

Masa crítica

La Bolsa, los atascos de la mañana, las absorciones entre empresas, las relaciones entre los actores de Hollywood... ¿Es posible que todo esto se rija por una serie de leyes naturales que no tenemos en cuenta? ¿Somos libres de crear nuestra propia sociedad o estamos atrapados por la "naturaleza humana"? ¿Hay algún orden en los cambios, el caos y la complejidad que nos rodean?

Philip Ball, célebre divulgador científico conocido por convertir los temas más complejos en las lecturas más agradables, se atreve a plantear estas preguntas; y a contar con un inesperado aliado para las respuestas: la física. Así, retoma el viaje intelectual que empezó Hobbes en el siglo XVII y lo lleva más allá, en un original *tour de force* que le valió el premio Aventis a la divulgación científica.

"Philip Ball vuelve a conseguir que la física resulte sexy"
Vanity Fair

Masa crítica

Cambio, caos y complejidad

PHILIP BALL

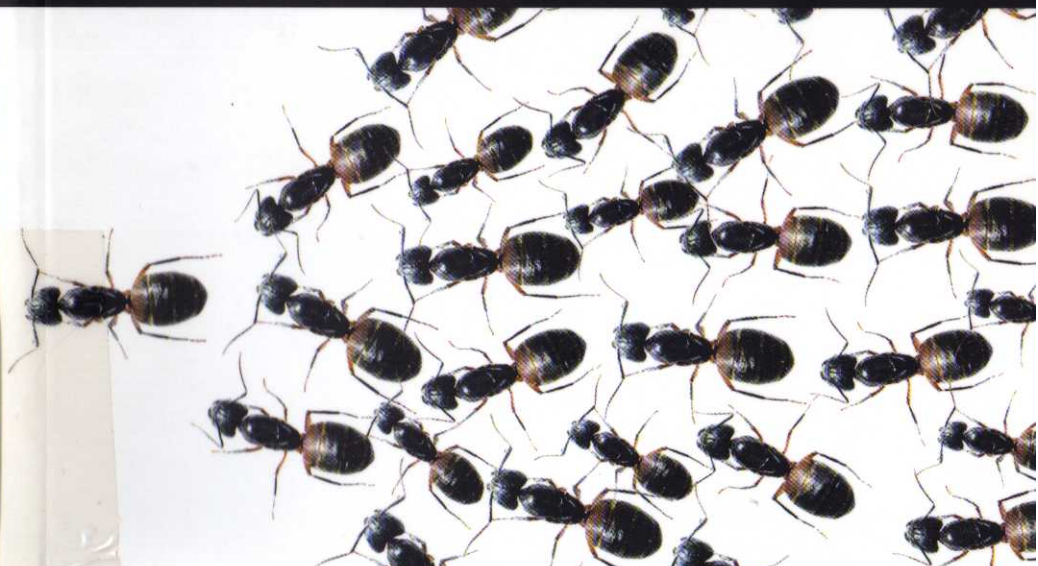
**TURNER
FONDO DE CULTURA ECONÓMICA**



COLECCIÓN NOEMA

PVP 32 €

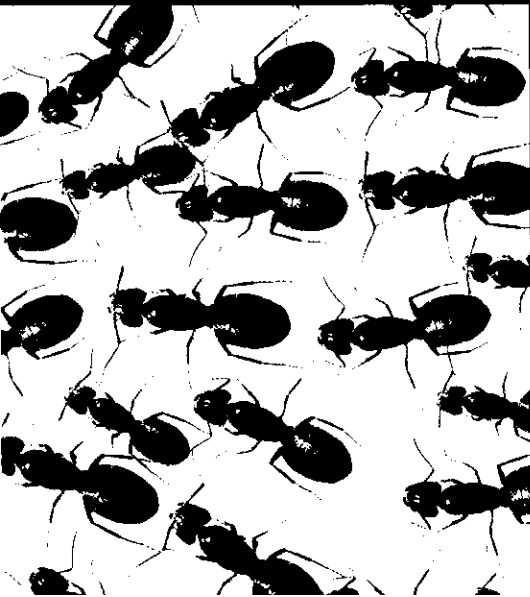
001
BAL
mas



Philip Ball (1962)

es químico y doctor en Física por la universidad de Bristol. Editor de la revista *Nature*, colabora regularmente con *New Scientist* y otras publicaciones científicas.

Es además miembro del departamento de Química del University College de Londres. Entre sus libros destacan *H₂O. Una biografía del agua* (Turner, 2007) y *La invención del color* (Turner, 2003).



Masa crítica

Cambio, caos y complejidad

PHILIP BALL

TRADUCCIÓN DE AMADO DIÉGUEZ

**TURNER
FONDO DE CULTURA ECONÓMICA**

ÍNDICE

Primera edición en castellano, junio de 2008
Título original: *Critical Mass. How One Thing Leads to Another*

Todos los derechos reservados.
No está permitida la reproducción total o parcial de la obra
ni su tratamiento o transmisión por cualquier medio o método
sin la autorización escrita de la editorial.

