digestivo y el respiratorio (que puede hacer que nos ahoguemos), las enfermedades autoinmunes —en las que nuestro sistema de defensa se rebela contra los tejidos propios como si fueran extraños— o los dolores del parto que, según el Antiguo Testamento,

fueron el precio que tuvieron que pagar *todas* las mujeres debido al pecado original («parirás a tus hijos con dolor», Génesis 3:16). Si fue así, habría que preguntarse por qué Dios condenó a la serpiente «a arrastrarse sobre su vientre el resto de sus días». Como dice el actor y humorista inglés Rickie Gervais, «no parece realmente el castigo adecuado para una serpiente».

Pese a todo, aunque el bricolaje parece una mala opción para progresar, la evolución ha conseguido llegar muy lejos empleándolo constantemente. A lo largo de millones de años de cambio, la vida que compone nuestra biosfera se ha desarrollado sin cesar. Y lo que es tal vez más inesperado: el bricolaje, la reutilización de elementos disponibles en un momento dado, puede dar pie a ventajas insospechadas. Como hemos visto, las redes resultantes del mecanismo de duplicación y diversificación poseen un orden espontáneo (el «orden gratis», como diría Stuart Kauffman) que no resulta de la presión selectiva. Sin necesidad de recurrir a diseñador alguno, el simple proceso de copiar y reconectar genera una estructura compleja que se halla muy bien comunicada, presenta una arquitectura que previene los daños por mutación e incluso posee organización modular. El crecimiento de la red conduce, sin planificación alguna, a un sistema con múltiples propiedades deseables que la selección podrá moldear con rapidez. El bricolaje de la naturaleza nos da una vez más una lección inesperada. Y es que los designios de la evolución... no son inescrutables.

7
Cerebros y máquinas

> El cerebro —es más amplio que el cielo — / colócalos juntos — / contendrá el uno al otro / holgadamente —y tú también —
>
> Emily Dickinson, «El cerebro»

> Las únicas leyes de la materia son aquellas que fabrica nuestra mente, y las únicas leyes de la mente son el resultado de la materia.
>
> James Clerck Maxwell

> No pienses en un elefante. Por supuesto que lo acabas de hacer, y yo también. Pero ¿dónde está el elefante? En tu mente.
>
> Gerald Edelman, *Bright air, brilliant fire: on the matter of the mind*

La catedral de la complejidad

En 1991 me encontraba en Inglaterra, visitando a mi colega Brian Goodwin en la Open University, cuando una noche fui víctima de una experiencia terrorífica. En aquella época, siguiendo la costumbre de toda una vida, me quedaba trabajando en la universidad hasta altas horas de la madrugada, normalmente sin otra compañía que libros, pizarras y laboratorios vacíos. El campus de esta universidad se encuentra situado en mitad de la campiña inglesa (es decir, en mitad de ninguna parte), así que el camino hasta mi alojamiento serpenteaba durante varios kilómetros cruzando un páramo oscuro que cada noche solía recorrer absorto en mis pensamientos. Al salir del departamento de Biología, con los ojos

enrojecidos tras horas frente a mis notas y la pantalla del ordenador, solía encontrarme con algún erizo hambriento deambulando por la hierba y con un frío que calaba los huesos. Normalmente, me detenía unos segundos a disfrutar del aire fresco, para inmediatamente comenzar mi pequeña excursión, durante la cual hacía repaso mental de mis últimos resultados o divagaciones. Aquella noche de invierno, pasadas las tres de la madrugada, las cosas resultaron bien distintas de lo habitual.

Al salir, me encontré con que una niebla espesa lo cubría todo, de modo que incluso las luces de las farolas cercanas se veían con dificultad. Algunos pasos más allá, podía apenas entrever la pequeña iglesia y su diminuto cementerio, con sus lápidas antiguas inclinadas en todas direcciones. Aunque con algo de aprensión, estaba más que dispuesto a llegar lo antes posible a mi destino (donde me esperaba un plato de comida caliente), así que aceleré el paso. Al llegar al puente bajo el que pasaba un pequeño riachuelo, las cosas empeoraron: la humedad hacía la niebla casi impenetrable y apenas podía ver a un metro de distancia. Fue entonces cuando oí unos pasos justo a mi espalda, que inmediatamente se interrumpieron. Me detuve a escuchar, sorprendido pero no preocupado. «Al fin y al cabo», pensé, «¿quién podía estar allí, paseando tan tarde?» Tres nuevos pasos que se acercaban me sugirieron inmediatamente una posible respuesta: un asesino en serie, uno de esos ingleses apacibles, bebedores compulsivos de té, que tienen a doce muertos enterrados en su jardín. Así que, aunque Woody Allen diría que el asesinato en serie es sólo una forma de vida alternativa, aceleré el paso siguiendo la estrecha senda mientras imaginaba tras de mí a un individuo huido del manicomio y blandiendo un hacha de grandes dimensiones. Ya empezaba a reírme de aquellas ideas absurdas cuando oí, muy cerca y con toda claridad, nuevos pasos. Supongo que la racionalidad tiene un límite más allá del cual el terror se instala y toma el control, ya que inmediatamente me puse a correr lo más rápido que pude. No habría recorrido

más de quince metros cuando, presa del pánico, choqué con un cuerpo caliente que se cruzaba en mitad del camino. Caí hacia atrás y ya sentado en el suelo pude entrever la silueta de una vaca que se alejaba a toda velocidad, no menos aterrorizada de lo que yo había estado. Justo después de aquel encontronazo, recuperando las fuerzas (y la racionalidad) me di cuenta de que los pasos que había oído se repetían alrededor: otras vacas pastaban tranquilamente, sumergidas en la niebla y ajenas a mis preocupaciones. El asesino del hacha había sido adecuadamente cocinado en mi cerebro que, atando entre sí percepciones inconexas, había creado la ilusión de una realidad que no existía.

He pensado a menudo en este episodio. Es más que probable que los pasos que creí oír fueran irregulares y que —pensando fríamente— debían de parecer más vacunos que humanos, pero en mi cerebro y en aquellas circunstancias sonaban completamente ordenados y con un propósito. Éste no es más que un ejemplo de la asombrosa capacidad de nuestra mente para organizar nuestras percepciones, dándoles coherencia y a menudo buscando patrones en el desorden. Aunque no lo parezca, la información que procesamos en cada momento es fragmentaria y sesgada. Es tarea del cerebro darle forma para que el mundo externo tenga sentido, aunque la explicación final carezca de él o resulte paradójica. Este hecho da lugar a situaciones sorprendentes, como ocurre por ejemplo con los llamados miembros fantasma: un alto porcentaje de personas que han sufrido la amputación de una extremidad experimentan la extraña (pero muy «real») sensación de que la mano o pie siguen allí. ¿De dónde procede esta sensación? Durante la vida del individuo, se crean en la corteza cerebral redes de neuronas que son capaces de crear cierta imagen interna de cada parte de nuestro cuerpo. Las manos en particular están muy bien representadas en el interior de la mente. Cuando el miembro deja de existir, la red sigue ahí, y dado que en último término es el cerebro el responsable de percibir y moldear la realidad... el miembro también sigue ahí. Puede parecer que se

mueve, y puede sentirse en ocasiones cómo la mano gesticula cuando uno habla. Y, peor aún, muchas de estas personas que experimentan el miembro fantasma lo sienten de forma dolorosa, y es un dolor que, por motivos obvios, no puede combatirse con facilidad.

La mente, con todas sus maravillas y paradojas, es probablemente el lugar más complejo que existe en el universo... después (tal vez) del propio universo. El físico Peter Coveney la llamó acertadamente «la catedral de la complejidad». Estamos tan acostumbrados a tener un cerebro dentro de nuestro cráneo que no somos conscientes de lo extraordinario que es su posesión. La comparación entre la mente y el cosmos es menos gratuita de lo que parece: el número de neuronas de nuestro cerebro ronda los cien mil millones, el mismo que el número de estrellas de nuestra galaxia. Y cuando conectamos semejante cantidad de elementos entre sí, pueden suceder cosas asombrosas.

Módulos cerebrales

El papel del cerebro como sede del intelecto, hoy asumido sin mayores complejos, tuvo una historia accidentada y llena de prejuicios. Muchos no reconocieron su papel real y por el contrario asignaron la sede de la mente y las emociones al corazón e incluso al hígado. Aristóteles fue el mayor abogado del papel del corazón como sede del alma, mientras que asignaba al cerebro un mero papel de radiador. Los hipocráticos, por su parte, supieron reconocer acertadamente el papel del cerebro como centro de emociones, pensamientos y juicios. Pronto surgió la pregunta de la localización de estas funciones y en particular la sede de la mente (lo que a menudo se denomina, no sin connotaciones religiosas, el alma). Por su parte, el anatomista griego Galeno concluyó que aunque la mente se hallaba en el cerebro, dada su naturaleza intangible, ocupaba en realidad sus cavidades en lugar de la propia materia gris.

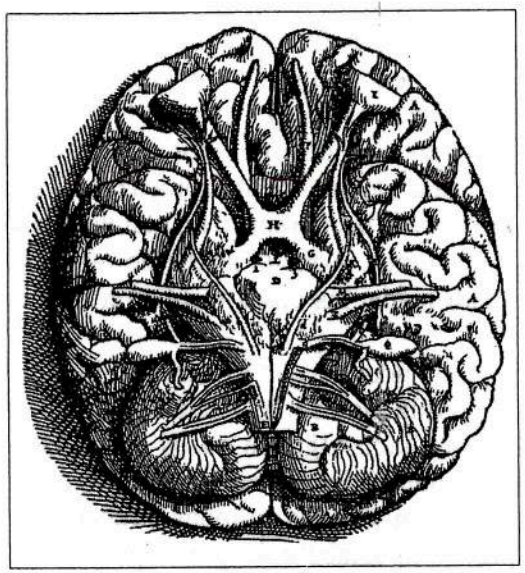


Figura 7.1. Grabado de Vesalio (realizado hacia 1555) que representa la anatomía del cerebro visto desde su parte inferior (basal). Podemos ver los dos hemisferios, los llamados nervios craneales y parte de la médula espinal, así como los nervios ópticos que confluyen en el llamado quiasma óptico (H en la figura).

Lo singular de la experiencia consciente, particularmente de la autoconciencia, llevó al filósofo René Descartes a formular la hipótesis dualista: el cerebro y la mente serían dos entidades separadas, siendo la segunda independiente de la primera. Materia y espíritu se excluyen entre sí, y el dualismo cartesiano empezó su larga travesía. El dualismo ofrece una visión de la materia disociada del pensamiento. Por el contrario, la visión monista —que se desarrolló en paralelo con la cartesiana— plantea una situación bien distinta: mente y cerebro se hallan inextricablemente unidos entre sí, siendo la primera el resultado de la actividad del segundo. La mente material prevalecería así sobre el alma inmaterial. Hoy en día muy pocos científicos se adhieren a la visión de la conciencia como un fenómeno disociado de la naturaleza material de la mente. Por el contrario, el mayor conocimiento de la estruc-

tura y función cerebrales ha llevado a una comprensión de la mente que, aunque lejos de ser completa, nos permite conjeturar que la experiencia consciente es producto de la actividad cerebral.

Si bien el problema de la conciencia persiste como uno de los grandes retos de la neurociencia, mucho se conoce acerca de la existencia de cierta modularidad básica en la organización cerebral. Desde los inicios de la medicina, gracias a los accidentes que implicaban daños en la cabeza y a la costumbre de los humanos de resolver nuestras diferencias a tiros, la evidencia acumulada nos indica que existen áreas del cerebro especialmente importantes con respecto a determinadas tareas. Una lesión en el lóbulo occipital (la parte posterior del cráneo) puede dar lugar a la pérdida total o parcial de la visión aunque los ojos y nervios ópticos sigan intactos. Un daño localizado en cierta zona del lóbulo parietal izquierdo origina problemas graves en las capacidades asociadas al lenguaje. Y en algunos casos un daño en el lóbulo frontal deriva en cambios de personalidad sutiles y complejos, aunque en ocasiones los desórdenes de comportamiento sean profundos. El caso del lenguaje es especialmente importante y proporciona el ejemplo más evidente de localización de tareas. Los daños cerebrales en estas zonas, situadas en el lado izquierdo de la cabeza, provocan diversos tipos de dificultades asociadas a la comprensión o generación de lenguaje hablado. Ciertas lesiones ocasionan pérdidas de memoria relacionadas con nombres mientras que otros conservan la comprensión del lenguaje pero generan dificultades en el habla. Una de estas áreas fue identificada por el francés Paul Broca en 1861 en un paciente incapaz de hablar pero con su capacidad de comprensión intacta, cuya autopsia reveló una lesión en un área especial del cerebro. Esta lesión y sus consecuencias fueron posteriormente confirmadas en otros casos, y se estableció así la existencia de una relación causal entre un área concreta del cerebro y el habla. Aunque el carácter complejo del lenguaje estaba bien establecido desde el siglo XVII, Broca se resistía a asociar un área con una función. En sus propias palabras:

> «Las funciones del cerebro son simplemente demasiado diversas y se revelan en formas distintas. Hay por ejemplo idiotas que posee una memoria extraordinaria y enfermedades que dejan el juicio intacto mientras que destruyen la memoria». (Citado en Burrell, 2004.)

Pese a estas palabras de precaución, los hallazgos de Broca y de otros estudiosos sirvieron de materia prima para un discurso seudocientífico que sentó las débiles bases de la llamada *frenología*. Esta supuesta disciplina científica sugería la idea de que la distribución de las áreas cerebrales (cada una con su tarea o función asociadas) y su tamaño —así como otras características— tuvieron un impacto en la forma del cráneo y de la cara (figura 7.2). Puesto que el cerebro define la personalidad, un estudio adecuado de las proporciones de ciertas zonas de la cabeza permitiría decidir con claridad acerca de la psicología y potencialidades de un individuo concreto. Tal vez se podría incluso decidir si se trataba de un criminal o de un santo. Por extraña que pueda resultar esta visión, su aparente respetabilidad (basada en el empleo de estadísticas e instrumentos de medida sofisticados) suscitó abusos considerables. Los frenólogos no tardaron en poner etiquetas a razas y minorías y a promover su pretensión de clasificar a los seres humanos dentro de su estrecha visión de la realidad. La frenología generó no pocas injusticias y sin duda dañó e incluso arruinó la vida de muchas personas. También engendró algunos ejemplos de pobreza intelectual y moral que rozan lo cómico. Stephen Jay Gould recogió estos elementos en su magnífico libro *La falsa medida del hombre*, todo un alegato contra el racismo y las seudociencias. A lo largo del siglo XIX, frenólogos como Gustave Le Bon hicieron observaciones acerca de la naturaleza humana que hablan por sí mismas:

«En las razas más inteligentes, como sucede con los parisinos, hay una gran cantidad de mujeres cuyo cerebro presenta un tamaño más parecido al del gorila que al del hombre, que está más desarrollado. Esta inferioridad es tan obvia que nadie puede dudar ni un momento de ella [...]. La mujer está más cerca del niño y del salvaje que del hombre adulto civilizado. [...] Sin duda, hay algunas mujeres destacadas, muy superiores al hombre medio, pero son tan excepcionales como la aparición de cualquier monstruosidad, como un gorila de dos cabezas, por ejemplo; por tanto, podemos dejarlas totalmente de lado». *(La falsa medida del hombre.)*

En el siglo XX, otros autores emplearon argumentos similares, basados en interpretaciones sesgadas de los tests de inteligencia o en una lectura arbitraria de la teoría de la evolución darwiniana. La invención del llamado «darwinismo social», una seudociencia de la peor calaña, sirvió para justificar las desigualdades sociales y económicas basándose en la peregrina idea de que los ricos y poderosos lo eran debido a su superioridad genética. Este punto de vista sirvió —junto con otras cosas— para justificar el colonialismo y sus desmanes, el asesinato y persecución de razas «inferiores» y dictaduras de diverso signo. Semejantes extrapolaciones carecen de toda base racional o científica y hubieran escandalizado al propio Darwin, que era un ferviente antirracista. De hecho, el mismo Darwin sufrió en carne propia este tipo de prejuicios cuando Robert Fitzroy, capitán del barco en el que Darwin realizó su mítico viaje, estuvo a punto de no admitirlo a bordo porque su nariz «denotaba falta de decisión».

Pese al obvio fracaso del programa frenológico, basado en prejuicios y sin el más mínimo fundamento científico, la existencia de cierta modularidad anatómica no puede negarse. Tras el descubrimiento de la neurona por Cajal y de sus trabajos pioneros para la comprensión de la estructura del sistema nervioso, se hizo cada vez más evidente que el cere-

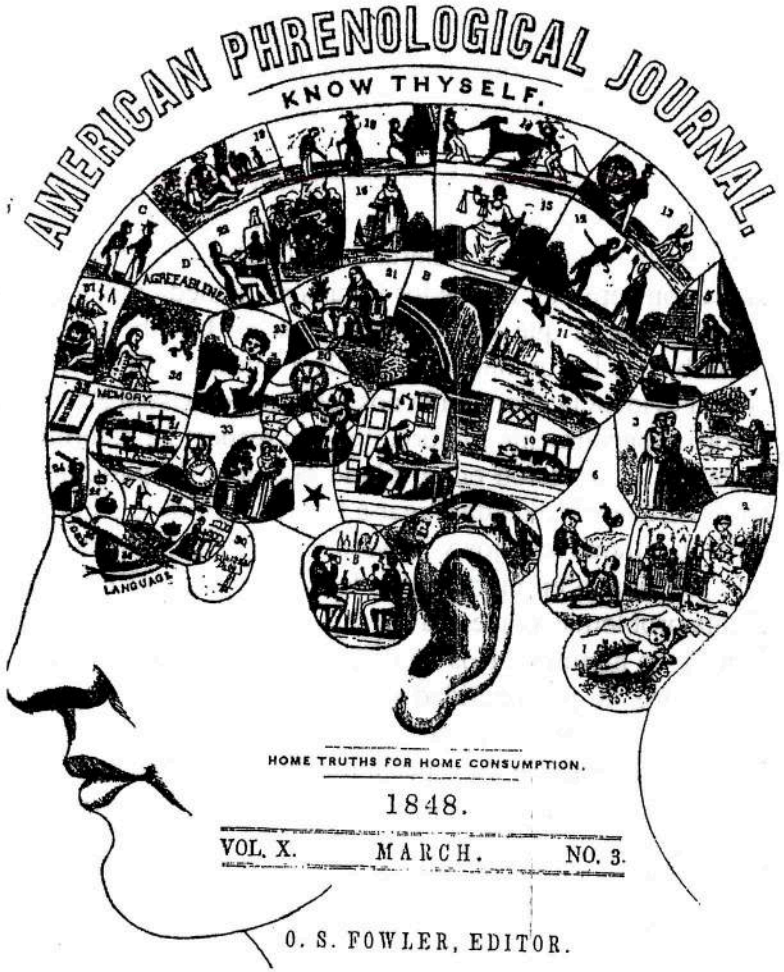


Figura 7.2. Una imagen del cerebro compartimentado, tal y como lo describía la seudociencia de la frenología. Según este punto de vista, áreas muy especiales del cerebro serían responsables de manera única de funciones y propiedades concretas. Portada de una revista de frenología, en su edición de 1848.

bro presenta áreas anatómicamente diferenciadas, tanto por el tipo de neuronas que las forman como por la manera en que éstas se conectan. Dos siglos después de la frenología, es mucho lo que sabemos ahora acerca del cerebro, su estructura y su evolución. Aunque la función cerebral no es separable en partes independientes, no es menos cierto que el largo camino que conduce del cerebro primitivo al complejo cerebro humano está marcado por la invención de nuevas formas de percibir el mundo y procesar información. Lo antiguo y lo nuevo se entremezclan para generar el sistema de computación más complejo que ningún ingeniero pueda soñar. ¿Cómo podemos acercarnos a su comprensión? Uno de los intentos pioneros tuvo lugar hacia 1950, con el desarrollo de los primeros ordenadores.