Copyright © Philip Ball, 2004. All rights reserved

De esta edición:

Para España:
D.R. © Turner Publicaciones S.L.
Rafael Calvo, 42
28010 Madrid
www.turnerlibros.com
ISBN: 978-84-7506-851-0



R. 202 658

Para América Latina:
D.R. © Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227
México D.F. 14200
www.fce.com.mx

Diseño de la colección: Enric Satué

Ilustración de cubierta: © Hans Neleman/Getty Images

Depósito Legal: S. 1.021-2008
Printed in Spain

Introducción.....	9
I Despertando al Leviatán	15
II Fuerzas menores	43
III La ley de los grandes números	61
IV El gran kaboom	99
V Del crecimiento y la forma	119
VI La marcha de la razón	141
VII En el camino	185
VIII Ritmos en el mercado	211
IX Agentes de la fortuna	241
X De proporción descomunal	267
XI Obra de muchas manos	295
XII Únase al club	319
XIII Multitudes en el valle de la decisión	349
XIV La colonización de la cultura	397
XV Qué pequeño es el mundo	415
XVI Tejiendo la red	437
XVII Orden en el Edén	473
XVIII La victoria de Pavlov	503
XIX ¿Hacia Utopía?	527

Epílogo	547
Notas	551
Bibliografía	567
Agradecimientos	581
Créditos fotográficos.....	583
Índice de nombres y materias	585

INTRODUCCIÓN *ARITMÉTICA POLÍTICA*

El 7 de noviembre de 1690, Guillermo III, nuevo rey de Inglaterra, recibió un manuscrito. Guillermo, príncipe de Orange, había derrocado el año anterior al católico e impopular Jacobo II mediante un golpe de estado incruento. En una época de tantos tumultos como aquélla, el monarca debió de solazarse con cierto volumen que se proponía demostrar que Inglaterra era un país poderoso, firme y seguro.

El autor de ese volumen era sir William Petty, ex catedrático de física de la Universidad de Oxford y médico general del ejército inglés en Irlanda. Petty había muerto en 1687, de modo que fue su hijo, el conde de Shelburne, quien entregó el manuscrito en la corte. En *Political Arithmetick* [Aritmética política],* que así se titulaba el libro, Petty se esforzaba por demostrar:

Que un país pequeño y poco poblado puede ser, gracias a su situación geográfica, política y comercial, equivalente en riqueza y fortaleza a un pueblo mucho más grande, con un territorio mucho mayor [...]

Que Francia no puede, en virtud de impedimentos perpetuos y naturales, ser más poderosa en el mar que los ingleses y los holandeses.

Que el pueblo y las posesiones del rey de Inglaterra son naturalmente casi tan considerables en riqueza y fortaleza como las de Francia.

Que lo que estorba la grandeza de Inglaterra es contingente y evitable.

* La traducción de la cita que sigue, como la de todas las que proceden de un texto original inglés, es mía. En aquellas citas donde el original estuviera en otro idioma distinto del inglés he buscado, cuando existe, la traducción directa al español; en los casos en los que no existe o ha resultado imposible encontrarla, he trasladado al español la traducción inglesa que recoge el autor. [N. del T.]

Que el poder y la riqueza de Inglaterra se han incrementado a lo largo de los últimos cuarenta años.

Que un diezmo del gasto general de los súbditos del rey de Inglaterra basta para mantener a cien mil hombres de a pie, a treinta mil jinetes y a cuarenta mil marineros, y para sufragar todos los demás gastos, ordinarios y extraordinarios, del gobierno, si ese diezmo fuera impuesto y recaudado.

Que entre los súbditos del rey de Inglaterra hay manos ociosas suficientes para conseguir dos millones al año, más de lo que ahora se consigue, y que hay empleos preparados, adecuados y suficientes para ese propósito.

Que hay dinero suficiente para gestionar el comercio de la nación.

Que los súbditos del rey de Inglaterra tienen reservas, competentes y convenientes, para dirigir los intercambios de todo el mundo comercial.¹

Inglaterra estaba llamada a la grandeza, en resumen. ¿Sobre qué base hacía Petty estas audaces afirmaciones? *Aritmética política* reclamaba la necesidad de convertir la política en ciencia. Al igual que la ley de la gravedad de Isaac Newton se apoya en última instancia en las mediciones cuantitativas y en las deducciones de los astrónomos Tycho Brahe y Johannes Kepler, Petty recurría a los números, de los cuales extraía evidencias de la saludable condición de la sociedad inglesa:

El método al que recurro para esto no es todavía muy conocido, porque, en lugar de emplear únicamente términos de comparación superlativos y argumentos intelectuales, he tomado la determinación (como espécimen derivado de la aritmética política, que durante tanto tiempo he investigado) de expresarme en términos de número, peso o medida; de emplear sólo argumentos de sentido y de considerar sólo las causas que tienen cimientos visibles en la naturaleza; dejando aquellas que dependan de las mudables mentes, opiniones, apetitos y pasiones de hombres en particular, a la consideración de otros; confesándome, en realidad, tan incapaz de hablar satisfactoriamente de estos campos (si es que puede llamárseles campos), como de anticipar el resultado de una tirada de un dado, de jugar al tenis, al billar o a los bolos

(sin mediar una larga práctica), en virtud de las ideas más elaboradas que se hayan escrito nunca en *De Projectilibus & Missilibus*, o de los ángulos de incidencia y reflexión.²

En otras palabras, aunque Petty confiesa conocer poco la mudable naturaleza humana, cree que se puede llegar a entender a la sociedad hasta el punto de poder medir y cuantificar su comportamiento. Gracias a la ciencia de la aritmética política, argumentaba, los dirigentes de una nación podrían evitar la irracionalidad del hombre. Además, esa ciencia podría emplearse para definir principios de gobierno verificables.