El cerebro y el ordenador

El cerebro ha sido comparado a lo largo de la historia con diversos sistemas y la evolución de la tecnología ha proporcionado metáforas más o menos acertadas: con una máquina formada por mecanismos, con un telar (el fisiólogo inglés Charles Sherrington lo llamó «el telar mágico») e incluso con la máquina de vapor. Con la aparición del telégrafo y el teléfono, la mente se compara por primera vez con una red de comunicación. No debe sorprendernos si la aparición del primer ordenador generó todo tipo de especulaciones acerca de la posibilidad de que una máquina pudiera pensar. Pero más allá de este problema, sin duda fascinante, los inicios de la computación a gran escala estuvieron relacionados con un problema de gran relevancia relacionado con la enorme fiabilidad de nuestros cerebros. En concreto, es bien sabido que el cerebro experimenta constantes pérdidas de neuronas por diversos motivos. Hay una reducción inevitable que lleva a la muerte celular de las neuronas y que no se ve compensado por los mecanismos de regeneración presentes en otros órganos. De hecho, al nacer poseemos un número de neuronas que nunca más volveremos a superar. Pero además se da el caso de que distintas formas de estrés contribuyen a acelerar el proceso. Una noche de borrachera muy posiblemente matará cientos de miles de neuronas, pero aun así, a la mañana siguiente (después de la resaca) las cosas volverán a estar en orden tarde o temprano, y los pensamientos parecerán tan normales como siempre. Incluso frente a un daño mucho mayor, resultante de un traumatismo, el cerebro suele recomponer su actividad sin mayores consecuencias.

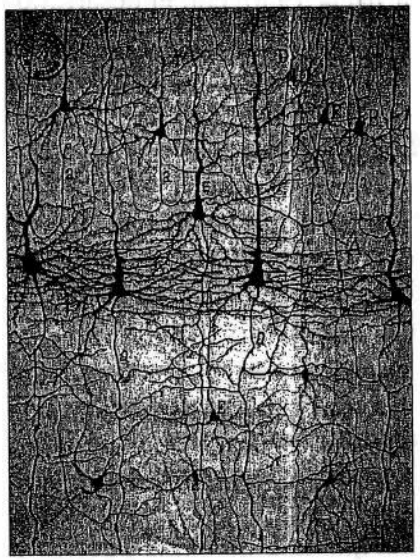
Semejante estabilidad dio mucho que pensar a uno de los genios matemáticos del siglo XX, John von Neumann. Este prodigioso científico, nacido en Hungría y emigrado a Estados Unidos en 1930 como parte del éxodo de los judíos que escapaban del nazismo, se convirtió (junto con Albert Einstein y Kurt Gödel) en uno de los primeros catedráticos del prestigioso Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Hacia 1950, este matemático, junto con un equipo de científicos e ingenieros de primera fila, construyeron uno de los primeros ordenadores de la historia. El llamado ENIAC (el acrónimo inglés de Computador e Integrador Numérico Electrónico) era un aparato de dimensiones enormes (ocupaba una superficie de casi doscientos metros cuadrados) y funcionaba con la tecnología del momento: válvulas de vacío, relés de cristal, resistencias y diodos. Las válvulas (el ENIAC poseía más de diecisiete mil) eran los elementos electrónicos por excelencia y se empleaban en todo tipo de aparatos, entre ellos, televisores y radios (figura 7.3a). Los que puedan recordar estos dispositivos tendrán una imagen vívida de unos tubos que brillaban dentro de aparatos de radio y televisión.

Lo cierto es que ENIAC padecía diversos problemas de mantenimiento. Por un lado, las válvulas fallaban más a menudo de lo deseable, lo que dificultaba o incluso detenía completamente los cálculos. Por otra parte, cada vez que se quería llevar a cabo un nuevo tipo de cálculo, el sistema debía recablearse, lo cual representaba una operación bastante ardua

y que consumía mucho tiempo. ¿Podría de alguna forma, inspirándose en el cerebro humano, diseñarse un ordenador capaz de funcionar correctamente aunque sus elementos fueran poco fiables? Aunque Von Neumann no resolvió esta pregunta, dejó un legado de enorme trascendencia para el desarrollo ulterior de los ordenadores y las ciencias de la computación. Entre otras cosas, debemos a Von Neumann y sus colegas la invención de la arquitectura básica de procesamiento que se halla en todos y cada uno de los ordenadores que empleamos a diario. Paralelamente a estos desarrollos, otros investigadores, entre los que destaca el matemático británico Alan Turing sentaron las bases de la teoría de la computación. Las hazañas intelectuales de Turing no son inferiores a las de Von Neumann, y también reflexionó acerca de las fronteras de lo que podría ser computable.

La pregunta que planteó Von Neumann ocupó su mente durante los últimos años de su vida, antes de que una muerte prematura terminara con estas reflexiones. A los 53 años, le fue diagnosticado un cáncer que sólo le dejaba unos meses de vida por delante. Se dice que el matemático cayó en una profunda depresión: su mente seguía funcionando a la perfección, pero sabía que dejaría de pensar y esa idea lo martirizaba. El cerebro que había contribuido al desarrollo de áreas tan dispares como la mecánica cuántica, la computación, la vida artificial o la teoría de juegos, se iba a apagar de forma inevitable. Por fortuna, antes de apagarse, su mente aún contribuyó a desarrollar ideas pioneras acerca de la naturaleza de la vida y entre otros trabajos dejó un pequeño libro titulado *El ordenador y el cerebro.* En su análisis del problema, Von Neumann partió, por una parte, de la visión del cerebro como un sistema complejo formado por elementos discretos dispuestos en capas. Por otra parte, Von Neumann había pensado mucho en el problema de cómo organizar de forma lógica las operaciones que llevaba a cabo un ordenador y, como muchos otros en su época y posteriormente, planteó el problema como un proceso secuencial en el que la

a



b

Figura 7.3. Sistemas artificiales y naturales de computación. Arriba se muestra parte de un antiguo ordenador, compuesto por válvulas, resistencias, condensadores y los cables de conexión. (Imagen reproducida por cortesía de Paul Borden.) Abajo, un dibujo de neuronas del córtex cerebral realizado por Ramón y Cajal.

información fluye a lo largo de una cadena que la va modificando: los cambios se dan uno tras otro siguiendo una secuencia ordenada. Al fin y al cabo, nuestra forma de pensar acerca de cómo resolver un problema dado es secuencial (primero un paso, luego otro) y ya entonces se sabía que la corteza del cerebro estaba organizada en capas (figura 7.3b). Semejante estructura hacía natural la suposición de que el cerebro procesaría la información siguiendo una secuencia de decisiones que se propagaría a través de las múltiples capas. Al estudiar el problema, intentó establecer de qué forma podría una estructura de este tipo ser capaz de llevar a cabo computaciones y a la vez resistir el efecto de los errores constantes de sus elementos básicos. Supuso que la tolerancia a los errores se debería a la redundancia: si tenemos varias copias idénticas del mismo sistema, un fallo en una copia puede verse compensado por la presencia de otra igual. Ésta sería la idea que aplicaría un ingeniero si quisiera asegurar el funcionamiento de un aparato con partes especialmente sensibles. Con esta hipótesis, lo que descubrió fue que se necesitarían niveles de redundancia extraordinarios para garantizar un funcionamiento razonable del cerebro. Tan altos, de hecho, que resultaban absurdos. Aunque Von Neumann había resuelto el modelo teórico, había fracasado en su explicación de la realidad. Las redes cerebrales, cualquiera que fuera su organización, debían poseer algo distinto a las entrañas de un ordenador. El mismo Von Neumann concluía que «es peligroso identificar el mundo físico (o biológico) real con los modelos construidos para explicarlo. El problema que plantea el impulso nervioso animal es mucho más profundo que el del mecanismo de una máquina calculadora». Alan Turing, que también murió prematuramente en circunstancias trágicas, planteó la posibilidad de crear sistemas de computación basados en el conocimiento del cerebro. En un artículo que pasó inadvertido en su tiempo, Turing hablaba de unas «máquinas desorganizadas» constituidas por elementos conectados al azar, capaces de imitar las redes neuronales reales

y que podrían llevar a cabo operaciones muy complejas. El trabajo de Turing quedó en el olvido hasta que fue rescatado mucho después, cuando un nuevo campo de estudio daba la razón a ambos matemáticos acerca de la importancia de simular el cerebro mediante sistemas artificiales.

Redes neuronales

Aunque hoy en día estamos lejos aún de recrear las funciones del cerebro humano, muchos de los posibles mecanismos de funcionamiento de algunas áreas han podido ser comprendidos en buena medida. Esta comprensión se ha alcanzado tanto desde el análisis de la realidad (mediante el estudio de partes de tejido cerebral mantenidas con vida, técnicas de visualización no invasivas o el análisis de casos clínicos) como desde su simulación por ordenador. A la vez que los neurocientíficos adquirían un conocimiento mejor y más profundo de los sistemas neuronales a distintas escalas, iba surgiendo también toda una disciplina de naturaleza matemática y computacional que intentaba dar sentido a la complejidad neuronal y a sus distintas escalas. Si bien un modelo del cerebro completo está aún lejos de nuestro alcance, sí es posible emular en un ordenador la dinámica de la propagación de un impulso nervioso, el procesamiento de la información visual en el córtex e incluso obtener una intuición profunda acerca de las cuestiones que hemos contemplado más arriba. Para ello, los científicos han planteado formas de simplificar la complejidad de una neurona convirtiéndola en un dispositivo mucho más simple, que técnicamente se denomina «neurona formal». En una neurona real, la estructura de su membrana, el metabolismo implicado en sintetizar y liberar neurotransmisores (las moléculas encargadas de comunicar una señal nerviosa entre dos neuronas) y otros detalles moleculares son ya lo bastante complejos como para desanimar a cualquiera empeñado en reproducir su comportamiento.

En la figura 7.4 (izquierda) vemos una imagen que representa de forma simplificada una neurona real basada en el conocimiento actual acerca de estas células especializadas. Las neuronas poseen una gran complejidad estructural y diversos mecanismos moleculares especiales. Éstos incluyen los llamados *canales iónicos,* que son responsables de la propagación de los impulsos a lo largo de las fibras nerviosas. Asimismo, las señales entre neuronas se propagan normalmente mediante mensajeros químicos, en una zona de contacto especial denominada *sinapsis*. Al llegar un impulso, se pueden liberar sustancias químicas (los neurotransmisores), que se almacenan y procesan dentro de pequeñas vesículas. Estas vesículas son en sí mismas pequeñas máquinas moleculares sofisticadas. Todos estos subsistemas son de hecho fascinantes y complicados. Comprender y, aún más, simular por ordenador el funcionamiento de estas estructuras requiere un esfuerzo computacional enorme. Si deseáramos integrarlas en nuestras simulaciones de la actividad de incluso una sola neurona, sería imposible llevar a cabo ningún estudio útil. Por otra parte, tal y como discutíamos en el capítulo 1, explorar la complejidad requiere aventurarse en territorios difíciles, en los que debemos simplificar de forma adecuada el problema que analizamos, dejando de lado los detalles innecesarios. Empleando esta aproximación, en la que se desestiman la mayoría de los fenómenos que tienen lugar a pequeña escala, podemos comprender lo que ocurre a una escala superior. Éste es de hecho el procedimiento seguido habitualmente. Imaginemos que deseamos entender cómo funciona un circuito electrónico: podríamos tener en cuenta el flujo de electrones a través de la red cristalina e incluso los efectos cuánticos asociados a estas interacciones. Pero no parece que un ingeniero electrónico necesite de esta información para construir o reparar un circuito. Basta con la lógica de los elementos que lo componen y de su diagrama de conexiones para comprender su funcionamiento esencial. Aquí seguiremos también esta aproximación, simplificando y definiendo un modelo de neurona, denominado *neurona formal* (figura 7.4, derecha), en la que supondremos que la respuesta es todo-o-nada: el estado de la neurona es «activo» o «inactivo» sin mayores matices. Supondremos además que los cambios en el estado de la neurona (la decisión de apagarse o activarse y disparar un impulso) depende de la suma de todos los estímulos provenientes de las neuronas que la estimulan. Estos estímulos pueden ser activadores (la neurona que envía la señal intenta activar a la neurona que la recibe) o inhibidores (la señal suprime la actividad). Podemos imaginar todas las entradas a una neurona formal como un conjunto de números positivos y negativos. Si su suma es positiva, domina la activación y la neurona emite una señal nerviosa. En caso contrario, domina la inhibición y la neurona permanece apagada. Así, nuestra neurona se convierte en un interruptor lógico cuyo comportamiento depende de los balances de las señales de entrada. Si nuestra neurona se activa, disparará a su vez una señal que afectará a una o varias neuronas.

Uno de los ejemplos más conocidos de modelo de sistema neuronal es la red de Hopfield. Este modelo lo propuso en 1982 el físico John Hopfield, en un artículo que tuvo un impacto enorme en la comunidad científica. El modelo de Hopfield intenta explicar de forma simple ciertas cuestiones difíciles acerca del funcionamiento de la memoria. Entre otras cosas, proporciona un marco conceptual muy poderoso para acercarnos al problema de la memoria asociativa: nuestra increíble capacidad de extraer información de una percepción incompleta y reconocerla adecuadamente. Esta memoria asociativa se halla constantemente en funcionamiento. Nos permite reconocer la identidad de un individuo al mirar una caricatura, aunque ésta sea sólo una proyección bidimensional de un rostro real o incluso menos, los trazos básicos que definen ese rostro. De estos trazos extraemos la identidad del personaje: de algún modo reconocemos su identidad. Ésta es una hazaña considerable y ningún programa de inteligencia artificial lleva a cabo la tarea de forma tan eficiente. Y sin embar-

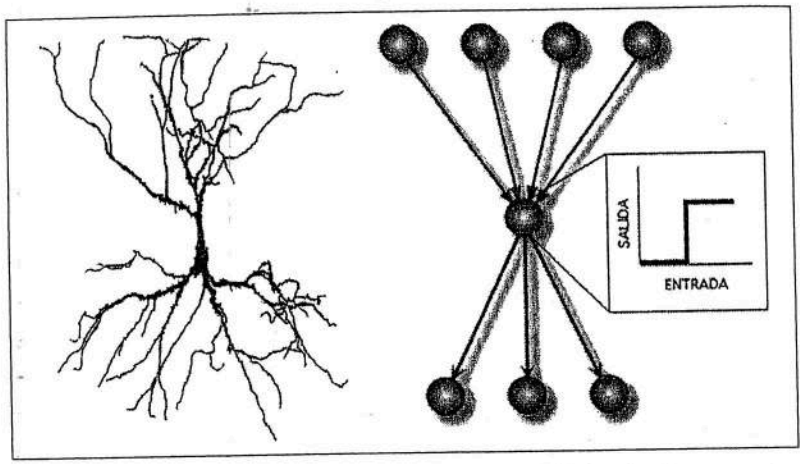


Figura 7.4. Neuronas reales y neuronas formales. A la izquierda se muestra un esquema de la estructura de una neurona típica. A la derecha, una neurona formal ofrece una representación extremadamente simplificada de la realidad, reduciéndola a un sistema binario de entrada-salida. (Dibujos de Ricard Solé.)

go, es una de las habilidades de nuestro cerebro que desarrollamos desde la infancia de forma inconsciente. ¿Cómo podríamos obtener esta propiedad a partir de un mecanismo simple? Esta pregunta obtiene una respuesta sorprendente basada en las ideas de Hopfield.