Cuánto le habría consternado a Petty saber que, trescientos años más tarde, quienes estudian la política desde un punto de vista científico lamentan todavía que los asuntos humanos sigan dominados por el capricho y los prejuicios y no por la razón y la lógica. En *Man, the State, and War [El hombre, el Estado y la guerra]* (1954), Kenneth Waltz expresa su esperanza de que, algún día, las relaciones internacionales puedan regirse por teorías racionales y no por la polémica y las creencias dogmáticas.

En ausencia de una teoría elaborada de la política internacional —afirma—, las causas que uno encuentra y los remedios que uno propone están con frecuencia más estrechamente relacionados con el temperamento y la formación que con los objetos y acontecimientos del mundo que nos rodea.³

Ciertamente, Waltz no es tan simple como Petty, que concibe una especie de física newtoniana de la sociedad. Pero los esfuerzos de Petty, que ahora nos parecen tristemente ingenuos, han encontrado eco en la física contemporánea. En las dos últimas décadas, algo extraordinario ha venido ocurriendo en este campo científico. Las herramientas, métodos e ideas desarrollados para comprender de qué forma se comporta el tejido material del universo encuentran aplicación en áreas para las cuales no fueron concebidos —y para las cuales pudiera parecer a primera vista que son ridículamente poco aptos—. La física empieza a encontrar un lugar en el campo de las ciencias sociales.

El presente libro trata de la forma en que se ha producido este proceso, por qué merece la pena tomárselo en serio y adónde podría llevar. Trata también acerca de los límites y advertencias que plantea una

física de la sociedad, disciplina que, por otro lado, resultaría extraordinariamente fácil aprovechar con fines espurios.

Es un lugar que ya hemos visitado. En la década de 1970, la teoría de las catástrofes de René Thom prometió, o eso sugería, explicar de qué forma un pequeño cambio podía provocar transformaciones súbitas de la sociedad. La iniciativa se atrofió rápidamente porque la teoría cualitativa y fenomenológica de Thom no ofrece una explicación satisfactoria de los mecanismos que impulsan los procesos que describe. Finalmente se ha demostrado que la teoría del caos, que maduró en los años ochenta, es mucho más robusta y permite entender de qué forma los sistemas complejos y en constante cambio (“dinámicos”) dejan de ser predecibles incluso aunque conozcamos con gran detalle sus estados iniciales. Algunos han defendido la teoría del caos como modelo para explicar la economía de mercado, y su idea de estados dinámicos estables, llamados atractores, parece explicar por qué ciertas formas de comportamiento u organización social siguen siendo inmunes a las pequeñas perturbaciones. Pero esa teoría no ha desarrollado nada ni remotamente parecido a una ciencia de la sociedad.

Hoy está en boga la tercera de las tres “ces”, la complejidad. Las palabras de moda son “emergencia” y “auto-organización”, porque la teoría de la complejidad se esfuerza por comprender de qué modo, a raíz de la interacción y de acuerdo a unas pocas normas muy simples, surgen el orden y la estabilidad.

La física de la que hablo en este libro no está relacionada con la idea de complejidad; en realidad, una y otra se solapan con frecuencia. Pero a menudo, lo que hoy se tiene por “ciencia de la complejidad” es algo mucho más antiguo, aunque se haya vestido a la última. La física lleva cien años estudiando las cuestiones principales de la teoría de la complejidad, así que ha desarrollado toda una panoplia de técnicas y conceptos a los cuales la *nueva* teoría sólo ha añadido un puñado de hallazgos. En la raíz de este tipo de física se encuentra un fenómeno que explica por qué esa disciplina puede tener algo que decir sobre la sociedad: es una ciencia del *comportamiento colectivo*. A primera vista, no resulta muy obvio por qué las principales propiedades de las insensatas partículas de la materia deberían guardar alguna relación con el comportamiento de los humanos en masa, pero, con frecuencia, los físicos han descubierto que los sistemas cuyas partes integrantes tienen capacidad para actuar de

forma colectiva comparten rasgos invariables incluso cuando todo parece indicar que no tienen nada en común.

Teniendo esto bien presente, espero demostrar que la nueva física de la sociedad puede acomodarse precisamente a esas características de la humanidad que a Petty le pareció oportuno excluir de su análisis: “las mudables mentes, opiniones, apetitos y pasiones de hombres en particular”. Quiero sugerir que, incluso teniendo en cuenta nuestra lamentable ignorancia de las causas que hacen que los humanos nos comportemos como lo hacemos, es posible hacer algunas predicciones sobre la sociedad aunque sea contra la idea de libre albedrío y, quizás, incluso, arrojar alguna luz sobre los límites de ese libre albedrío.

William Petty pensaba que la cuantificación era suficiente para llamar ciencia a su aritmética política. Sin embargo, Thomas Hobbes, su coetáneo, tenía una idea más profunda de lo que una ciencia de la sociedad ha de ser. Esa ciencia debe ir más allá de las cifras, decía Hobbes, y abordar el complicado asunto de los mecanismos. Hay que preguntarse no sólo *cómo* se comporta la sociedad, sino *por qué*. En la primera parte de este libro veremos adónde nos conducen, en nuestra comprensión de la sociedad, la aritmética de Petty y la visión mecanicista de Hobbes, y cómo ambas perspectivas –lo cual resulta de lo más curioso– revirtieron en la ciencia física del siglo XIX. Veremos también de qué forma la física se ocupa de los sistemas de muchos componentes, que interactúan entre sí simultáneamente, y por qué ese aparente caos deriva en un comportamiento regular y estadísticamente predecible.