Para comprender el modelo planteado, en primer lugar debemos definir un elemento esencial: una regla que describa en qué forma los recuerdos pueden crearse y consolidarse. De alguna manera, aquello que nos llega desde el mundo exterior se convierte en parte de nuestros recuerdos gracias a un mecanismo físico de aprendizaje. Hopfield se inspiró para su estudio en la aportación del neurobiólogo Donald Hebb. Hebb postuló la idea de que dos neuronas conectadas entre sí y que experimentan estímulos similares reforzarán su conexión mutua. En el modelo de Hopfield, la conexión entre dos neuronas que se activen simultáneamente aumentará su valor (se hará más intensa), mientras que lo contrario ocurrirá si una de ellas se activa mientras que la segunda se desactiva. En

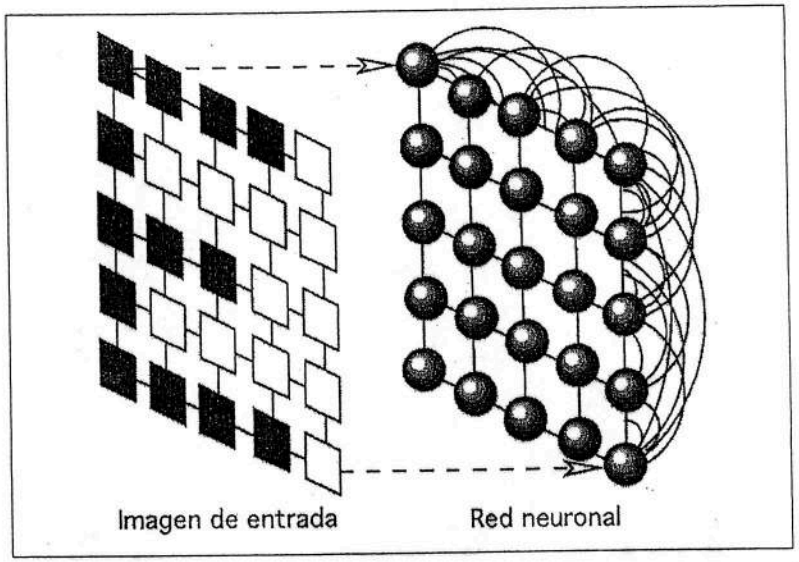


Figura 7.5. En la red neuronal de Hopfield, las neuronas se conectan entre sí de forma global: todas reciben y envían conexiones hacia las demás. Podemos ordenar de forma arbitraria las neuronas de la red (esferas en el dibujo), por ejemplo formando una red plana a modo de retina. (Dibujo de Ricard Solé.)

otras palabras la presencia de correlación entre los estados de dos neuronas determina el cambio en su interacción. Para simplificar las cosas, Hopfield supuso que las neuronas no se conectaban consigo mismas y que todas ellas se hallaban conectadas entre sí (figura 7.5). Esta conectividad masiva es de hecho una buena aproximación a lo que ocurre en muchos lugares de la corteza cerebral. Por último, se supone que las conexiones entre dos neuronas son simétricas: si A envía una señal a B, entonces B envía la misma a A. Mediante estas hipótesis, empleando la definición de neurona simplificada y la regla de Hebb, Hopfield demostró que la red resultante poseía memoria asociativa y que sus posibilidades excedían lo que podríamos pensar a primera vista. Así, después de aprender cierto número de imágenes, podemos comprobar que los «recuerdos» de la red (el conjunto de imágenes) pueden ser correctamente recordados aunque se presenten de manera in-

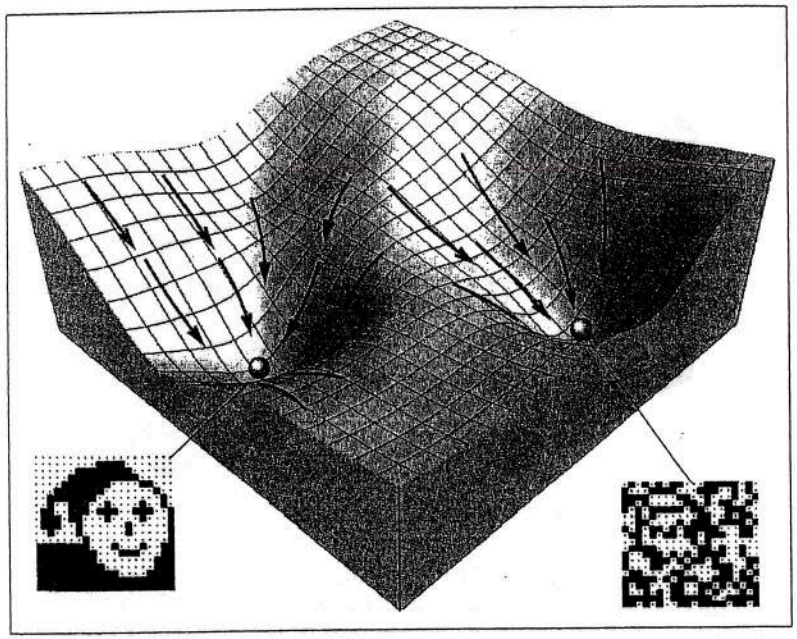


Figura 7.6. Memorias como atractores de la red de Hopfield. Podemos imaginar el espacio de memorias como una superficie que posee valles. Al fondo de cada valle «reside» una de las memorias almacenadas. Por simplicidad se muestran únicamente dos valles y se indican dos imágenes almacenadas por la red. El comportamiento de la red puede también imaginarse como un flujo a través de este espacio. Los flujos terminan en alguna de las memorias existentes, como una bola que rodara hacia el fondo del valle. (Dibujo de Ricard Solé.)

completa. Si el espacio de todas las posibles memorias que la red podría almacenar lo imaginamos como una superficie, lo que las reglas anteriores hacen es generar depresiones en esta superficie en el fondo de las cuales se encuentran las memorias almacenadas. Un fragmento de esta superficie se muestra en la figura 7.6, en la que sólo dos imágenes se indican como las posiciones mínimas de sus valles respectivos.

El estado de la red (cualquier configuración de neuronas encendidas o apagadas) sería un punto de la superficie y la dinámica que hemos descrito antes hace que la red se deslice hacia abajo como una bola que rueda en un valle. Si el estado

no se encuentra demasiado alejado de aquel que define la imagen almacenada, la red «rodará» en la dirección adecuada. Ésta es la base para la presencia de memoria asociativa en el modelo de Hopfield. En la figura 7.7 vemos dos ejemplos. Si partimos de un estado en el que la red recibe sólo parte de la imagen (A) o bien una distorsión al azar de ésta (D), veremos que, a medida que pasa el tiempo (de izquierda a derecha), se va recuperando la información hasta alcanzar la imagen completa, que corresponde con el «recuerdo» correcto. La telaraña de conexiones es capaz de resolver el problema explotando el paralelismo masivo: no existe una secuencia programada de reglas que seguir. Al igual que el cerebro, la red neuronal lleva a cabo su reconocimiento de imagen mediante el intercambio de información constante entre distintas partes del sistema, sin control central ni cadenas lineales de cambios. Por otra parte, si los cambios en la imagen inicial fueran excesivos, podría ocurrir, y ocurrirá, que el sistema termine rodando en la dirección equivocada, llegando tal vez a identificar la memoria presentada como el estado M. Este resultado es perfectamente coherente con nuestra propia limitación cuando intentamos reconocer una información ambigua: en ocasiones, la clasificamos de manera incorrecta.

El modelo de Hopfield posee otra propiedad muy importante: es poco sensible a la pérdida de parte de la red. Se puede demostrar que, si eliminamos conexiones en la red de forma gradual, ésta sigue funcionando sin problemas, hasta alcanzar un umbral crítico. Sólo entonces, cuando se ha perdido un gran número de relaciones entre neuronas, se produce la catástrofe. La red neuronal confunde entre sí distintos recuerdos o es simplemente incapaz de recordar. Como ocurre con algunas patologías degenerativas del cerebro, somos capaces de mantener nuestro intelecto a salvo sin mayores dificultades hasta que el sistema no puede ya compensar la pérdida. Tal vez ésta sea parte de la respuesta a la búsqueda de von Neumann. El cerebro es una red inmensa en constante actividad, que procesa informaciones de distintos tipos manejando señales de distintas

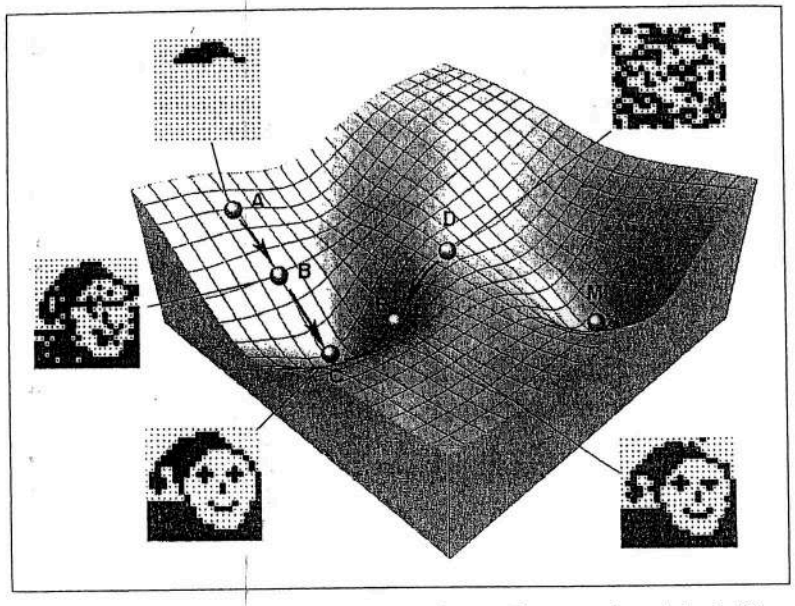


Figura 7.7. Reconocimiento de imágenes incompletas en el modelo de Hopfield. Cuando se muestra a la red una parte (A) o una distorsión (D) de la imagen almacenada, la dinámica de las interacciones entre neuronas formales es capaz de restaurar la imagen correcta al completo. Si imaginamos el proceso como la bola que rueda por la superficie, tendremos distintas trayectorias en función del estado por el que empezamos. Decimos entonces que la red «recuerda» empleando memoria asociativa. (Dibujo de Ricard Solé.)

zonas y sometida a múltiples fuentes de error y ambigüedad. Lo hace empleando un paralelismo masivo y a pesar de la muerte celular que sucede constantemente en todas partes.

El mundo pequeño de la mente

La enorme eficiencia del cerebro como sistema de procesamiento de información es excepcional, como lo es su grado de optimización. Diversos estudios revelan con claridad que el cableado del cerebro está altamente optimizado para reducir costes. Dado que el cerebro, a pesar de representar sólo un 2 % del peso total del organismo, consume (en humanos)

alrededor del 20 % de la energía, parece lógico que la evolución de la circuitería cerebral haya ido paralela a la reducción de los costes. En este sentido, el cerebro presenta todas las propiedades de un sistema óptimo. Pero a diferencia de un ordenador, y tal y como discutíamos al principio, el cerebro resulta ser un sistema poco dado a los fallos. No es un ordenador paralelo típico: una gran cantidad de neuronas pueden perderse en una zona concreta sin que ello tenga grandes consecuencias. Los ejemplos son muy numerosos. Tomemos por ejemplo la enfermedad de Parkinson. Esta dolencia tiene su origen en la destrucción de las neuronas de una región particular del cerebro, la llamada *sustancia negra*. Estas neuronas son las responsables de la producción de un neurotransmisor clave para la actividad cerebral: la dopamina. Esta molécula se requiere para la correcta transmisión de los impulsos nerviosos asociados a la producción y regulación de la actividad muscular. Su reducción por debajo de ciertos niveles provoca deficiencias en esta actividad, con el resultado de temblores que van en aumento hasta volverse incontrolados. Su caída a niveles muy bajos da lugar a un fenómeno opuesto: un estado de aparente congelación que lleva a los que lo padecen a asemejarse a estatuas, tal como el neurólogo Oliver Sacks narró magistralmente en su libro *Despertares*. La muerte de algunas neuronas de la sustancia negra no produce cambios perceptibles, como ocurre con otras pérdidas en otras áreas cerebrales. Sólo cuando se ha superado el 50 % de neuronas perdidas, el parkinson comienza a manifestarse y acelera su curso.

Éste es un buen ejemplo de la robustez del cerebro frente a la pérdida de su integridad neuronal. ¿Cómo se refleja esta propiedad en la red? Los mapas de la conectividad cerebral están lejos de encontrarse completados, pero los cartógrafos de la mente han podido llegar lo bastante lejos como para que dispongamos de una imagen razonablemente buena del mapa de conexiones. Una forma de trazar los planos es llevar a cabo experimentos de estimulación en distintas zonas de la

corteza cerebral y observar qué otras zonas resultan inmediatamente activadas. De este modo, podemos establecer qué partes de la corteza se conectan con otras. Estos mapas han sido obtenidos por distintos investigadores a lo largo de décadas de estudios. Empleando distintos tipos de vertebrados, en especial monos y gatos, las redes reconstruidas son lo bastante detalladas y fiables. ¿Qué se observa? El mapa cortical resultante nos da una buena idea de la complejidad y arquitectura de la red cerebral. En la figura 7.8 vemos dos ejemplos de las estructuras encontradas. La figura superior nos da un mapa plano de las relaciones, en el que colocamos la lista de áreas ordenadas horizontal y verticalmente, marcando con un cuadrado negro aquellos pares de áreas que están conectadas entre sí. La lista está ordenada de forma que permite detectar estructuras en caso de que las haya. Podemos ver que surgen unos bloques que nos indican la presencia de áreas cuyos elementos se hallan especialmente conectados entre sí. Pero estos módulos no son cajas separadas, como podríamos esperar si las funciones cerebrales fueran llevadas a cabo por compartimentos cerrados. Al contrario. Vemos que las cajas están conectadas entre sí, como podemos también apreciar en la figura correspondiente al cerebro de primate.

¿Son estas redes mundos pequeños? Así es. En primer lugar, nos encontramos con un gran número de triángulos, que en el cerebro aparecen formando grupos de áreas cercanas conectadas entre sí. Estos grupos se corresponden bien con zonas de la corteza implicadas en tareas concretas y confirman la presencia de organización modular. Por otra parte, la distancia media entre dos zonas dadas es muy reducida, de alrededor de tres grados de separación. Estas redes no son libres de escala, y por lo tanto no existen áreas muy interconectadas (no hay *hubs* corticales), pero la sociedad de las neuronas (al menos a gran escala) es un mundo pequeño. Esta observación tiene mucho sentido, puesto que un adecuado funcionamiento del cerebro requiere tres elementos básicos que garanticen su rendimiento perfecto. Por un lado, tene-

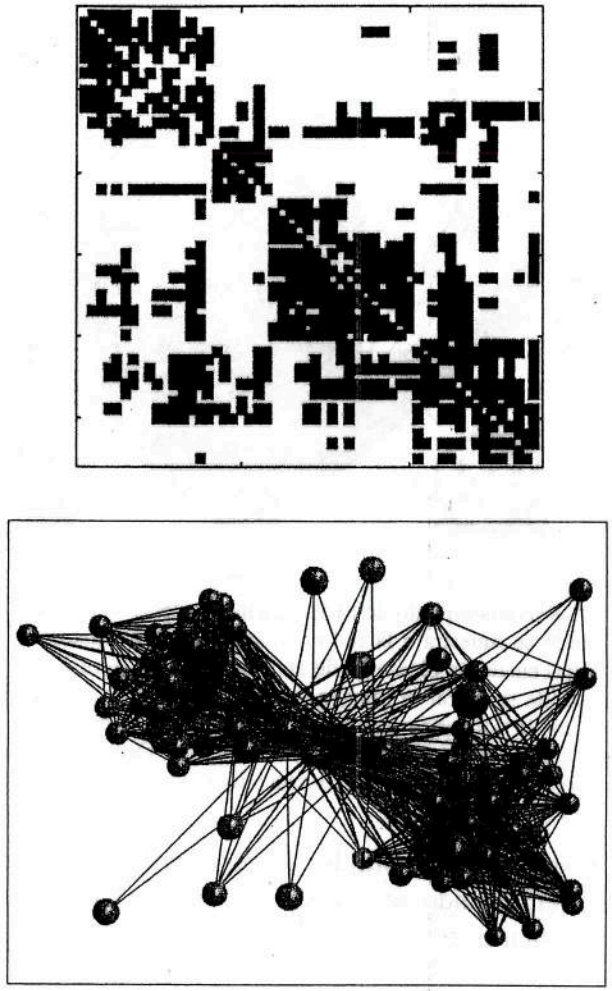


Figura 7.8. Redes corticales: arriba se muestra una tabla de relaciones entre distintas áreas del córtex cerebral del gato, en la que se consideran 55 áreas en total. Cada cuadrado negro indica que dos áreas se hallan conectadas, mientras las zonas blancas denotan ausencia de conexión. Abajo se muestra el cerebro de un macaco con la red correspondiente. (Dibujos de Ricard Solé, basados en Kaiser, 2006.)

mos la optimización del número de conexiones. Por otro, la modularidad intrínseca del córtex cerebral, que garantiza la especialización parcial de distintas zonas. Finalmente, dado que los módulos nunca son independientes y distintas facetas de una imagen o idea se procesan a distintos niveles, es deseable una adecuada conectividad cortical que ayude a este procesamiento paralelo. El mundo pequeño es una solución más que natural: hace que las distancias entre regiones cerebrales sean muy cortas y permite mantener sin más problemas la estructura local de las conexiones. De hecho, estudios realizados sobre el cerebro de pacientes con enfermedades degenerativas indican con claridad la pérdida del mundo pequeño (figura 7.9). La distancia entre zonas se hace cada vez mayor, con lo que la capacidad de integrar de forma coherente y responder con rapidez se va perdiendo progresivamente.