Tratar a las personas como si fueran materia tan insensata (o, más bien, insensata *en apariencia*) resulta polémico, y es por eso que hay que abordar con cautela cualquier modelo de la sociedad basado en la física, mostrando en primer lugar por qué la vida (estoy tentado de decir: “tan sólo la vida”) no tiene por qué suponer un límite para la aplicación de la física estadística. Hoy la bacteria, mañana el mundo.

Pero el lector no va a encontrar en este libro una “teoría de la sociedad”. En realidad, aunque tiene su utilidad, es posible que la propensión de la ciencia moderna a las “teorías unificadas” –a grandes marcos de referencia que lo abarcan todo– sea poco saludable. Si existe algo llamado “física de la sociedad”, no tiene forma de ecuación universal en la que introducir unos números y de la cual ha de surgir una descripción determinista del comportamiento social. Hay que defender el caso

mediante ejemplos y adaptar sutilmente las herramientas a cada propósito concreto. El presente estudio no es exhaustivo en modo alguno, pero es preciso detenerse en lo que la física tiene que decir sobre el modo en que las personas nos movemos en los espacios abiertos, sobre la forma en que tomamos decisiones y votamos, y acerca de nuestra manera de establecer alianzas, formar grupos y fundar empresas. Veremos cómo, mediante la física, llegaron a comprenderse algunos aspectos del comportamiento de los mercados y se reveló la estructura reticular oculta de las relaciones sociales y empresariales. Descubriremos la física, si es que se le puede llamar así, de los conflictos y la cooperación política.

Pero a todo esto subyace una cuestión más difícil: ¿nos ayuda la física tan sólo a explicar y comprender o podemos aprovecharla para anticipar los problemas y, por tanto, evitarlos, para mejorar nuestras sociedades, para que el mundo sea mejor y más seguro? ¿O todo esto no es más que otro sueño destinado al ya rebosante pozo de las utopías pasadas?

I
DESPERTANDO AL LEVIATÁN
EL MUNDO BRUTAL DE THOMAS HOBBS

Un ensayo político, moral, una reseña crítica, incluso un manual para hablar en público podrían muy bien, y lo mismo ocurre con otras cosas, ser escritos por un geómetra.

BERNARD FONTENELLE, secretario
de la Académie Française, a finales
del siglo XVII.¹

Tengo la impresión -digo- de que el mundo se ha vuelto tan mecánico que pronto acabaremos por avergonzarnos de él; conseguirán que el mundo sea en grande lo que un reloj es en pequeño: algo muy regular que depende sólo de la justa disposición de las distintas partes de su mecanismo. Os lo ruego, señora, contestadme: ¿no teníais, antiguamente, una idea más sublime del universo?

BERNARD FONTENELLE
(1686)²

Un mito social suele quedar al descubierto cuando el propio mito empieza a menguar.

ROBERT M. MACIVER
(1947)³

Ha dejado de ser útil preguntarse "¿Quién gobierna Inglaterra?". Analizar.

Ejercicio en el libro de texto
de Stephen Cotgrove (1967)⁴

Los hermanos lucharán
 Y se matarán [...]
 Los hombres conocerán la miseria [...]
 Edad de hachas, edad de espadas,
 Habrá que partir los escudos,
 La edad del viento, la edad del lobo,
 Antes de que el mundo acabe.⁵

Así es como los nórdicos imaginaban Ragnarök, el Crepúsculo de los Dioses, pero en su exilio político en Francia (1651), Thomas Hobbes debió de pensar que lo conocía. En Naseby y Marston Moor, en Newbury y Edgehill, la recia pequeña nobleza de Inglaterra se había masacrado hasta el fin. Oliver Cromwell reinaba como Lord Protector de un país conmocionado por haberse erigido en república y haber cercenado el linaje monárquico con el hacha del verdugo.

A diferencia de lo que ocurría entre quienes lo hicieron en la Revolución Francesa o en la cruenta guerra que en Estados Unidos libraron el Norte contra el Sur, entre los ingleses que combatieron en la guerra civil apenas existían diferencias ideológicas claras. Los realistas lucharon bajo la bandera del rey, los cabezas redondas* también juraron fidelidad “al Rey y al Parlamento”. Pese a su presunta arrogancia, Carlos I no deseaba vivir al margen de la constitución y de las leyes de la tierra. Ambos bandos eran anglicanos y recelaban de los papistas. Había aristócratas en las filas del Parlamento y gente corriente entre los caballeros. Muchos que combatían y se mataban habrían encontrado pocos motivos de disputa si en lugar de espadas hubieran esgrimido palabras.

Un conflicto de ese cariz no podía ser otra cosa que una receta para la confusión en cuanto la decapitación del rey precipitó su final. Violentado con el poder que el destino le había deparado, Cromwell buscó en vano una solución constitucional que garantizara la estabilidad. Fueron tantas las competencias que los *ironsides* o “costillas de hierro”** otorga-

* En inglés, *roundheads*, los soldados que, frente a los “realistas”, apoyaron al Parlamento durante la guerra civil inglesa (1640-1660). [N. del T.]