Las implicaciones de este resultado son importantes para comprender algunas propiedades del cerebro como sistema dinámico. Existe el problema de la coherencia: la dinámica de la corteza cerebral depende de la propagación de la actividad de grupos de neuronas en forma de ondas de frecuencias bien definidas. Estas ondas garantizan la sincronización de áreas de la corteza de forma que distintas partes del cerebro asociadas a distintas tareas complementarias actúen al unísono. Pero existe un riesgo si la sincronización es excesiva: cuando la coherencia abarca grandes áreas, el cerebro se ordena demasiado y surge el estado patológico. Los ataques epilépticos son precisamente el resultado de esta coherencia, cuando amplias zonas de la corteza disparan ráfagas sincronizadas afectando a zonas ligadas al control de la actividad motora. Al activarse, generan impulsos que afectan a distintas partes del cuerpo dando lugar a espasmos incontrolados. Así pues, el cerebro debe ser lo bastante coherente como para poder comunicar distintas zonas de forma ordenada pero no demasiado, de forma que esta coherencia escape al control. El diseño modular con estructura jerárquica parece proporcio-

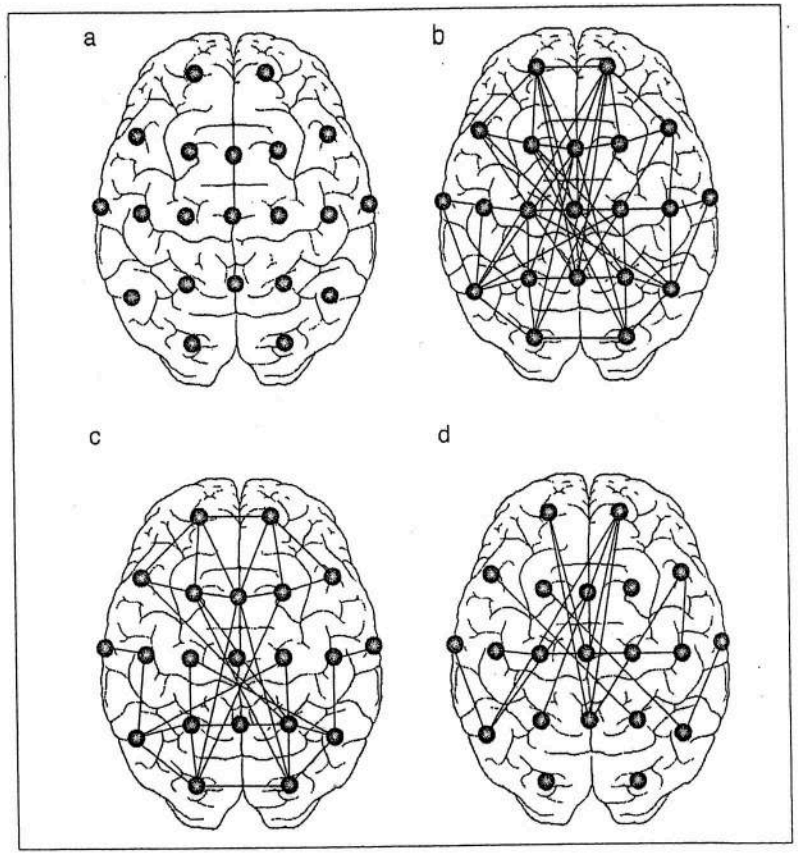


Figura 7.9. El análisis de las alteraciones de la actividad cerebral en pacientes con alzheimer revela cómo el mundo pequeño que conectaba con eficiencia distintas áreas corticales termina por desaparecer. En (a) se indican distintos puntos de medida sobre el cráneo y en (b) la red de interacciones entre estas áreas, medida experimentalmente. En (c) vemos la red correspondiente a los efectos del alzheimer avanzado, mientras que (d) indica las diferencias relativas entre las redes normal y patológica. Se observa que un gran número de conexiones se han perdido. (Dibujos de Ricard Solé.)

nar la solución al problema. Para estudiar si éste es el caso, los físicos Markus Kaiser y Klaus Hilgetag consideraron el problema desde un punto de vista teórico. Imaginemos que diseñáramos una red formada por grupos de neuronas conectadas entre sí formando módulos idénticos. Supongamos que

estos módulos están a su vez relacionados entre sí por cierto número de conexiones. El grado de conectividad entre módulos puede ser mayor o menor, como se muestra en la figura 7.10. El estudio reveló que una estructura modular con el grado adecuado de interconexión proporcionaba de forma automática un sistema de sincronización de la actividad que resolvía el problema de la excesiva coherencia a la vez que garantizaba el funcionamiento coordinado de distintas partes. El telar mágico se hallaría así adecuadamente conectado para obtener el balance necesario entre ambas necesidades. Este balance es además estable frente a multitud de errores posibles y pérdidas neuronales. Sólo cuando los límites tolerados se sobrepasan, debido a daños excesivos o a un accidente, observaremos problemas de funcionamiento.

Entre el orden y el caos

Hemos visto que la sociedad de las neuronas es un mundo pequeño. El cerebro ha optimizado el coste de las conexiones neuronales, y lo ha hecho de manera considerable. Por otra parte, el cerebro es un sistema enormemente dinámico. No debemos olvidar que nuestra mente no se detiene ni siquiera al dormir, cuando entra en esa extraña fase de actividad en la que habitan los sueños. En todo momento del día, ondas de actividad se están constantemente propagando por el córtex, sincronizando distintas áreas. Sin ser conscientes de ello, nuestra mente procesa y filtra enormes cantidades de información, que debe también limitar para no experimentar un completo colapso. El cerebro, como ejemplo más complejo de un sistema que lleva a cabo computaciones, debe ser capaz de mantener y crear orden (en particular, en forma de recuerdos), y a su vez debe también ser enormemente flexible, para poder adaptarse al mundo externo y sus cambios. En 1990 Chris Langton, entonces en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México, propuso una idea contro-

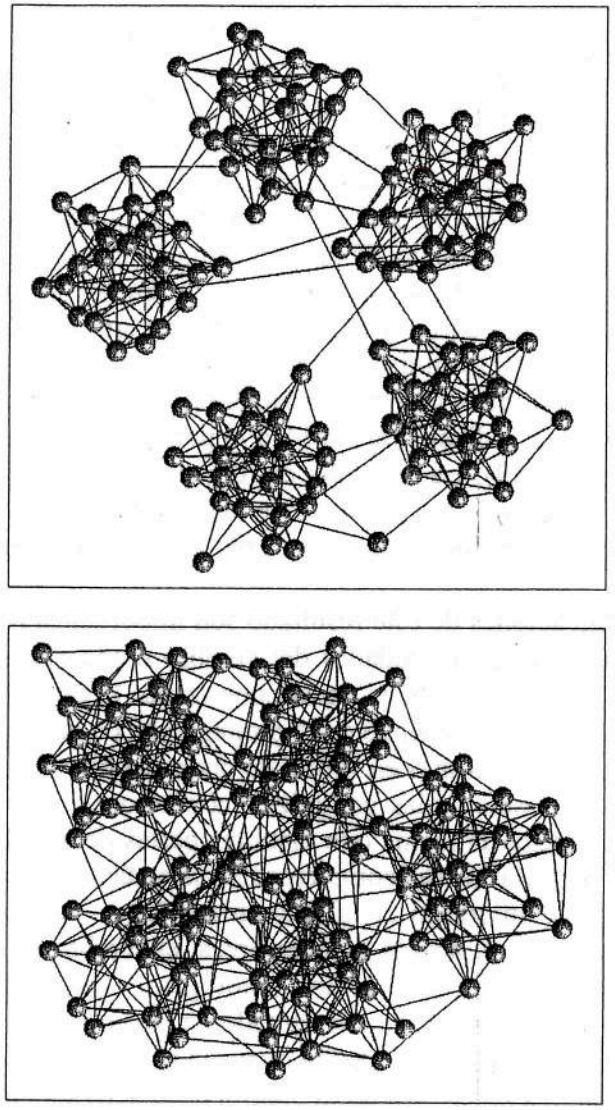


Figura 7.10. Podemos obtener con facilidad una red modular conectando entre sí distintas subredes más densas. En este ejemplo, cuatro grafos de alta conectividad se han relacionado entre sí mediante un pequeño número de conexiones (arriba) o un alto número de éstas (abajo). Aunque el segundo propagará mejor las señales, también puede hacerlo en exceso. (Dibujos de Ricard Solé.)

vertida que tuvo un gran impacto en nuestra visión de la complejidad. Langton sugirió que los sistemas naturales podrían llevar a cabo sus funciones gracias a un balance entre orden y desorden. Su propuesta era que, para computar, la naturaleza elegiría lo que llamó «la frontera del caos», un lugar bien definido que separaría el comportamiento ordenado y predecible de la dinámica impredecible que denominamos caos. El orden sería necesario para preservar la información y permitir almacenarla. Pero para poder cambiar y adaptarse al ambiente, es necesaria una plasticidad que requiere que el sistema posea cierto grado de inestabilidad interna. El físico argentino Dante Chialvo ha estudiado esta cuestión en detalle. Chialvo conjetura que el cerebro humano podría encontrarse en lo que se ha llamado un *estado crítico autoorganizado*. Esta idea tiene su origen en el trabajo del físico danés Per Bak, que propuso la idea de que este estado especial se daba espontáneamente en distintos tipos de sistemas complejos, entre ellos los sistemas sociales y económicos.

La idea de Per Bak se ilustra mediante el comportamiento de un montón de arena. Cuando dejamos caer lentamente granos de arena sobre una mesa, éstos al principio simplemente ruedan hasta detenerse. Pero a medida que añadimos arena también generamos una pequeña montaña que crece hasta alcanzar un estado especial en el que su pendiente ya no puede seguir creciendo. Esta pendiente crítica es inevitable, dado que cualquier intento de forzar al montón de arena a poseer un ángulo mayor (lo cual resultaría notablemente difícil) rápidamente conduce a su colapso. Lo más interesante es que, una vez alcanzado el estado crítico, la caída de un grano de arena genera avalanchas que arrastran otros granos. La mayoría de las veces, sólo un grano bajará rodando hasta la base. Será menos frecuente que caigan dos. Menos aún tres y así sucesivamente. Pero si esperamos lo suficiente, tendrá lugar una avalancha de gran tamaño. Esta avalancha puede implicar miles de granos de arena, y su tamaño sólo está limitado por el tamaño del sistema. Aunque esta metáfora pue-

de parecer inapropiada para describir el cerebro, Chialvo ha sugerido que la dinámica de éste y también la de sistemas neuronales experimentales apuntan claramente en esta dirección. En este sentido, estudios basados en la actividad de cultivos celulares de neuronas, llevados a cabo por Dietmar Plentz y sus colaboradores, parecen indicar que éstas se comportan de la misma manera. Las neuronas en un tejido pueden disparar espontáneamente de vez en cuando y su activación puede a su vez activar otras neuronas, siempre que éstas permitan dicha propagación. Ello no siempre es posible, debido a un efecto característico de ese tipo de células: si han sido activadas recientemente, presentan un retardo temporal (el llamado *periodo refractario)*, durante el cual no pueden volver a activarse. Las redes neuronales podrían tener una respuesta débil que hiciera la propagación difícil, con lo que su estado sería muy estable y de baja actividad. Dicho comportamiento se denomina también *subcrítico*. Podría ocurrir también que cada vez que una neurona se activara, su activación diera lugar a una onda rápida que alcanzara todo el sistema, como un incendio. Este estado sería *supercrítico:* cualquier mínima perturbación haría responder al sistema siempre de forma muy intensa. En el estado crítico, en el punto de transición entre estabilidad e inestabilidad, el sistema responderá en general de forma controlada y con límites pero también con la mayor flexibilidad posible. Como señala Chialvo, tal vez nuestro cerebro habite esa zona intermedia, a mitad de camino entre orden y desorden. La frontera en la que los sueños surgen de la materia y donde la materia intenta explicar sus sueños.

8
Retorno a Babel

> Las palabras surgen a raudales como una lluvia infinita en un vaso de papel. Se deslizan al pasar. Desaparecen a través del universo.
>
> The Beatles, *Across the Universe*

> Soy prisionera / de palabras nunca pronunciadas, / como sentimientos solitarios / encerrados dentro de mi cabeza.
>
> Alicia Keys, «P.O.W.»

> Si he perdido la vida, el tiempo, / todo lo tiré como un anillo al agua. / Si he perdido la voz en la maleza, / me queda la palabra.
>
> Blas de Otero, «En el principio»

Palabras, palabras, palabras

Nadie es capaz de imaginar la vastedad de nuestro universo. Podemos intuir hasta cierto punto la grandeza de nuestro planeta, pero incluso la distancia que nos separa de nuestro Sol resulta abrumadora: ocho minutos luz (suena a poco) o unos 150 millones de kilómetros. Y nuestra estrella local es una pequeña luz en mitad de cien mil millones de soles que giran en torno al centro de nuestra galaxia, que es a su vez tan sólo un punto brillante en mitad del océano cósmico. Cualquier cálculo que hagamos acerca del número de estrellas o átomos de cualquier parte del universo dará cifras extraordinarias. Tan sólo considerando los objetos de mayor tamaño, se estima que podrán existir alrededor de 125.000 millones de galaxias en

nuestro universo. Jamás podremos explorar ni siquiera una ínfima parte de este cosmos brutalmente inmenso. Contemplar el cielo nocturno en una noche clara con semejante visión produce una sensación de vértigo: en todas direcciones, detrás del telón de las sombras, se extienden materia y energía en formas que los físicos saben calcular pero cuya naturaleza parece propia de un relato de ficción. Hay lugares habitados por objetos supermasivos que no dejan escapar la luz. Galaxias en colisión cuyas estrellas, muchas de ellas tal vez habitadas por criaturas inteligentes, son lanzadas con violencia en todas direcciones. Hay soles que se hunden sobre sí mismos para estallar después en una explosión que libera al espacio miles de millones de toneladas de materia, diciendo así adiós al escenario oscuro en el que han quemado su combustible nuclear durante miles de millones de años. Hay, quizás, civilizaciones que también miran al espacio y que tal vez nos estén enviando algún mensaje. El cosmos, como dijo Carl Sagan, «es todo lo que es, todo lo que fue y todo lo que será».

Y sin embargo, existe algo que casi iguala a esta inmensidad, aunque está tan cercano a nosotros que apenas somos conscientes de su existencia. Lo empleamos constantemente y nos hace esencialmente distintos del resto de seres vivos. Nos permite pensar de forma simbólica y comunicar ideas con una eficiencia extraordinaria. Se trata del lenguaje, una de las grandes transiciones en la historia de la vida, el punto de inflexión de la evolución humana que permitió la creación de sociedades complejas y el desarrollo del pensamiento abstracto. El lenguaje humano es además un sistema que permite formas de evolución rápidas que no requieren la selección natural actuando sobre el material genético. Es un sistema de enorme singularidad: los individuos lo conocen y lo emplean pero también lo propagan, de forma que el aprendizaje de los niños forma parte del proceso. De hecho, tal y como hizo notar Darwin, los humanos no hablan un lenguaje a menos que alguien les enseñe. La potencia y dimensiones casi cósmicas del lenguaje residen en su capacidad de generación infinita,

basada en la recursividad. Esa propiedad implica la capacidad de generar estructuras gramaticalmente correctas y de complejidad arbitraria mediante la inserción de nuevas palabras o frases en el interior de una frase cualquiera. Partiendo de una frase como «Llegué a la ciudad a principios de enero» podemos complicarla de infinitas formas: «Llegué de improviso a la ciudad a principios de un frío mes de enero» o «Aunque no esperaba nada, llegué a la ciudad, como siempre desierta, a principios de enero». Algo así como manejar conjuntos de muñecas rusas que podemos encajar de infinitas formas.

Si dejamos de lado por un momento la recursividad, podemos hacernos una idea del poder de la combinatoria de este sistema si consideramos la siguiente situación. Supongamos que una letra es un dado. En un idioma estándar el número de letras que posee el alfabeto es de unas decenas. Nuestros dados ocuparán un pequeño volumen, algo así como una taza de café. Ahora, imaginemos que combinamos estas letras en forma de sílabas. El conjunto de posibles pares o tríos de letras que podemos generar es ya considerable: si partimos de unas 25 letras, tendremos $25 \times 25 = 625$ posibles pares y $25 \times 25 \times 25 = 15.625$ posibles tríos. Por supuesto que en un lenguaje real no todas las combinaciones se admiten (ni mucho menos). No esperamos encontrar, por ejemplo, secuencias de consonantes como «jxs». A estas anomalías se une un factor mucho más importante: la presencia de limitaciones impuestas por la fonética. Hay sílabas y combinaciones de sílabas más fáciles de pronunciar que otras. Así por ejemplo, es muy corriente una combinación de vocales y consonantes dentro de cada sílaba. En cualquier caso, aunque excluyamos algunas combinaciones absurdas, tendremos dados suficientes para llenar una caja de zapatos o algo mayor. Pero ¿qué ocurre cuando nos movemos al nivel de las palabras? ¿Cuántas combinaciones podemos llevar a cabo? En este caso, podemos imaginar las palabras como combinaciones de sílabas. Aquí las cosas empiezan a dispararse. En lugar de pensar en términos matemáticos, tomemos simplemente un diccionario

de vocablos y veamos cuántas entradas tiene. El Oxford English Dictionary nos define más de 300.000 palabras distintas y muchas otras lenguas nos darán valores de diversidad parecidos. Por supuesto que en nuestra vida cotidiana no empleamos una colección de palabras tan grande (y de hecho sólo conocemos el significado de parte de ellas), pero la diversidad total nos permite estimar el grado de complejidad que sostiene la sociedad como un todo, contando tanto los términos comunes como los tecnicismos. Nuestra caja con dados es ahora muy grande: 300.000 dados ocuparían algo así como un metro cúbico de volumen. Hasta ahora, las combinaciones de elementos nos dan un conjunto cada vez mayor —pero manejable— de estructuras. ¿Qué ocurre al combinar palabras?

Cuando nuestros antepasados comenzaron a emplear un repertorio de palabras lo bastante rico, podían referirse a objetos o acciones con un gran abanico de posibilidades. Los nombres de cosas, animales o fenómenos naturales dominarían sin duda el universo del lenguaje. Y éste no es un atributo exclusivamente humano: en diversas especies animales, entre las que figuran primates, cetáceos y algunas aves, y particularmente en individuos que han sido adiestrados desde jóvenes, encontramos ejemplos extraordinarios de dominio de un léxico muy rico. Pero el paso fundamental fue la capacidad de combinar palabras entre sí mediante la recursividad. Y no sólo pares de palabras, sino combinaciones sofisticadas capaces de expresar ideas, intenciones o sentimientos complejos. Podemos obtener una estimación aproximada si suponemos que las frases tienen una longitud media de, digamos, unas seis palabras. Teniendo en cuenta que en la mayoría de lenguajes, sus hablantes emplean unas cinco mil palabras básicas, si las palabras pudieran combinarse entre sí de todas las formas posibles, el número de frases posibles sería del orden de seis elevado a cinco mil, que nos daría unos 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 de frases. Más de las que desde luego nunca han sido o serán pronunciadas por todos los seres humanos que han vivido y muerto en nuestro planeta. Y aunque una buena parte de este universo está presente en el universo digital (como el lector puede comprobar buscando frases al azar en Internet), es sólo una fracción ridícula de lo posible. Las combinaciones posibles han estallado y ni el universo entero es suficiente para almacenar nuestros dados. Y nada puede ya detenernos: ¿qué infinitas historias podemos contar? ¿Cuántos libros podrían escribirse? El lenguaje es todo lo que se ha escrito, lo que se escribe y se escribirá.

El experimento mental anterior es un juego con ciertas limitaciones, dado que sabemos que muchas de las frases posibles serán, en realidad, incorrectas. Lo más importante del lenguaje (y una vez más, de la propia naturaleza de la complejidad) es de hecho la existencia de reglas de combinación entre palabras. Al comunicarnos, no sólo combinamos elementos de nuestro repertorio, sino que la forma en que los combinamos sigue reglas de construcción muy claras. Sin esas reglas, el resultado serían cadenas de palabras sin ningún sentido. Nos ocurriría lo que a Gulliver en uno de sus viajes, visitando la Academia de Lagado, en el continente de Balnibarbi. Un profesor de la Academia había inventado una máquina capaz de generar volúmenes enteros de combinaciones de palabras que podrían así escribir todas las obras (imaginables) de ciencia y arte. La máquina, impulsada por los esfuerzos de varias personas que movían unas manivelas, no paraba de llenar hojas de textos. El buen hombre, frente a sus libros llenos de frases inconexas, argumentaba que se requeriría algo de tiempo para extraer de aquellas frases las citadas obras cumbre del conocimiento. Aunque esta historia nos parezca cómica, la posibilidad de crear un sistema generador de un lenguaje ha desencadenado una búsqueda que se ha repetido una y otra vez a lo largo de la historia. El mallorquín Ramon Llull, por ejemplo, dedicó grandes esfuerzos a la búsqueda de un «lenguaje perfecto» que sirviera entre otras cosas para convertir a los infieles. Aunque parece claro que fracasó en su intento, Llull planteó la construcción de un sistema (una especie de máquina lógica) que permitía combinar conjuntos

de palabras situadas en distintos niveles y construir con éstas todo un abanico de frases, preguntas y respuestas. Aunque su aproximación no estaba exenta de problemas, el intento de Llull de crear una máquina capaz de decidir la verdad o falsedad de una proposición fue realmente visionario.

No es sorprendente que el origen del lenguaje humano constituya uno de los mayores problemas del estudio de la evolución (figura 8.1). Su emergencia tuvo que influir enormemente en el curso de los cambios que definieron nuestro éxito abrumador como especie y tal vez subyace a la aparición de la conciencia. Pero el lenguaje es también singular como objeto de estudio del pasado, dado que no deja fósiles. Sabemos muchas cosas acerca de la dieta de los homínidos estudiando las marcas dejadas por los alimentos en los dientes. Podemos situar la aparición de la mente abstracta gracias a la presencia de enterramientos rituales en las cuevas que habitaban nuestros antepasados. Disponemos de un registro excepcional de los cambios en la tecnología y su propagación gracias a las herramientas de piedra abandonadas por doquier. Pero sólo podemos especular acerca del origen del lenguaje y de sus posibles cambios empleando evidencias indirectas. Pese a todo, y tal como nos dice el antropólogo Derek Bickerton: «Nada ocurre en el mundo sin dejar alguna traza de sí mismo, por sutil o indirecta que sea. A menudo, la única evidencia posible acerca del acontecimiento pasado se percibe en las ondas que se propagaron a partir del mismo y que aún se perciben en la actualidad». Algo parecido tal vez a los ecos que ha dejado la gran explosión que generó nuestro universo y que hoy podemos medir con precisión. Aunque no es posible (por ahora) repetir el experimento creando un nuevo universo, la información que los astrofísicos obtienen de la radiación que nos llega de todas partes del cosmos, junto con las teorías físicas disponibles en la actualidad, nos permiten retroceder con fiabilidad a los inicios del universo primitivo.

Las evidencias sobre los posibles orígenes del lenguaje provienen de distintos frentes. Por un lado, el conocimiento

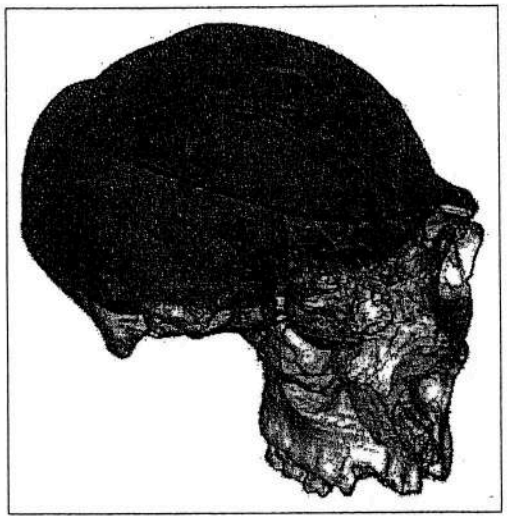


Figura 8.1. El lenguaje no deja fósiles, así que las evidencias acerca de su evolución requieren pruebas indirectas. Una de ellas es el examen de los moldes de los cerebros de nuestros antepasados homínidos (en la ilustración se muestra el cráneo de un ejemplar de Neandertal con su molde cerebral). La preservación en la superficie interna del cráneo de la forma de las circunvoluciones cerebrales y los vasos que las regaban permite hacer conjeturas acerca del desarrollo y evolución de zonas especiales, entre ellas, las que posiblemente están asociadas al lenguaje. (Dibujo adaptado de Bruner, 2003.)

del cerebro humano y de su organización anatómica permite sugerir que el lenguaje estaría más desarrollado en ciertos momentos de la evolución. Estas evidencias provienen del estudio de los moldes del interior del cráneo de ejemplares fósiles. Por ejemplo, la zona de la corteza cerebral asociada al área de Broca, en el hemisferio izquierdo del cerebro (véase capítulo anterior), parece hallarse más desarrollada en algunos estadios de la evolución humana. Este mayor desarrollo se percibe tanto en las dimensiones de la zona implicada como especialmente en la mayor presencia de vasos sanguíneos, que es un indicador indirecto de su importancia relativa. Por otra parte, los cambios en la calidad y complejidad de las herramientas de piedra sugieren a su vez la posibilidad de cambios en la complejidad cognitiva de sus creadores.

Estas evidencias son sin duda poderosas y su carácter indirecto no empaña su capacidad de proporcionarnos claves acerca de los orígenes del lenguaje. Pero tal vez no sean las únicas. En nuestra búsqueda de los orígenes poseemos además tres ventanas excepcionales que no se hallan en el interior de los cráneos de homínidos ni en la complejidad de sus herramientas. La primera es el estudio del lenguaje animal, que nos permite analizar las posibles formas de comunicación primitiva que pueden (o no) estar relacionadas con los orígenes del lenguaje complejo. La segunda, a la que prestaremos nuestra atención más adelante, es un fenómeno de evolución del lenguaje que tiene lugar a una escala pequeña pero no por ello menos excepcional: su emergencia en la mente de los niños que lo aprenden. Antes de estudiar este proceso fascinante desde la visión de las redes, consideraremos otra de nuestras grandes capacidades: la de asociar entre sí palabras mediante relaciones muy diversas que «conectan» las palabras a través de su significado.

Relaciones

Una habilidad sorprendente de los seres humanos es su rápida capacidad para asociar palabras entre sí. Estas asociaciones pueden ser de distinta naturaleza: dada la palabra «blanco» somos capaces de encontrar rápidamente su opuesta (negro), una que rime (manco), a qué clase pertenece (color), el nombre de un animal (tiburón blanco) y así sucesivamente. Alrededor de esta capacidad de asociación subyace la semántica, esto es, el significado de las palabras y frases. Existe así una clase de diccionario mental en el que encontramos sentido inmediato a una palabra cualquiera. Pero es un diccionario extraordinario, que se despliega en muchas dimensiones. Tomemos por ejemplo la palabra «asesino». A nuestra mente acude de forma inmediata la idea de alguien que comete o ha cometido un crimen. Esta idea puede a su vez ser expresada

en forma precisa, tal y como encontramos en un diccionario. Por otra parte, aunque en segundo plano, sabemos que el asesino es un ser humano y más concretamente un hombre (puesto que no es una asesina). La palabra posee así unas propiedades semánticas sobre las que todos los que emplean el lenguaje estarían de acuerdo. Pero en nuestra mente el asesino es mucho más. Tal vez dejando nuestros pensamientos libres pensaremos en un asesino en concreto, tal vez el protagonista de *Extraños en un tren* o quizá recordaremos el rostro del actor en la versión cinematográfica de Hitchcock. Si dejamos vagar nuestros pensamientos algo más, éstos fluirán en otras direcciones y conectarán a nuestro asesino con conceptos, ideas o personajes que escapan a esta definición. Del mismo modo, la expresión «agujero negro» nos puede sugerir otra lista de palabras que guardan distintos tipos de relación con la primera, como por ejemplo «relatividad», «teoría» y «física» pero también «Einstein», y es muy probable que esta última evoque el rostro del famoso físico.

Las asociaciones entre palabras pueden por lo tanto ser de una naturaleza altamente sofisticada. El físico y matemático Douglas Hofstadter construyó la red de relaciones entre conceptos de su libro *Gödel, Escher, Bach,** en el que relacionaba magistralmente las contribuciones de estos tres genios. La red (figura 8.2) es una buena forma de establecer asociaciones, aunque en este caso concreto, para alguien que no ha leído el libro, la naturaleza de estas asociaciones resulta misteriosa. De forma general, el proceso de asociación tiene lugar con mucha rapidez y sin demasiada dificultad. Y una vez más, esto es así a pesar de que el universo de conceptos posibles es vasto. ¿Cómo lo logramos? Ésta es una pregunta realmente difícil, pero algunas investigaciones sobre el lenguaje entendido como una red permiten ver algo de luz al final del túnel.

* Publicado por Tusquets Editores, col. Metatemas 14, y Fábula 250, Barcelona, 1987 y 2007, respectivamente. *(N. del E.)*

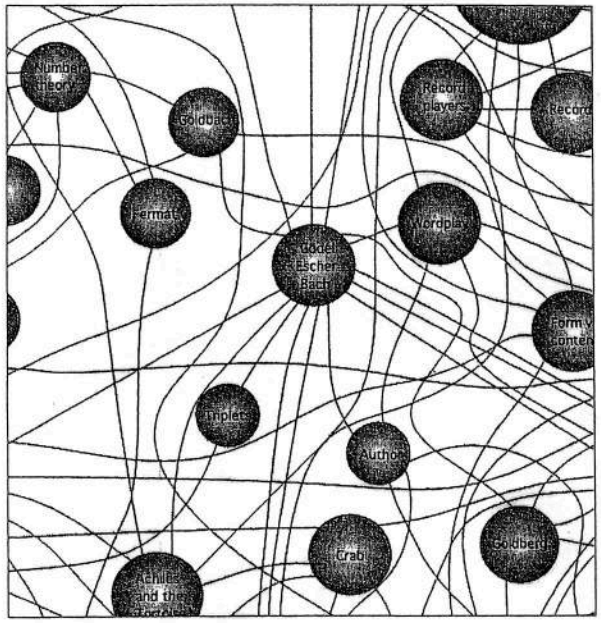


Figura 8.2. Una pequeña parte de la red de relaciones entre palabras clave del libro de Douglas Hofstadter *Gödel, Escher, Bach*. Esta red ilustra a la perfección la complejidad de las relaciones entre conceptos incluso dentro de un sistema particular, como es este libro. (Dibujo de Ricard Solé.)

Un fenómeno interesante en el contexto del significado de las palabras es la presencia de ciertos tipos de ambigüedades aparentemente universales. Aunque en principio sería lógico esperar que cada palabra se diferenciara con claridad de cualquier otra, tanto por su estructura como por su significado, lo cierto es que existen multitud de palabras distintas que poseen el mismo significado y viceversa: muchas palabras pueden poseer varios significados. Las primeras son los sinónimos y las segundas son las llamadas palabras polisémicas. La existencia de polisemia es un tanto sorprendente si pensamos en el lenguaje como un sistema que favorece la comunicación eficiente y que por lo tanto debe evitar la ambigüedad. ¿Por qué todas las lenguas presentan polisemia? Parece razonable pensar que una lengua que minimice la presencia de palabras ambiguas se

vería favorecida sobre una que no lo hiciera. En otras palabras, el proceso de cambio constante que experimenta cualquier lenguaje terminaría eliminando los elementos que de alguna forma hicieran difícil la comunicación. La respuesta a nuestra pregunta procede del estudio de la estructura de las redes semánticas: las ambigüedades son de hecho las responsables de la estructura de mundo pequeño. Este descubrimiento fue llevado a cabo por los físicos argentinos Mariano Sigman y Guillermo Cecchi, estudiando uno de los mejores ejemplos de red de asociación semántica: Wordnet. La construcción de esta red es un proyecto ambicioso que se inicia en 1985 de la mano del lingüista George Miller en la Universidad de Princeton y que en 2006 alcanzaba ya la cifra de 150.000 palabras. Esta base de datos incluye nombres, adjetivos, adverbios y verbos. Estas clases básicas se relacionan entre sí de formas diversas y una de las motivaciones del proyecto surge del intento de comprender la forma en la que los humanos adquieren y organizan el conocimiento. En este sentido, es interesante observar que algunas patologías, como la afasia anómica, en la que el individuo es incapaz de nombrar objetos, parecen indicar que el modo en el que almacenamos conceptos es —de alguna forma— de naturaleza jerárquica.

Wordnet no sólo incluye una enorme cantidad de palabras, sino que también (y muy especialmente) define las posibles relaciones entre éstas, si las hay. Cada relación implica una conexión y por tanto el conjunto de palabras y relaciones nos da una red semántica de grandes dimensiones. Sigman y Cecchi simplificaron el problema considerando esta red bruta y preguntándose acerca de su organización a gran escala: ¿existirán regularidades globales de algún tipo? Podríamos pensar que esta organización será de naturaleza jerárquica, algo así como un árbol que se ramifica una y otra vez. De hecho, esta idea parece ser apoyada por una inspección de las relaciones entre una palabra elegida al azar y otras presentes en el conjunto de palabras en una base de datos. Esto puede llevarse a cabo de forma automática en algunos casos, como

sucede con los *Thesaurus,* un tipo de diccionario que compila palabras estableciendo sus relaciones mutuas. Los sinónimos y antónimos son sólo dos ejemplos de los tipos de relaciones establecidas por esta compilación. En la figura 8.3 por ejemplo, mostramos una parte de la red semántica en la que algunas palabras, como *body,* se conectan a un gran número de palabras ligadas semánticamente debido a que forman parte del cuerpo. Asimismo, una palabra ambigua en inglés, como *arms,* que significa tanto «brazos» como «armas», ofrece la posibilidad de conectar grupos de elementos en principio poco relacionados entre sí.

Al establecer este grafo de interacciones semánticas, disponemos de un grafo de asociación que en alguna forma debe reflejar las estrategias empleadas por nuestros cerebros. También podría, analizado correctamente, darnos las claves para contestar algunas de las preguntas anteriores. Tal y como estos autores afirman en su artículo original, el lenguaje es una ventana privilegiada al interior de la mente. Sigman y Cecchi emplearon las herramientas de la teoría de redes complejas para llevar a cabo el primer estudio de largo alcance sobre la organización global de Wordnet. El empleo de una visión de red parece más que justificado: si se nos presentan dos palabras como «león» y «rayas» es muy posible que la palabra «tigre» aparezca como una forma de conectar por asociación ambos términos, en principio inconexos. Y así, en general, nos podemos plantear el juego de conectar dos palabras elegidas al azar mediante una cadena de relaciones intermedias. De forma natural, surgen así caminos formados por palabras cuya longitud podemos medir. Por otra parte, los triángulos entre palabras nos sirven de medida del grado de asociación local entre conceptos, que también podemos medir. Tal y como está estructurada esta red, está claro que las conexiones son de distinta naturaleza, pero una vez más podemos considerarlas todas simultáneamente y así tener en cuenta la red como un todo organizado en diferentes capas. La red resultante es un mundo pequeño: aunque la red em-

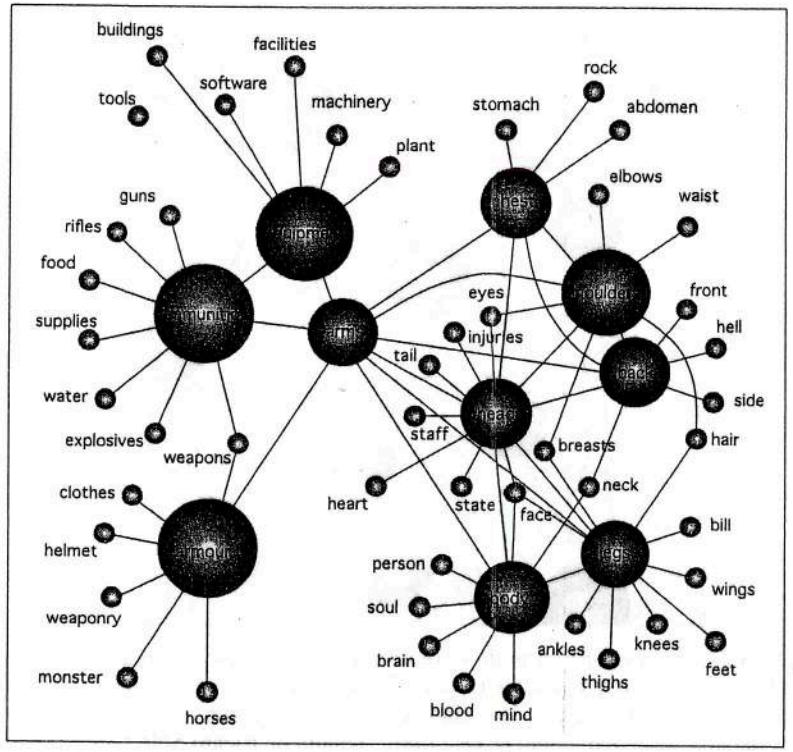


Figura 8.3. Las relaciones semánticas o conceptuales entre palabras permiten construir un grafo en el que dos palabras se conectan si poseen algún tipo de relación. En la figura se muestra la que sería una pequeña parte de la red total de vocablos ingleses. (Dibujo de Ricard Solé.)

pleada incluía más de 66.000 palabras, la distancia promedio estimada mostraba siete grados de separación y un número de triángulos muy elevado. También resultó ser una red libre de escala. Los elementos altamente conectados resultaron ser palabras de contenido muy general pero lo más interesante de este estudio fue analizar el impacto de eliminar las palabras polisémicas. Una vez que éstas se han extraído de la red, podemos calcular de nuevo las propiedades de la red resultante, en teoría más eficiente, dada la ausencia de redundancias. El impacto es enorme: la distancia entre palabras aumenta hasta once grados de separación mientras que el número de trián-

gulos resulta ser trescientas veces menor que el inicial. Dicho de otra forma, las palabras polisémicas dan una coherencia extraordinaria a la red, haciendo fácil la navegación (y por tanto la existencia de cadenas de relaciones «fáciles» entre palabras distantes) así como la asociación local (medida por el número de triángulos). Paradójicamente, pues, la ambigüedad introducida por la polisemia resulta ser una propiedad enormemente útil: en lugar de introducir ineficiencia, hace de hecho la asociación semántica mucho más fácil y fluida. Ésta puede muy bien ser la razón de la presencia universal de esta clase de palabras en todos los lenguajes del mundo: en multitud de tareas cognitivas, navegamos a través de las palabras y significados en busca de relaciones, y ¿qué mejor que un mundo pequeño para encontrar aquello que buscamos? Estudios posteriores que emplean otras redes (como la de los *Thesaurus)* confirmaron estas observaciones. Aunque estos trabajos abren nuevas preguntas (¿dónde está la red?, ¿se halla localizada o distribuida en todo el cerebro?, ¿cómo se accede a sus elementos?), permiten por primera vez cuantificar de forma rigurosa la estructura de universo semántico y racionalizar su organización. Algo que muchos lingüistas olvidan demasiado a menudo.