** Los “costillas de hierro” son los soldados del Nuevo Modelo de Ejército de Cromwell. [N. del T.]

ron al Lord Protector, que contó con mayor libertad de la que había gozado ningún gobernante británico hasta entonces y de la que haya gozado después –libertad a la que, por otro lado, habría renunciado gustosamente de haber tenido la sensación de que podía hacerlo–. Repetidas veces fundó parlamentos en los que descargar parte de su autoridad sólo para disolverlos porque no le parecían merecedores de la responsabilidad que les había cedido.

En aquellos tiempos tumultuosos, nadie podía estar seguro de que los amigos no se convirtieran en enemigos, de que los viejos adversarios no se tornaran aliados. El Parlamento Presbiteriano de Escocia, cuya feroz oposición a Carlos I había precipitado el conflicto entre el Parlamento y la Corona en la década de 1630, combatía en 1653 contra Cromwell por defender los derechos de Carlos II. El propio Cromwell fue expulsado de la Cámara de los Comunes del Parlamento que había luchado por instaurar y se esforzó por mantener el control del monstruoso ejército que él mismo había creado. En 1658, tras la muerte del Lord Protector, ese mismo ejército reinstauró el Parlamento y cavó la fosa del protectorado. John Lambert llevó a las tropas a la victoria en la revuelta realista de 1659 y, pese a ello, urdió un complot para que Carlos II recuperase el trono (y al mismo tiempo y muy convenientemente, para convertir al nuevo rey en cuñado de su hija). Sin embargo, al final, en 1660, fue derrotando a Lambert como George Monk, un viejo realista, consiguió reinstaurar el Parlamento, un Parlamento nuevo que acabaría coronando al monarca exiliado.

¿Qué podía desear el pueblo llano más que la estabilidad? Veinte años de guerra y cambios de fortuna convencieron a todos de que sólo la lograrían con la monarquía; y Carlos II, que ocho años antes había escapado por muy poco de las tiernas mercedes de los *ironsides*, encontró al volver de Francia a un ejército leal y a una población feliz por su regreso.

No hay forma de comprender la extraordinaria búsqueda en la que se embarcó Thomas Hobbes (1588-1679) si antes no se conoce siquiera someramente el contexto histórico en que se produjo. El 30 de enero de 1649, varios siglos de gobierno monárquico sobre una sociedad jerarquizada quedaron gráficamente desmembrados tras la caída de un hacha. Un sistema de gobierno apoyado en imperativos divinos y morales había demostrado su arbitrariedad y contingencia. Casi todas las ideas políti-

cas que habrían de oírse en los siglos posteriores se oyeron ya en la Inglaterra del siglo XVII, y muchas de ellas se pusieron en práctica. Soldados y trabajadores se convirtieron en *levellers* y en *diggers** y defendieron los principios socialistas de igualdad y el fin de la propiedad privada de la tierra. El propio Cromwell parece haber flirteado con la idea de un gobierno elegido democráticamente, si bien la mayor parte de su protectorado se pareció más a una dictadura militar. En los años anteriores a la guerra civil, Carlos II disolvió el Parlamento e instigó al apoyo de la monarquía absoluta.

¿Qué sistema debía adoptar la sociedad? Era una pregunta candente. Aunque para la mayoría la guerra entre naciones era el estado natural de las cosas, apenas afectaba al común de la gente más allá de la imposición de nuevas tasas y tributos. Las luchas intestinas, sin embargo, fueron agónicas. La guerra civil inglesa, en la que ambos bandos restringieron los ataques a la población civil, fue mala; pero en muchos estados alemanes la guerra de los Treinta Años, que arrasaba Europa desde la primera parte del siglo, mató a uno de cada tres habitantes. Para Hobbes, como para muchos de sus coetáneos, la paz habría merecido la pena casi a cualquier precio.

Las miserias de Inglaterra eran un síntoma de los cambios más profundos que experimentaba el mundo occidental. El régimen feudal de la Edad Media cedía ante una clase media próspera, de cuyas vigorosas y ambiciosas filas surgían parlamentarios que ya no se sentían obligados a ceder ante los caprichos de la corona. La monarquía, con sus consejeros y su Cámara estrellada,** remitía al carácter medieval de la sociedad isabelina, pero el espíritu de la época deseaba un poder más democrático y menos ambicioso. La Reforma de Lutero y Calvino había partido a Europa en dos, ninguna Iglesia volvería a regir al conjunto de la cristiandad. La reacción al asalto de la tradición eclesiástica —impulsado no sólo por la herejía luterana, sino por el humanismo renacentista— dio pie a la Contrarreforma, al Concilio de Trento, a la Compañía de Jesús

* “Niveladores” y “cavadores”, respectivamente, son grupos políticos heterogéneos y poco organizados surgidos en el seno del Nuevo Modelo de Ejército de Cromwell. El autor esboza a continuación su ideología. [N. del T.]

** En inglés *Star Chamber*, sala del palacio real de Westminster donde, entre 1487 y 1641, se juzgaban los casos de calumnia política y traición. [N. del T.]

y al celo persecutorio de la Inquisición. A mayor diversidad religiosa, mayor intolerancia; o esa impresión daba.