Las redes de Chomsky

Todo ser humano que no ha sido privado del contacto social experimenta, en una etapa temprana de su vida, la epifanía que representa la adquisición del lenguaje complejo en toda su potencia. Nunca deja de sorprender la forma en que el niño desarrolla su dominio de la lengua materna, aparentemente adquirida sin esfuerzo. Después del silencio y el balbuceo, se van abriendo camino las palabras, cuyo número crece con rapidez. Pero lo más notable y a la vez difícil de comprender es la forma en que adquieren el dominio de las reglas gramaticales que les permiten organizar correctamente sus frases. En el corazón de las capacidades de combinar palabras de forma recursiva se halla la sintaxis, definida como el conjunto de reglas que deciden cuándo una frase está o no correctamente construida. Así, podríamos escribir:

Un ratón se escapó del barril y huyó escaleras abajo

Pero también podríamos escribir:

Abajo se escaleras huyó un del ratón escapó el barril

Que por supuesto carece de cualquier sentido. Aun cuando sólo hubiéramos alterado un poco la primera frase, para generar por ejemplo:

Un ratón escapó del barril y se huyó escaleras abajo,

detectaríamos de nuevo el problema con rapidez. Nuestro cerebro barre la estructura de las frases de forma inconsciente y capta con facilidad aquello que no ha sido construido de forma adecuada. Ésta es una hazaña considerable, dado que esta estructura está organizada de un modo bien definido, dirigida por el conjunto de las reglas sintácticas. De hecho, si alguien nos pidiera que le explicáramos las reglas de construcción, nos encontraríamos en una situación realmente difícil: sin duda sabemos emplearlas, pero en realidad desconocemos sus reglas generales. Y aun así, poco después de los dos años de edad, cualquier niño desarrolla un conocimiento de su lengua materna que implica su capacidad de emplear correctamente las reglas de construcción. Aunque su uso mejora y se hace más sofisticado y diverso con el tiempo (salvo en el caso de algunos jugadores de fútbol profesional), es poco después de los dos años cuando el lenguaje esencialmente organizado y complejo del adulto está ya en su lugar, con la estructura gramatical correcta y preparada.

¿Cómo se adquiere el lenguaje? La capacidad de generalizar que aparece en el niño que aprende y que le permite ex-

traer reglas generales a partir del repertorio de frases que ha recibido de sus progenitores u otros plantea una paradoja. Puesto que el conjunto de posibles frases es virtualmente infinito y el aprendizaje tiene lugar mediante una inmersión en un conjunto limitado de ejemplos, ¿cómo puede llegarse a una generalización semejante? Y, lo que resulta aún más interesante: el proceso mismo de aprendizaje muestra algunas características sorprendentes, la primera de las cuales es lo súbito del proceso. Antes del momento crítico de los dos años de edad, los niños muestran un cambio gradual en el uso del número de palabras (que va en aumento a medida que se aprenden) y éstas están mayoritariamente asociadas a nombres o acciones simples. En este sentido, las palabras poseen en gran medida entidad propia, como objetos en sí mismos empleados en la forma de comunicación más simple y directa. Las reglas no se han puesto aún de manifiesto y las asociaciones de palabras, aunque existen, son raras. Pero el proceso de cambio no es ni muchos menos gradual: a medida que nos acercamos al umbral de los dos años, el número de asociaciones entre pares de palabras crece con rapidez hasta ser tan bueno como para generalizar sin problemas. El niño ha experimentado una transición del mundo de las palabras al mundo de las frases. En algún lugar de esta transición, la gramática se ha abierto paso en el cerebro, que crece y cambia... ¿o acaso estaba ya preparado para ello? Lo sorprendente del fenómeno de la adquisición del lenguaje sugirió a algunos estudiosos la posibilidad de un componente interno del cerebro (un *hardware* mental) que habría aparecido a lo largo de la evolución. El lingüista Noam Chomsky propuso esta idea hacia 1957, en abierta confrontación con la escuela conductista; según el conductismo, la mente se inicia al nacer como una tábula rasa, vacía por completo y se va llenando mediante el aprendizaje y la experiencia. En la hipótesis de Chomsky, existe lo que él llamaba el «órgano del lenguaje», un dispositivo neuronal que permite al niño aprender con rapidez a llevar a cabo generalizaciones y adquirir las reglas gramaticales.

Demostrar esta conjetura es una tarea difícil, dado que desconocemos la naturaleza —en caso de que exista— de la maquinaria asociada con el aprendizaje del lenguaje. De acuerdo con esta idea, es importante mencionar que los niños no sólo adquieren un conjunto de reglas, sino que jamás cometen ciertos errores. Por ejemplo, si tomamos la frase «El hombre está aquí», es fácil transformarla en una pregunta del tipo «¿Está aquí el hombre?». Del mismo modo, se puede generar una nueva pregunta partiendo de una frase algo más compleja: «El hombre que está enfermo está aquí». El niño que acaba de aprender a formular preguntas dirá correctamente: «¿Está aquí el hombre que está enfermo?», pese a que podríamos esperar un error del tipo «¿Está el hombre que enfermo está aquí?». Semejante fallo nunca se observa, pese a que la regla de ordenación no es trivial y no puede ser fácilmente aplicada por un programa de ordenador.

Como ocurre con la mayoría de teorías existentes acerca de los orígenes del lenguaje, la de Chomsky es una idea controvertida. Por un lado, las evidencias apuntan a que existe un elemento innato; aunque desconozcamos su naturaleza. Por otra parte, no cabe duda de que el lenguaje implica un elemento cultural de gran importancia. Al fin y al cabo, si la humanidad desapareciera y sólo quedara un puñado de niños de un año, sin adultos que les enseñaran una lengua (y suponiendo que pudieran sobrevivir) el lenguaje desaparecería también. Por otra parte, es bien sabido que las lenguas evolucionan con rapidez y cambian dentro de una escala de tiempo mucho menor que la que actúa sobre los genes. Incluso en el caso de un texto antiguo de nuestra propia lengua, escrito hace apenas unos cientos de años, descubriremos numerosos cambios e incluso tendremos dificultades para comprender lo que leemos. Así pues, tal vez debamos tener en cuenta ambos factores. Esta idea parece también difícil de explorar, puesto que la evolución de los modos culturales también se escapa a nuestra capacidad de experimentar. Pero una nueva generación de estudiosos ha sabido sacar partido de la simulación

por ordenador para remedar el camino que conduce al lenguaje. Bajo la estela de su principal precursor, el lingüista Jim Hurford, diversos investigadores como Simon Kirby o Morten Christiansen han llevado a cabo experimentos virtuales en los que una población de «agentes» capaces de intercambiar y procesar palabras en un medio dado son capaces de desarrollar algunas propiedades características del lenguaje. En particular, algunos de los modelos de Kirby muestran que ciertas reglas de ordenación de palabras surgen (se «descubren») de manera espontánea como resultado de la evolución. Kirby y otros investigadores como Terrence Deacon sospechan que el lenguaje ha evolucionado para sobrevivir en un ambiente dado. Específicamente, se considera al lenguaje como un virus que infecta la mente de los niños y que actuaría por lo tanto como una especie de entidad parásita. Los humanos necesitaríamos del lenguaje para prosperar e incluso sobrevivir y el lenguaje nos necesitaría para reproducirse también.

Pero volvamos a la hipótesis biológica. Dado que la sintaxis es un sistema de reglas, parece razonable pensar que un enfoque adecuado al problema de cómo se adquiere semejante sistema debería considerar (en la medida de lo posible) las reglas en su totalidad, o por lo menos en una muestra significativa de las mismas. Lo que es más importante: mejor aún que estudiar el número de palabras aprendidas a lo largo del tiempo, sería explorar de qué manera se relacionan entre sí a medida que el niño aprende. Para poder llevar a cabo este análisis debemos emplear ejemplos de procesos de aprendizaje del lenguaje que cubran el periodo crítico alrededor de los dos años, cuando la aparición de un lenguaje organizado y con coherencia gramatical se abre paso. En colaboración con el físico y lingüista Bernat Corominas-Murtra y el experto en sistemas complejos Sergi Valverde, nos propusimos este objetivo empleando para ello la base de datos CHILDES, en la que se recopilan numerosos ejemplos del proceso de adquisición del lenguaje en los niños. Cada una de estas compilaciones recoge la conversación entre madre e hijo en periodos de horas, obtenidos a lo largo de los meses, y de estas conversaciones (en las que hay mucha imitación y redundancia, sobre todo al principio) se pueden extraer las estructuras sintácticas a medida que el niño crece.

Si la sintaxis está asociada a un sistema neuronal complejo que define cierto tipo de «máquina» que permite computar lo que es correcto o no, parece acertado intentar abordar el problema desde una perspectiva lo más global posible. El propio Chomsky argumentó que la facultad innata que permite la emergencia del lenguaje ha de ser similar a una red eléctrica formada por múltiples interruptores conectados entre sí. Todo ser humano vendría al mundo equipado con la misma red, que en cada situación —expuesta a una gramática dada— abriría y cerraría distintos interruptores. La cuestión central consiste en probar la existencia de dicha red, determinar su localización (si la tiene) y su estructura. Como forma de abordar el problema desde esta perspectiva, decidimos estudiar el conjunto de relaciones sintácticas que podían obtenerse de las bases de datos de adquisición. En lugar de analizar por separado estas relaciones, nos propusimos como objetivo estudiar al completo la red de todas ellas. Para cada mes de desarrollo, construíamos la red que resumiría el estado de la complejidad del lenguaje hasta ese momento.

Cuando la secuencia de redes estuvo completada, empleando algoritmos especiales que Sergi había desarrollado, nos encontramos con varias sorpresas. En primer lugar, se producía una transición muy brusca hacia los dos años de edad. Esta transición marcaba el paso de una red poco conectada a una red altamente conectada. En la primera fase, las redes sintácticas formadas por elementos conectados entre sí son muy pequeñas y forman lo que los matemáticos llaman *árboles* (figura 8.4, arriba): las relaciones entre palabras definen una jerarquía en la que no hay trayectorias cerradas conectando un elemento consigo mismo. El resto de palabras se hallan simplemente desconectadas, aisladas del resto. Estas

redes son pobres y nos dicen que las relaciones sintácticas son aún raras: las palabras no se combinan en estructuras más complejas, dado que la recursividad aún no ha aparecido. Al cruzar el umbral crítico de dos años, sin embargo, la organización de las relaciones experimenta un cambio enorme, ilustrado a la perfección por la aparición de redes libres de escala: todas las palabras se hallan ahora conectadas, aunque la mayoría lo están con tan sólo una o dos y un conjunto reducido de palabras presenta un gran número de relaciones sintácticas (figura 8.4, abajo y 8.5). En esta fase, la riqueza de relaciones ha explotado y se plasma en una red de mundo pequeño en la que las palabras altamente conectadas permiten encontrar con facilidad la relación sintáctica deseada.

Durante varios meses intentamos encontrar un modelo simple que permitiera reproducir las observaciones anteriores. Las teorías que conocíamos se basaban en el mecanismo de conexión al azar o en el mecanismo de «el rico se hace más rico» (capítulos 2 y 3). Ninguno de estos mecanismos ni sus combinaciones permitían obtener el resultado observado y por el contrario el estudio más detallado de las redes sugería precisamente lo contrario: que el cambio brusco que observábamos no era otra cosa que la evidencia de un componente del *hardware* cerebral. Recordemos que el modelo de Erdös-Renyi (véase el capítulo 2) presenta una transición cuando se acerca a una conectividad crítica, pero esta transición da lugar a una red homogénea y a medida que nos acercamos al punto de transición vemos conjuntos de pares o tríos de elementos conectados que aquí no aparecen. En el caso del modelo de Barabási-Albert, la red es libre de escala pero no experimenta ninguna transición. Un hecho especialmente importante era la presencia de un cambio radical en el papel que desempeñan las palabras con un gran número de relaciones sintácticas. Antes de los dos años, un pequeño conjunto de palabras se hallan más conectadas, ocupando el centro del árbol. Pero cerca de la transición hacia las redes sintácticas vemos que algunas palabras que son clave y que no se hallaban

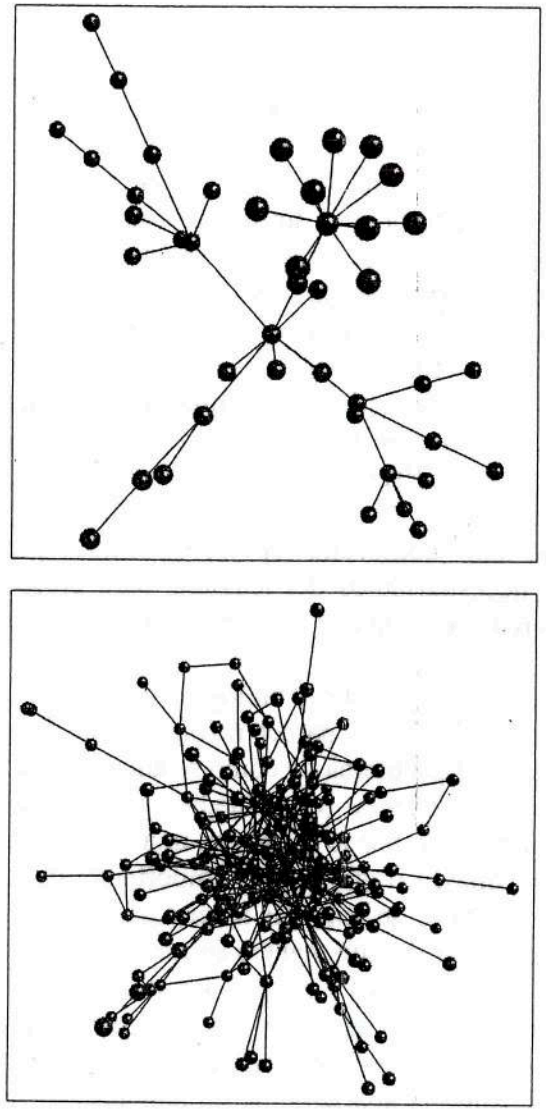


Figura 8.4. Las redes que relacionan palabras en el lenguaje de los niños experimentan un cambio profundo y rápido al alcanzar los dos años de edad (aproximadamente). La red superior representa el conjunto de palabras asociadas antes de la transición. El resto de palabras (que no se muestran) se hallan desconectadas y aisladas. Por el contrario (abajo), una vez superado el umbral de los dos años, la red explota en complejidad, las palabras se conectan y la estructura cambia por completo. (Figuras de Ricard Solé.)

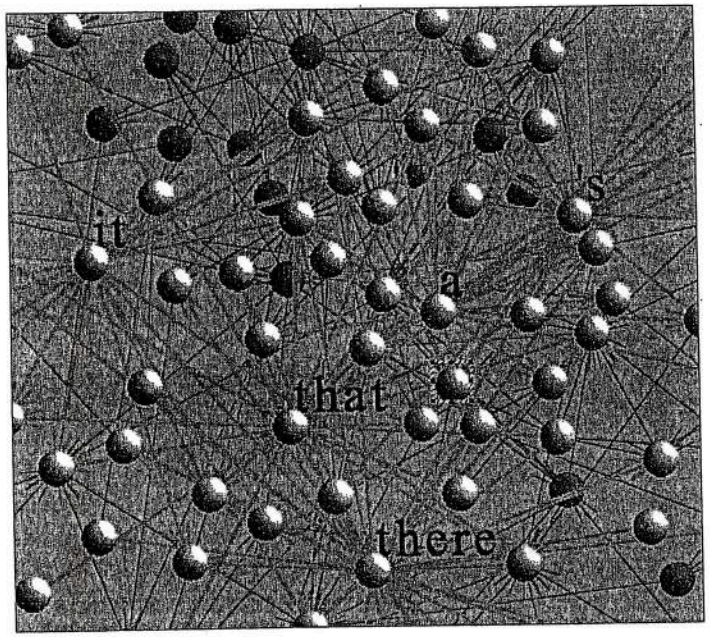


Figura 8.5. Durante el desarrollo del lenguaje, las palabras se van incorporando, y la importancia relativa de éstas puede medirse estudiando con cuántas se relacionan. Algunas palabras que inicialmente son importantes van perdiendo peso, a la vez que otras palabras de gran importancia pero poco significado (como preposiciones y artículos) terminan surgiendo y dominando la red. Aquí vemos el corazón de la segunda red de la figura anterior, en la que se han desarrollado las palabras clave que definen la sintaxis adulta. (Figura de Sergi Valverde.)

presentes hasta ese momento empiezan a invadir la red y de algún modo toman el control. Estas palabras son semánticamente pobres y constituyen los conectores principales de la red adulta. Una vez más, no existe modelo alguno de crecimiento en el que semejante cambio tenga lugar. La forma en que las redes se transmutaban a los dos años no podía explicarse sin aceptar la presencia de un factor innato. El cambio brusco hacia el grafo con organización sintáctica apoya la existencia de un órgano del lenguaje.

¿Podremos saber alguna vez cuál es el origen del lenguaje y si la estructura del lenguaje humano es una solución es-

pecial o tan sólo una de muchas? Podría decirse que esta pregunta carece de sentido ya que, como señalábamos al principio, el lenguaje no deja fósiles. Sin embargo, existen de hecho dos aproximaciones que pueden dar una respuesta positiva a la pregunta anterior. La primera es la presencia de universales en la evolución de la complejidad. Aunque las lenguas exhiben diferencias importantes en el conjunto de palabras empleadas y sus reglas de combinación específicas, la presencia de patrones de organización generales (como los que hemos visto anteriormente) sugieren que el lenguaje humano —y tal vez cualquier lenguaje complejo concebible— es una solución única al problema de la comunicación segura pero a la vez flexible. De ser así, podríamos definir, al menos a grandes rasgos, el camino seguido por la evolución hasta hoy. La segunda es la posibilidad de hacer evolucionar formas de lenguaje en sistemas robóticos capaces de interaccionar entre sí, captar y procesar información compleja y aprender de la experiencia. En este sentido, el empleo de sistemas artificiales añade una dimensión especialmente interesante al debate. En lugar de construir modelos del lenguaje humano, los investigadores en este campo emplean robots equipados con sensores, programas adecuados y un «cerebro» muy simple (como por ejemplo una red neuronal). Un ejemplo es el experimento que llevó a cabo el belga Luc Steels, experto en inteligencia artificial de Sony. Steels empleó dos sistemas robóticos muy simples, equipados con visión y capaces de observar un conjunto de objetos y asignarles nombres. Además, estas «cabezas parlantes» —como se llamó al experimento— podían comunicarse entre sí e intercambiar su información sobre los objetos que observan. Con este sistema, Steels intentaba de alguna forma recrear los (posibles) primeros pasos del lenguaje. Los robots debían segmentar la información de cada objeto (su color o su localización en el espacio) y elegir una palabra para referirse a éstos. Las palabras son objetos inventados, como *«bozopite»* o *«malewina»* y en el proceso de comunicación cada robot intenta determinar a qué objeto o atri-

buto hace referencia el segundo robot. Ocasionalmente, de este intercambio surge el acuerdo y ambos emplean el mismo término. El resultado de estos experimentos es muy interesante: los robots generan un gran número de palabras que indican orientaciones espaciales (arriba, abajo, izquierda o derecha), así como otros atributos de color o tamaño y un resultado de esta evolución es la aparición de categorías de significado. En algunos experimentos con robots más avanzados, una gramática rudimentaria evolucionó también como respuesta a situaciones ambiguas. Será interesante ver qué tipo de lenguajes complejos surgirán cuando los robots empleados sean lo bastante sofisticados. ¿Surgirá un lenguaje parecido al nuestro, indicando así la presencia de leyes universales? ¿O asistiremos a la aparición de una nueva forma de lenguaje?

La mitad del cerebro es suficiente

El ser humano es, para bien o para mal, la especie dominante en nuestro planeta. Esta posición es el resultado de una evolución de millones de años, que se inicia con cambios físicos de enorme calado que incluyen la postura erguida y una corteza cerebral enormemente desarrollada. Junto con estos cambios, nuestros antecesores generaron una estructura social coherente, precursora de nuestra civilización. En algún momento en ese pasado remoto, la mente dio un salto de enorme trascendencia: de alguna forma, el mundo dejó de ser una fuente de señales imprecisas para ser interpretado e imaginado. La mente simbólica nos hizo distintos y temibles. Si tuviéramos que mencionar una propiedad única de la especie humana, ¿cuál sería? Es muy probable que, junto con la conciencia, el lenguaje apareciera como la propiedad más visible y esencial a la naturaleza humana (y de la que posiblemente depende la primera).

El lenguaje nos hace únicos como especie, nos permite comunicarnos y cooperar. Nos permite pensar y construir una

imagen mental del mundo externo. El lenguaje consiste en palabras, pero muy especialmente en reglas. Las palabras son las unidades elementales sobre las que descansa la comunicación. En su forma más simple, la primera capa que define el lenguaje como medio expresivo yace en la capacidad de dar nombre a las cosas. Es más que probable que una etapa esencial en la evolución de una forma de comunicación compleja implique asociar palabras a objetos o acciones. Pero las palabras en sí mismas sólo son una parte mínima del gran teatro del lenguaje humano.

¿Hasta dónde comprendemos los orígenes y propiedades del lenguaje? Estamos muy lejos de saberlo todo. Un hecho en particular nos puede mostrar hasta qué punto esto es así. Tiene que ver con una forma de cirugía cerebral drástica que se emplea en algunos casos de epilepsia severa que afecta a niños menores de tres años. La epilepsia es una dolencia que puede tener distintos niveles de intensidad y se asocia a la aparición de actividad eléctrica anormal en grandes áreas de la corteza cerebral. En un ataque epiléptico, estas zonas aparecen como sincronizadas, con millones de neuronas disparando al unísono en ondas coherentes que pueden verse con facilidad mediante el empleo de electroencefalogramas. A veces estas ondas son de pequeño tamaño y duración, y su presencia es sólo una molestia que puede mantenerse a raya con el tratamiento adecuado. Pero en ocasiones su intensidad es tan grande que da lugar a convulsiones y pérdidas de conciencia. El llamado Síndrome de Rasmussen, que se da en niños y puede tener efectos devastadores, es uno de estos casos en los que la medicación no basta y se requiere la ayuda de la cirugía. Una posible forma de atajar la intensidad de los ataques es cortando la conexión entre las dos mitades del cerebro. Ello se consigue seccionando la zona intermedia de materia blanca que cablea entre sí ambos hemisferios, evitando así que una onda pase de un hemisferio al otro. Pero incluso una intervención así puede no ser suficiente. En algunos casos (apenas unos centenares en todo el mundo), se requiere

una intervención que implica la eliminación completa de la corteza cerebral en la que se originan los ataques. Esta forma de cirugía radical se denomina hemisferectomía y tal y como el nombre indica, representa de hecho la eliminación de la mitad del cerebro.

Algunos estudios han seguido el curso de la recuperación cognitiva de los pacientes con Rasmussen y que han sufrido hemisferectomías. El resultado es en muchos casos sorprendente, dado que muchas funciones que se suponen específicas del hemisferio cerebral eliminado se recuperan. Por ejemplo, niños que han sufrido hemisferectomía del lóbulo derecho pueden volver a disfrutar de la música y los que han experimentado la pérdida del izquierdo sufren un gran déficit cognitivo durante los primeros meses después de la operación. Como veíamos en el capítulo anterior, el hemisferio izquierdo del cerebro aloja algunas áreas clave para la comprensión y el procesamiento del lenguaje. Un daño en el área de Broca comporta la incapacidad para construir frases de forma correcta, mientras que una lesión que afecte al área de Wernicke dará lugar a una incapacidad profunda para comprender las frases, dejando sin embargo intacta la capacidad de producir palabras. La conclusión obvia es la siguiente: dado que la evolución del cerebro lo ha preparado para organizar las tareas que lleva a cabo de forma espacialmente modular, la pérdida del hemisferio en el que se encuentran algunos módulos clave del lenguaje implica en principio la pérdida total de esta capacidad. Pero el telar mágico nos sorprende una vez más. Muchos de estos niños recuperan la mayoría de sus capacidades... incluyendo el lenguaje. De algún modo el lenguaje es capaz de reorganizarse de nuevo empleando zonas de la corteza derecha en la que nunca nos lo encontraríamos. Un hecho inesperado que nos sorprende enormemente... aunque quizá no encontremos las palabras adecuadas para expresar nuestra sorpresa. Sólo podemos concluir, como nos dice el neurólogo Alessandro Battro, que «la mitad del cerebro es suficiente». Pero en ese caso, ¿por qué la evolución ha

generado un cerebro en el que las tareas aparecen segregadas en áreas especializadas? ¿Por qué no se halla el lenguaje distribuido en todas partes desde el principio? He aquí preguntas abiertas que tal vez necesitarán de un Einstein del lenguaje para resolverlas.

Epílogo

El libro que sostienes en tus manos contiene información que tu cerebro procesa ahora mismo a gran velocidad. Las palabras fluyen hacia el interior de tu mente, desencadenando la actividad organizada de miles de millones de neuronas. En alguna parte (o en muchas) las frases toman sentido, tal vez viajando a través de telarañas que conectan la biblioteca de recuerdos, ideas y conocimiento que todos poseemos. El mismo libro que antes fue escrito empleando programas de edición de texto, que no son otra cosa que redes de *software* de enorme complejidad, creados por grupos de seres humanos que habitan este mundo cada vez más pequeño. Cada copia habrá viajado a un destino distinto, empleando para ello las redes de transporte sin las que el corazón de nuestra civilización dejaría de latir. Para recabar información acerca de los diversos temas que componen esta obra, empleé numerosos libros y artículos, pero sobre todo me dejé llevar por la marea de Internet. Aunque supiera a qué puerto me dirigía, ocasionalmente un tema inesperado cambiaba mi rumbo, más a menudo de lo que hubiera esperado, hacia otros destinos.

Lo que no percibe mi lector, pero es tan esencial como todo lo anterior, es lo que ocurre en el interior de cada una de nuestras células. Si pudiéramos dar una ojeada al interior de cualquiera de éstas, veríamos una maquinaria enormemente sofisticada, en constante funcionamiento. Su aspecto sería el de una extraña factoría con cientos de miles de millones de elementos flotando en el espacio, formando combinaciones

peculiares, moviendo moléculas aquí, empaquetándolas allá, cortándolas en otra parte. Todo en un escenario dominado por una trama de larguísimas cadenas que, a modo de esqueleto, sostienen la estructura celular. En el centro de toda la actividad está el núcleo de la célula, en cuyo interior el ADN hace el papel del *software* biológico. Su constante interacción con otros componentes permite a esta extraordinaria máquina celular funcionar de forma eficiente. Miles de señales son recibidas en la superficie y, de manera parecida a lo que ocurre con las palabras que tú lees, provocan cambios internos que no son otra cosa que cambios en la información recibida. La célula es la máquina que siempre está computando. Una máquina que además debe velar no sólo por su integridad, sino por la del organismo al que pertenece. Como parte de la sociedad que define el tejido, el orden global se impone sobre el individuo. Para que todo siga funcionando, la máquina celular —a diferencia de cualquier otra máquina— se detendrá e incluso autodestruirá si detecta errores graves. Para que las señales de alerta lleguen adecuadamente, una red conecta las distintas clases de moléculas de forma que un problema pueda ser fácilmente localizado y resuelto. En el tiempo que se tarda en leer estas líneas, decenas de miles de errores habrán tenido lugar en el interior del cuerpo del lector. La inmensa mayoría no tardarán en desaparecer, pero algunos no lo harán, y una célula con alguna anomalía habrá burlado los controles. Algunas incluso prosperarán, dando lugar a una pequeña progenie. No hay motivo de alarma: afortunadamente para todos, la evolución ha generado barreras de distintos tipos para que estos pequeños tumores no triunfen... casi nunca. Pocos ejemplos ilustran tan bien la dualidad entre complejidad y fragilidad que caracteriza las redes complejas. El funcionamiento de la vida depende de redes que intercambian materia, energía e información y que son capaces de resistir perturbaciones, daños e incluso pérdidas irreversibles de elementos sin mayores consecuencias. Pese a ello, algunos elementos clave son un verdadero talón de Aquiles: su pérdida puede conducir al colapso. En el futuro, estos elementos especiales representarán un papel clave en la batalla contra el cáncer y otras enfermedades en las que se hallan implicados distintos genes.

En el contexto de la vida a gran escala, de la biodiversidad siempre amenazada de nuestro planeta, la lección es parecida: también aquí la historia de la vida está íntimamente ligada a las redes ecológicas que han sido esculpidas por la evolución. A través de millones de años de cambio, la red de relaciones ecológicas ha sido parte esencial en la aparición y supervivencia de animales y plantas. La pérdida de algunas especies pasará inadvertida, pero la de otras iniciará un proceso catastrófico de extinción. Cada vez es más claro que pensar en la biosfera desde una visión puramente analítica, descomponiendo los ecosistemas en listas de especies individuales, es un camino que conduce a conclusiones erróneas y a predicciones poco fiables. Preservar lo que aún queda de nuestra biosfera no puede limitarse a salvar algunas especies emblemáticas dejando de lado el ecosistema. Debemos intentar, en la medida de lo posible, que la telaraña no se rompa. Nosotros también formamos parte de ella.

Mientras escribo estas líneas, una tormenta de cambios agita la economía mundial. Años de especulación y desregulación, en un contexto de globalización del comercio, han terminado creando una situación desastrosa. El resultado queda patente en los titulares de los periódicos en los que leemos: «crisis global» o «la tormenta sacude al mundo», así como en declaraciones de expertos economistas, como el premio Nobel Joseph Stiglitz, que afirmó en un entrevista que «La crisis de Wall Street es para el mercado lo que la caída del muro de Berlín fue para el comunismo». Aunque el epicentro de este terremoto estaba en Wall Street, el corazón financiero de Estados Unidos, las caídas de los mercados (algunas no vistas desde la gran recesión de 1929) generaron un efecto dominó que llegó con rapidez a Europa y Asia. El pánico generado por la incertidumbre amplificó con rapidez las malas

noticias iniciales y favoreció (como siempre ha ocurrido) una rápida respuesta. Aquí también vemos algunas de las claves de la complejidad de las redes: su arquitectura sostiene el libre comercio y se ha ido adaptando a los tiempos y políticas cambiantes. Pero es una red libre de escala, con nodos enormemente conectados y una estructura de mundo pequeño, y también castigará a todos si las políticas económicas son equivocadas. Desgraciadamente, esta reflexión no es un ejercicio de pensamiento académico: decenas de miles, tal vez millones de personas, verán sus vidas seriamente perjudicadas (si no arruinadas) por depositar su confianza en un sistema en el que el enriquecimiento fácil y el riesgo excesivo han sido tolerados más allá de lo razonable. Los tiempos en que la bancarrota de una gran empresa sólo afectaba a sus empleados hace mucho que pasaron a la historia. En el futuro, un mundo sostenible necesitará de compromisos globales (y no sólo de negocios globales) que requerirán de un conocimiento de las redes sociales y económicas sobre las que se sustenta la realidad de cada día.

Entender lo complejo es una labor difícil, pero hay un componente indispensable para ello: cuidarse bien de reducir el todo a las partes. Atrás han quedado los días en los que se creía que el estudio de genes aislados sería la clave para comprender el genoma y las enfermedades. También la idea de que el cerebro era un ordenador compuesto de diversos bloques lógicos independientes. Desentrañar la arquitectura de las redes complejas no sólo nos permitirá trazar nuevos mapas de la realidad. Nos ayudará a reflexionar sobre los errores pasados y los retos futuros. La cartografía que nos revelan estas redes será un elemento esencial en los viajes que deberemos emprender hacia un conocimiento mejor, pero también más responsable, de este mundo único y frágil en el que nos ha tocado vivir.

Apéndice

Referencias bibliográficas

1. Retorno a Terra Incógnita

Anderson, P.W. (1972), «More is different», *Science* 177, págs. 393-396.

Bak, P. (1996), *How Nature Works,* Copernicus Press, Nueva York.

Gell-Mann, M. (1995), *El quark y el jaguar,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 38, Barcelona.

Holland, J.H. (1998), *Emergence: from Chaos to Order,* Basic Books, Nueva York.

Kauffman, S.A. (1993), *Origins of order,* Oxford University Press, Nueva York.

— (2003), *Investigaciones,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 76, Barcelona.

Lewin, R. (1995), *Complejidad,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 41, Barcelona.

Solé, R., y Manrubia, S.C. (1996), *Orden y caos en sistemas complejos,* Publicacions UPC, Barcelona.

Solé, R., et. al. (1996), «Complejidad en la frontera del caos», *Investigación y Ciencia.*

Solé, R., y Goodwin, B.C. (2001), *Signs of Life,* Basic Books, Nueva York.

Solé, R., Manrubia, S., Luque, B., Delgado, J., y Bascompte, J. (1996), «Phase transitions in complex systems», *Complexity* 1(4), págs. 13-26.

Wagensberg, J. (1985), *Ideas sobre la complejidad del mundo,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 3, Barcelona.

Waldrop, M. (1992), *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos,* Simon & Schuster, Nueva York.

2. Menor imposible

Albert R., y Barabási A.L. (2002), «Statistical mechanics of complex networks», *Reviews of Modern Physics* 74, pág. 47.

Barabási, A.L. (2002), *Linked: How Everything is Connected to Everything Else,* Perseus, Cambridge.

Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., y Hwang, D.U. (2006), «Complex networks: Structure and dynamics», *Physics Reports* 424, págs. 175-308.

Bollobás, B. (2001), *Random Graphs,* 2.ª ed., Cambridge University Press.

Buchanan, M. (2003), *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Theory of Networks,* Norton and Co., Nueva York.

Hayes, B. (2000), «Graph Theory in Practice: Part I», *American Scientist* 88, págs. 9-13.

— (2000), «Graph Theory in Practice: Part II», *American Scientist* 88, págs. 104-109.

Hoffman, P. (1999), *The Man Who Loved Numbers: the Story of Paul Erdös and the Search for Mathematical Truth,* Hyperion, Nueva York.

Milgram, S. (1967), «The small-world problem», *Psychology Today* 1, págs. 61-67.

Schechter, S.B. (2000), *My Brain is Open: the Mathematical Journeys of Paul Erdös,* Simon and Schuster, Nueva York.

Solé, R. (2008), «On networks and monsters: the possible and the actual in complex systems», *Leonardo* 41, págs. 253-258.

Strogatz, S.H. (2004), *Sync: How Order Emerges from Chaos in the Universe, Nature, and Daily Life,* Hyperion, Nueva York.

Wasserman, S., y Faust, K. (1994), *Social networks analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.