De ese fermento emergieron ideas sobre la naturaleza del mundo que, en última instancia, resultaron tan desafiantes como las proclamas que Lutero clavó en la puerta de la iglesia de Wittenberg. Copérnico tuvo suerte de formular su teoría heliocéntrica —es la tierra la que se mueve alrededor del sol— a principios del siglo XVI, antes de la Contrarreforma; su primer manuscrito, que circuló en torno a 1530, contó incluso con la sanción papal. Sin embargo, en 1543, el editor Andreas Osiander publicó póstumamente su tratado completo con un prefacio con el que pretendió evitar la condena eclesiástica afirmando que había que tomarse la nueva visión de los cuerpos celestes como una magnífica ficción matemática. Que Galileo se atreviera a desafiar a la autoridad papal con la misma idea, y con pie más firme, dio lugar a la leyenda. La Inquisición le condenó en 1616 y le obligó a retractarse en 1633. Algo más tarde, a mediados del siglo XVII, con René Descartes enfrascado en la revitalización de la vieja teoría atómica de los griegos e Isaac Newton a punto de ser admitido en el Trinity College de Cambridge, el destierro de la magia y la superstición ante el empuje de la ciencia mecanicista pareció inevitable.

El *Leviatán*, la obra maestra de Hobbes, fue un intento de desarrollar una teoría política a partir de esa visión mecanicista del mundo. El filósofo inglés se fijó un objetivo que hoy nos parece absurdamente ambicioso, aunque en el alba de la Ilustración debió de parecer un matrimonio natural. Hobbes pretendía deducir, mediante una lógica y una razón no menos rigurosas que las que Galileo empleó para comprender las leyes del movimiento, de qué modo debía gobernarse la humanidad. Empezando por lo que consideraba axiomas evidentes e irreductibles, quería formular una ciencia de las relaciones humanas, políticas y sociales.

Desde un punto de vista actual, resulta muy difícil valorar la magnitud no sólo del reto, sino del cambio de perspectiva. Nunca han faltado teorías sobre el gobierno y la organización social. Casi sin excepción, en las propuestas anteriores a Hobbes —y en muchas de las posteriores—, quienes las encargaban jugaban con ventaja. Reyes, reinas y emperadores pretendían justificar la monarquía absoluta apelando al derecho divino. La Iglesia católica y romana no fue la primera teocracia que se encomendó exclusivamente al juicio de Dios. En su *República*, uno de

los primeros modelos utópicos, Platón, mediante fríos y confiados razonamientos, defendía un estado en el que los filósofos ocuparían el lugar más alto de la jerarquía. El Parlamento (rebelde) inglés de principios de la década de 1640 exigió que el monarca le cediera prácticamente todo el poder. Al parecer, siempre es posible encontrar argumentos para ponerse a uno mismo en lo más alto del escalafón.

Hobbes no hizo eso. Se propuso aplicar el método de la ciencia teórica: formular algunos principios fundamentales y ver adónde le conducían. En teoría, cualquier conclusión era posible. Analizando la naturaleza y las relaciones humanas, pudo haber llegado a la conclusión de que la sociedad más estable es la que se basa en lo que ahora llamamos comunismo, o democracia, o fascismo. En la práctica, sus razonamientos acabaron en lo que probablemente prefiguraba desde un principio –lo cual induce a pensar que su método no era tan objetivo como quiso hacerlos creer–. Pese a todo, su decisión de dar al traste con la parcialidad y confiar únicamente en la lógica es lo que convierte su *Leviatán* en un hito en la historia de la teoría política.

Pero *Leviatán* es algo más. Hoy se considera que la obra maestra de Hobbes es muy importante desde un punto de vista histórico e incluso filosófico, pero la ciencia política se ha convertido en una bestia muy distinta y ya nadie sostiene en serio la argumentación de Hobbes. Además, no debería, porque, al menos en cierto sentido, sus postulados son un producto de su época. Pero *Leviatán* es un antecedente directo y en muchos casos asombrosamente profético de alguno de los revolucionarios caminos que está adoptando la física moderna. Los científicos empiezan a darse cuenta de que el marco teórico que sostiene la física contemporánea puede adaptarse para describir las estructuras y los comportamientos sociales en ámbitos que van desde el tráfico a las fluctuaciones de la economía y la organización de las empresas.

Este marco teórico no es tan abrumador como podría parecer. Al contrario de lo que podría imaginarse a partir de la concepción popular de la física moderna, no tenemos por qué escarbar en las imponderables paradojas de la teoría cuántica o en las insondables revelaciones de la teoría de la relatividad o en los orígenes del universo en el Big Bang, a fin de comprender las ideas básicas que hay detrás de estas teorías. No, mi perspectiva se basa en el comportamiento de las sustancias y los objetos cotidianos: del agua, la arena, los imanes y los cristales. Pero,

¿qué pueden decirnos estas cosas sobre el modo en que están organizadas nuestras sociedades? Da la casualidad de que mucho.

Hobbes no tenía ni la más ligera sospecha, pero compartía la fe que tienen los físicos modernos en que, al fin y al cabo, el comportamiento humano no es tan complejo como para que no se pueda comprender sobre la base de unos pocos y sencillos postulados o mediante lo que podríamos llamar *fuerzas naturales*. Tras contemplar el tumultuoso paisaje político de su país, Hobbes no pudo tener más claro cuál era la fuerza principal del proceso: el deseo de poder.