Watts, D.J., y Strogatz, S.H. (1998), «Collective dynamics of "small-world" networks», *Nature* 393, págs. 440-442.

Watts, D.J. (2003), *Six Degrees: The Science of the Connected Age,* Norton and Co., Nueva York.

3. El final de la geografía

Albert, R., Jeong, H., y Barabási, A.L. (2000), «The Internet's Achilles' heel: error and attack tolerance of complex networks», *Nature* 406, págs. 378-391.

Barabási, A.L., y Albert, R. (1999), «Emergence of scaling in random networks», *Science* 286, págs. 509-512.

Bonabeau, E., y Barabási, A.L. (2003), «Redes sin escala», *Investigación y Ciencia.*

Guimerà, R., Diaz-Guilero, A., Vega-Redond, F., Cabrales, A., y Arenas, A. (2002), «Optimal network topologies for local search with congestion», *Physical Rewiew Letters* 89, artículo n.° 248701.

Hillis, D. (1998), *The Pattern On The Stone: The Simple Ideas That Make Computers Work,* Basic Books, Nueva York.

Newman, M.E.J. (2003), «The structure and function of complex networks», *Siam Reviews* 45, págs. 167-256.

Pastor-Satorras, R., y Vespignani, A. (2004), *Evolution and Structure of the Internet,* Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.

Ray, T.S. (1991), «An approach to the synthesis of life», en : Langton, C., Taylor, C., Farmer, J.D., y Rasmussen, S. (eds.), *Artificial Life II, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity,* Redwood City, Addison-Wesley, California, vol. XI, págs. 371-408.

— (1992), *Evolution, Ecology and Optimization of Digital Organisms,* Santa Fe Institute, working paper 92-08-042, 1992.

Rosas Casals, M., Valverde, S., y Solé, R. (2007), «Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks», *International Journal of Bifurcations and Chaos* 17, págs. 2465- 2475.

Serrano, M.A., y Boguñá, M. (2003), «Topology of the world trade web», *Physical Review* E 68, 015101(R).

Serrano, M.A. (2007), «Phase transition in the globalization of trade», *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* L01002.

Serrano, M.A., Boguñá, M., y Vespignani, A. (2007), «Patterns of dominant flows in the world trade web», *Journal of Economic Interaction and Coordination* 2, págs. 111-124.

Standage, T. (1998), *The Victorian Internet,* Walker and Co., Nueva York.

4. Virus y epidemias

Camus, A. (2005), *La peste,* Edhasa, Barcelona.

Colizza, V., Barrat, A., Barthelemy, M., Valleron, A.J., y Vespignani, A. (2007), «Modeling the Worldwide Spread of Pandemic Influenza: Baseline Case and Containment Interventions», *PLoS Med* 4(1): e13.

Defoe, D. (1983), *Diario del año de la peste,* Bruguera, Barcelona.

Dezsó, Z., y Barabási, A.L. (2002), «Halting viruses in scale-free networks», *Physical Review* E 65, 055103.

Garrett, L. (1994), *The Coming Plague,* Penguin Books, Nueva York.

Hillis, D. (1998), *The Pattern on the Stone: the Simple Ideas that Make Computers Work,* Weinferld & Nicolson, Londres.

Johnson, S. (2006), *The ghost map,* Riverhead Books, Nueva York.

Latora, V., Nyamba, A., y Musumeci, S. (2006), «Network of Sexual Contacts and Sexually Transmitted Diseases in Burkina Faso», *Journal of Medical Virology* 78, págs. 724-729.

Lederberg, J. (1993), «Viruses and humankind: intracellular symbiosis and evolutionary competition», en: Morse, S.S. (ed.) (1993), *Emerging viruses,* Oxford University Press, Nueva York, págs. 3-9.

Levy, S. (1992), *Artificial Life: the Quest for a New Creation,* Penguin Books, Londres.

Liljeros, F., et al. (2001), «The Web of Human Sexual Contacts», *Nature* 411, págs. 908-909.

Lloyd, A.L., y May, R.M. (2001), «Epidemiology. How viruses spread among computers and people», *Science* 292, págs. 1316-1317.

— (2001), «Infection dynamics on scale-free networks», *Physical Review* E 64, 06612.

May, R.M., y Anderson, R.M. (1987), «Transmission dynamics of HIV infection», *Nature* 326, pág. 137.

Morse, S.S. (ed.) (1993), *Emerging viruses,* Oxford University Press, Nueva York.

Pastor-Satorras, R., y Vespignani, A. (2001), «Epidemic spreading in scale-free networks», *Physical Review Letters* 86, 3200.

— (2001), «Epidemic dynamics and endemic states in complex networks», *Physical Review* E 63, 066117.

— (2002), «Immunization of complex networks», *Physical Review* E 65, 036104.

Solé, R., Broglio, E., y Sandell, R. (2003), «Enfermedades emergentes en un mundo pequeño: las enseñanzas de la pandemia del SIDA». http://www.realinstitutoelcano.org/documentos/85.asp

Solé, R. (2006), «La pandemia de gripe: una amenaza global». http://www.realinstitutoelcano.org/analisis/951/951_Sole.pdf

Taubenberger, J.K., Reid, Ann H., y Fanning, Thomas G. (2007), «El virus de la gripe de 1918», *Investigación y Ciencia.*

Zanette, D., y Kuperman, M. (2002), «Effects of immunization in small-world epidemics», *Physica* A 309, págs. 445-452.

5. El agutí y el jaguar

Bascompte, J., Jordano, P., Melián, C.J., y Olesen, J.M. (2003), «The nested assembly of plant-animal mutualistic networks», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* 100, págs. 9383-9387.

Bascompte, J., y Jordano, P. (2007), «Plant-animal mutualistic networks: the architecture of biodiversity», *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 38, págs. 567-593.

Camacho, J., Guimerà, R., y Amaral, L. (2002), «Analytical solution of a model for complex food webs», *Physical Review* E65, artículo n.° 030901.

Dunne, J.A., Williams, R.J., y Martínez, N.D. (2002), «Food-web structure and network theory: the role of connectance and size», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99, págs. 12917-12922.

— (2002), «Network structure and biodiversity loss in food webs: robustness increases with connectance», *Ecology Letters* 5, págs. 558-567.

Jordano, P., Bascompte, J., y Olesen, J.M. (2003), «Invariant properties in coevolutionary networks of plant-animal interactions», *Ecology Letters* 6, págs. 69-81.

Leakey, R., y Lewin, R. (1997), *La sexta extinción: el futuro de la vida y de la humanidad,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 50, Barcelona.

Levin, S. (1999), *Fragile Dominion,* Perseus Books, Reading, Massachusetts.
Lovelock, J. (1993), *Las edades de Gaia,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 29, Barcelona.
Margalef, R. (1968), *Perspectives in Ecological Theory,* Chicago University Press, Chicago.
— (1991), «Networks in Ecology», en: Higashi y Burns (eds.), *Theoretical Studies of Ecosystems. The Network Perspective,* Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.
Memmot, J., Waser, N.M., y Price, M.V. (2004), «Tolerance of pollination networks to species extinctions», *Proceedings of the Royal Society* 271, págs. 2605-2611.
Montoya, J.M., Solé, R.V., y Rodríguez, M.A. (2001), «La arquitectura de la naturaleza: complejidad y fragilidad en redes ecológicas», *Ecosistemas* 2/2001 (URL: http://www.aeet.org/ecosistemas/Revisiones.htm).
Montoya, J.M., y Solé, R. (2002), «The small world of food webs», *Journal of Theoretical Biology* 214, págs. 405-412.
Montoya, J.M., Pimm, S., y Solé, R. (2006), «The architecture of ecological fragility», *Nature* 442, págs. 259-264.
Odum, H.T. (1986), *Systems Ecology: an Introduction,* John Wiley, Nueva York.
Olesen, J.M., Bascompte, J., Dupont, Y.L., y Jordano, P. (2006), «The smallest of all worlds: pollination networks», *Journal of theoretical Biology,* 240, págs. 270-276.
Pimm, S., *The Balance of Nature?: Ecological Issues in the Conservation of Species and Communities,* University of Chicago Press, Chicago.
Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J., Folke, C., y Walker, B. (2001), «Catastrophic shifts in ecosystems», *Nature* 413, págs. 591-596.
Solé, R., y Montoya, J. (2001), «Complexity and fragility in ecological networks», *Proceedings of the Royal Society of London* B268, págs. 2039-2045.
Solé, R., y Levin, S. (eds.) (2002), «The biosphere as a complex adaptive system», *Philosophical Transactions of the Royal Society* B 357, edición especial acerca de la complejidad de los sistemas ecológicos, págs. 615-725.
Solé, R., y Munteanu, A. (2005), «The global organization of chemical reaction networks in astrophysics», *Europhysics Letters* 68, págs. 170-176.
Solé, R., y Bascompte, J. (2006), «Self-organization in complex ecosystems», *Monographs in Population Biology,* Princeton University Press, Princeton.
Solé, R. (2007), «Scaling laws in the drier», *Nature* 449, págs. 151-153.
Wilson, E.O. (1995), *La diversidad de la vida: en defensa de la pluralidad biológica,* Círculo de Lectores, Barcelona.
Williams R.J., Martinez, N.D., Berlow, E.L., Dunne, J.A., y Barabási, A.L. (2002), «Two degrees of separation in complex food webs», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99, págs. 12.913-12.916.

6. Genomas, bricolaje y evolución

Alberts, B. (1996), *Biología Molecular de la Célula,* Editorial Omega, Barcelona.
Ayala, F.J. (2007), «Darwin's greatest discovery: Design without designer», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104, págs. 8567-8573.
— (2006), *Darwin and Intelligent Design,* Fortress Press, Minneapolis.
Ball, P. (2001), *Stories of the Invisible: a Guided Tour of Molecules,* Oxford University Press, Oxford.
Da Vinci, L. (1995), *Cuaderno de Notas,* Planeta de Agostini.
Gould, S.J. (2004), *La estructura de la teoría de la evolución,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 82, Barcelona.
Guimerà, R., Soles-Pardo, M., y Amaral, L. (2004), «Modularity from fluctuations in random graphs and complex networks», *Physical Review* E70, artículo n.° 25201.
Harold, F.M. (2001), *The Way of the Cell: Molecules, Organisms and the Order of Life,* Oxford University Press, Nueva York.
Jacob., F. (1976), «Evolution as tinkering», *Science* 196, págs. 1161-1166.
Jeong, H., Mason, S.P., Barabási, A.L., y Oltvai, Z.N. (2001), «Lethality and centrality in protein networks», *Nature* 411, págs. 41-42.
Kauffman, S.A. (1993), *Origins of Order,* Oxford University Press, Nueva York.

Monod, J. (1989), *El azar y la necesidad,* Tusquets Editores, col. Metatemas, n.° 6, Barcelona.
Nesse, R.M., y Williams, G.C. (1995), *Evolution and Healing: the New Science of Darwinian Medicine,* Orion Books, Londres.
Nicholls, P. (2004), *Darwin contra Fitzroy,* Temas de Hoy, Madrid.
Pastor-Satorras, R., Smith, E.D., y Solé, R. (2003), «Evolving protein interaction networks through gene duplication», *Journal of Theoretical Biology* 222, págs. 199-210.
Rodríguez-Caso, C., Medina, M.A., y Solé, R. (2005), «Topology, tinkering and evolution of the human transcription factor network», *FEBS Journal* 272, págs. 6423-6434.
Solé, R., Ferrer, R., Montoya, J.M., y Valverde, S. (2002), «Selection, Tinkering and Emergence in Complex Networks», *Complexity* 8, págs. 20-33.
Solé, R., Pastor-Satorras, R., Smith, E.D., y Kepler, T. (2002), «A model of large-scale proteome evolution», *Advances in Complex Systems* 5, págs. 43-54.
Solé, R., y Pastor-Satorras, R., «Complex networks in genomics and proteomics», en: Bornholdt, S. y Schuster, H.G. (eds.), *Handbook of Graphs and Networks,* John Wiley-VCH, Berlín, págs. 147-169.
Solé, R., y Valverde, S. (2006), «Are network motifs the spandrels of cellular complexity?», *Trends in Ecology and Evolution* 21, págs. 419-422.
Solé, R., y Valverde, S. (2007), «Spontaneous emergence of modularity in cellular networks», *Journal of the Royal Society Interface* 5, págs. 129-133.
Solé, R., Rodríguez-Caso, C., y Valverde, S. (2008), «Convergence through evolutionary tinkering: from genomes to artifacts», *Bioessays,* aceptado.
Valverde, S., y Solé, R. (2007), «On the nature of design», en: Minai, A., Braha, D., y Bar-Yam, Y. (eds.), *Complex Engineered Systems,* Springer, Nueva York.
Valverde, S., y Solé, R. (2005), «Network motifs in computational graphs: a case study in software architecture», *Physical Review* E 72, 26107.
Vázquez, A., Flammini, A., Maritan, A., y Vespignani, A. (2003), «Modeling of protein interaction networks», *ComPlexUs* 1, págs. 38-44.

Vogelstein, B., Lane, D., y Levine, A.J. (2000), «Surfing the p53 network», *Nature* 408, págs. 307-310.
Wagner, A., y Fell, D. (2002), «The small world inside large metabolic networks», *Proceedings of the Royal Society of London* B 268, págs. 1803-1810.
Wagner, A. (2002), «The large-scale structure of metabolic networks: a glimpse at life's origin?», *Complexity* 8, págs. 15-19.

7. Cerebros y máquinas

Bak, P. (1997), *How Nature Works. The Science of Self-organized Criticality,* Copernicus, Nueva York.
Burrell, B. (2004), *Postcards from the Brain Museum,* Broadway Books, Nueva York.
Chialvo, D. (2004), «Critical brain networks», *Physica* A 340, págs. 756-765.
Copeland, B.J., y Proudfoot, D. (1996), «On Alan Turing's anticipation of connectionism», *Synthese* 108, págs. 361-377.
— (1999), «Alan Turing's forgotten ideas in computer science», *Scientific American* 4, págs. 76-81.
Edelman, G.E. (1992), *Bright Air, Brilliant Fire: on the Matter of the mind,* Penguin Books, Londres.
Gould, S.J. (2003), *La falsa medida del hombre,* Crítica, Barcelona.
Heims, S.J. (1986), *John von Neumann y Norbert Wiener,* 2 vols., Salvat, Barcelona.
Hilgetag, C.C., y Kaiser, M. (2004), «Clustered organisation of cortical connectivity», *Neuroinformatics* 2, págs. 353-360.
Hopfield, J. (1982), «Neural Networks and Physical Systemswith Emergent Collective Computational Abilities», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 79, págs. 2554-2558.
Kaiser, M. (2007), «Brain architecture: a design for natural computation», *Philosophical Transactions of the Royal Society* A 365, págs. 3033-3045.
Kaiser, M., Görner, M., y Hilgetag, C.C. (2007), «Criticality of spreading dynamics in hierarchical cluster networks without inhibition», *New Journal of Physics* 9, pág. 110.

Langtoon, C.G. (1990), «Computation at the edge of chaos», *Physica* D42, págs. 12-37.
Neumann, J. von (1999), *El ordenador y el cerebro,* Antoni Bosch Editores, Barcelona.
Rojas, R. (1996), *Neural Networks: A Systematic Introduction,* Springer, Berlín.
Sacks, O. (2005), *Despertares*, Editorial Anagrama, Barcelona.
Sporns, O., y Zwi, J.D. (2004), «The small world of the cerebral cortex», *Neuroinformatics* 2, págs. 145-162.
Sporns, O., Chialvo, D.R., Kaiser, M., y Hilgetag, C.C. (2004), «Organization, Development and Function of Complex Brain Networks», *Trends in Cognitive Sciences* 8, págs. 418-425.
Sporns, O., Tononi, G., y Kötter, R. (2005), «The Human Connectome: A Structural Description of the Human Brain», *PLoS Computatinal Biology* 1, e42.
Stam, C.J., Jones, B.F., Nolte, G., Breakspear, M., y Scheltens, P. (2006), «Small-world networks and functional connectivity in Alzheimer's disease», *Cerebral Cortex* 17, págs. 92-99.

8. Retorno a Babel

Batro, A.M. (2000), *Half a Brain is Enough,* Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.
Bickerton, D. (1990), *Language and Species,* Chicago University Press, Chicago.
Bruner, E., Manzi, G., y Arsuaga, J.L. (2003), «Encephalization and allometric trajectories in the genus Homo», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* vol. 100, págs. 15.335-15.340.
Crystal, D. (1997), *The Cambridge Encyclopaedia of Language,* 2.ª ed., Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts.
Deacon, T.W. (1997), *The Symbolic Species: the Co-evolution of Language and the Brain,* Norton and Co., Nueva York.
Corominas-Murtra, B., Valverde, S., y Solé, R. (2007), «Emergence of scale-free syntax networks», http://arxiv.org/abs/0709.4344
Ferrer, R., y Solé, R. (2001), «The Small-World of Human Language», *Proceedings of the Royal Society of London* B 268, págs. 2261-2266.

Ferrer, R., Koehler, R., y Solé, R. (2004), «Patterns in syntactic dependency networks», *Physical Review* E 69, 32767.
Fischer, S.R. (1999), *Breve historia del lenguaje,* Alianza Editorial, Madrid.
Hofstadter, D. (1987), *Gödel, Escher, Bach: un Eterno y Grácil Bucle,* Tusquets Editores, col. Fábula, n.º 269, Barcelona.
Motter, A.E., de Moura, A.P.S., Lai, Y.C., y Dasgupta, P. (2002), «Topology of the conceptual network of language», *Physical Review* E65.
Sigman, M., y Cecchi, G.A. (2002), «Global organization of the Wordnet lexicon», *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99 (3), págs. 1742-1747.
Solé, R., Corominas-Murtra, B., Valverde, S., y Steels, L. (2005), «Language networks: their structure, function and evolution», Santa Fe Institute, working paper 05-12-042.
Steels, L. (2003), «Evolving Grounded Communication for Robots», *Trends in Cognitive Sciences* 7, págs. 308-312.
Steyvers, M., y Tenenbaum, J.B. (2005), «The large-scale structure of semantic networks: statistical analyses and a model of semantic growth», *Cognitive Science* 29, págs. 41-78.