DESPIERTA EL LEVIATÁN

Thomas Hobbes nunca había sido capaz de dar nada por sentado. Su padre era un párroco irascible y poco cultivado, un borracho que abandonó a su familia cuando Thomas tenía dieciséis años y tuvo una muerte “oscura”. Pero esto causó a su hijo pocos aprietos, porque, desde muy joven, Thomas recibió el apoyo y el aliento de su tío Francis, fabricante de guantes y concejal de Malmesbury, un hombre rico y sin duda mucho más respetable que su padre. Francis siguió con ojo vigilante la educación de su sobrino, contribuyendo con ello a nutrir un intelecto evidentemente privilegiado: a los catorce años, Thomas fue admitido en el Magdalen College de Oxford, y ya había traducido *Medea* de Sófocles del griego al latín. Fueron tan excelentes sus resultados en la universidad que, al graduarse, lo recomendaron como tutor del hijo del conde de Devonshire (que sólo tenía tres años menos que Thomas). En este empleo, Hobbes pudo continuar sus estudios de los clásicos. Con veintitantos años fue secretario de Francis Bacon (1561-1626), cuyos intereses abarcaban desde las ciencias naturales y la filosofía a la política y la ética. Durante este tiempo y hasta la muerte de Bacon, Hobbes no demostró ninguna inclinación evidente por la ciencia, pero el sesgo racional del pensamiento de Bacon dejó una huella clara en él.

Hasta 1629, cuando tenía ya cuarenta años, Hobbes, que se había dedicado por completo a la cultura clásica, no abrió los ojos a la potencia del razonamiento científico y matemático. Según cuenta la leyenda, encontrándose en una biblioteca, vio por casualidad un libro abierto y quedó transfigurado. El libro era *Elementos de geometría*, de Euclides, y Hobbes

quiso comprobar uno de sus principios. “¡Pero, por Dios, esto es imposible!”, exclamó, y pronto se convenció de lo contrario. Como afirma un coetáneo de Hobbes, el chismoso biógrafo John Aubrey,

Y lee la demostración, que le remite a una proposición; luego lee esa proposición, que le remite a una nueva proposición, que también lee, y *sic deinceps* [así sucesivamente], de modo que al final se convence de esa verdad mediante su demostración. Y se enamora de la geometría.⁶

Hobbes se quedó muy impresionado al comprobar de qué forma esa clase de razonamiento deductivo, avanzando a base de proposiciones elementales, permitía a los geómetras llegar a conclusiones ineluctables con las que toda persona honrada y perspicaz estaría de acuerdo. Era una receta para la certidumbre.

En general, los axiomas de la geometría son principios que pocas personas tendrían problemas en suponer. Afirman cosas como “dos líneas rectas no pueden contener un área”. Con frecuencia, podemos convencernos de su validez tan sólo con bocetos. Otros campos de investigación luchan por tener puntos de partida tan evidentes como éste. “Pienso, luego existo” pudo convencer a Descartes de que, como axioma, es “tan sólido y tan cierto que las suposiciones más extravagantes de los escépticos no podían ponerlo en tela de juicio”, pero, en realidad, cada término de esa sentencia está abierto al debate y no tiene la potencia visual de los primeros principios de la geometría.

Hobbes se entusiasmó lo bastante para convertirse en aspirante a geómetra, pero nunca llegó a dominar la disciplina. Por medio de torpes errores se convenció de que había resuelto el viejo rompecabezas de la geometría, “la cuadratura del círculo” (cosa en verdad imposible). Pero no era ésta su principal preocupación. En la década de 1630, las tensiones entre la corona y los comunes llevaron a Carlos I a disolver el Parlamento y a embarcarse en un periodo de “Gobierno Personal” que duró once años. En medio de una sociedad inestable, Hobbes quería hallar una teoría de gobierno con credenciales tan incontrovertibles como las de la geometría euclidiana. En primer lugar necesitaba una hipótesis fundamental del comportamiento humano que a su vez estuviera basada en los cimientos de la ciencia. Existía un hombre que había ahondado

en esos cimientos más profundamente que cualquier otro. En la primavera de 1636, Hobbes viajó a Florencia para conocer a Galileo.

Las leyes fundamentales que describen el movimiento de los objetos en el espacio se llaman leyes de Newton, porque fue sir Isaac el primero que las formuló con claridad. Pero el gigante monumental sobre cuyos hombros se puso en pie Newton fue Galileo Galilei (1564-1642), que sentó las bases de la física mecánica moderna. Galileo habló al mundo de la caída de los cuerpos, que, dijo, se aceleran a velocidad constante cuando caen (si no se tiene en cuenta el efecto de la resistencia del aire). Y con su ley de la inercia, Galileo fue más allá del “sentido común” de Aristóteles (384-322 a. de C.). El sabio griego decía que hay que empujar continuamente un objeto para que no se detenga; por el contrario, dijo Galileo, en ausencia de ninguna fuerza, un objeto se moverá de forma continua e indefinidamente en una línea recta y a velocidad constante.

Aristóteles adoptó el punto de vista del “sentido común”, porque su proposición corresponde a lo que todos los días todos nosotros experimentamos en la vida cotidiana. Si dejamos de pedalear, la bicicleta se para. Sin embargo, Galileo se dio cuenta de que eso ocurre porque, en la naturaleza, la fricción nos ralentiza. Si eliminamos todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, incluida la gravedad y la fricción, el estado natural del cuerpo es el movimiento en una sola dirección y a velocidad constante. Se trata de una teoría de verdadero calado, porque, más allá de las limitaciones prácticas de la época de Galileo, apunta una verdad simple y hermosa. (Hasta 1654 no se inventó una bomba de aire que permitiera crear un vacío y, por tanto, eliminar la resistencia del aire.)

La ley de la inercia de Galileo es, sin duda, una de las leyes más importantes de la naturaleza. Al conocer al gran hombre, Hobbes se convenció de que debía ser el axioma que estaba buscando. El movimiento constante era el estado natural de las cosas, incluidas las personas. Todas las sensaciones y emociones humanas, concluyó, eran resultado del movimiento. A partir de este principio básico, Hobbes progresaría hasta una teoría de la sociedad.

Pero, ¿qué quería decir Hobbes exactamente con su suposición? Desde una mentalidad moderna, la suya es una descripción fría y sin alma (por no decir oscura) de la naturaleza humana. Para él, una persona es un mecanismo sofisticado dominado por fuerzas externas. La máquina persona está compuesta no sólo del cuerpo, con sus nervios, músculos y órga-

nos sensoriales, sino también de la mente, con su imaginación, memoria y razón. La mente no es más que una máquina calculadora –un ordenador–. Las calculadoras fueron muy populares en el siglo XVII: el matemático escocés John Napier (1550-1617) diseñó una, y lo mismo hizo el filósofo y matemático francés Blaise Pascal (1623-1662). Eran artilugios que sumaban y restaban números. Esto, afirmó Hobbes, es también cuanto la mente hace:

Cuando un hombre *razona*, no hace otra cosa que concebir una suma total, de la *adición* de diversas parcelas; o concebir una resta, de la *sustracción* de una suma de otra [...] Porque la RAZÓN [...] no es más que *cálculo*.⁷

Por otra parte, el cuerpo no es más que un sistema de miembros unidos movido por los hilos y las poleas de los músculos y los nervios. El hombre es un autómeta.

De hecho, Hobbes sostuvo que el ingenio mecánico y autómeta que crearon algunos inventores de la época estaba dotado de una especie de vida en estado primitivo. Él no veía nada misterioso ni turbador en esa idea. Otros eran menos optimistas: la Inquisición española encarceló a algunos fabricantes del autómeta sobre la base de que habían experimentado con brujería y magia negra.

Lo que impelía a la acción a las personas mecánicas de Hobbes no eran los estímulos externos que llegaban al cerebro a través de los sentidos. Además, estaban imbuidas de una compulsión interna que les mantenía en la acción. Porque, ¿qué es la muerte sino inmovilidad? Y, ¿qué persona no evita la muerte? “Todo hombre –afirmó– [...] rehuye [...] la muerte, y lo hace llevado por cierto impulso de la naturaleza, el mismo que hace que las piedras caigan”.⁸

Hobbes divide las voliciones de la humanidad en “apetitos” y “aversiones”: el deseo de buscar formas para que el movimiento continúe y de evitar todo lo que lo obstruye. Hay apetitos innatos, como el hambre; otros se aprenden mediante la experiencia. Para decidir una acción, sopesamos la importancia de apetitos y aversiones y actuamos en consecuencia.

Lo que Hobbes quiere decir por “movimiento” es un poco vago porque, dicho de un modo sencillo, no pretende dar a entender que las

personas siempre queremos movernos sin parar. El movimiento es más bien una especie de libertad –libertad para movernos a voluntad–. Todo lo que impide la libertad impide el movimiento. Aunque un hombre esté sentado e inmóvil, su mente puede estar en furioso movimiento: la libertad para pensar también es un deseo innato.

¿Qué espacio queda para el libre albedrío en una descripción tan mecanicista? Según Hobbes, ninguno –era un determinista estricto–. Los seres humanos somos marionetas cuyos hilos manejan las fuerzas del mundo. Pero él no veía nada intolerable en este cuadro desolador. Al fin y al cabo, creía que había llegado a este postulado básico e indiscutible de la naturaleza humana por *introspección*, reflexionando sobre su propia naturaleza. La primera marioneta que examinó fue él mismo:

todo aquel que mire en su interior y considere qué hace cuando *piensa, opina, razona, espera, teme*, etcétera, y sobre qué bases, leerá y comprenderá los pensamientos y pasiones de otros hombres en ocasiones semejantes.⁹

LA FILOSOFÍA MECANICISTA

Si hoy nos estremece este concepto de la humanidad es, en parte, porque consideramos que los ingenios mecánicos son toscos y torpes. Existen en la actualidad muchos filósofos y científicos materialistas que creen que el cerebro es una especie de inmenso y blando ordenador cuyos secretos no residen en nada más que en la extraordinaria interconectividad de sus billones de interconexiones biológicas. Como versión superior de nuestro artefacto cultural más avanzado, esta visión del cerebro no es rara ni excéntrica.

Los intelectuales del siglo XVII opinaban lo mismo del reloj, guardián fiel del tiempo que, en aquel entonces, era una innovación reciente. La imagen del hombre como ingenio mecánico no resultaba grosera; por el contrario, demostraba hasta qué extremo era maravilloso el modo de ser de las personas. Descartes dijo:

De igual modo que un reloj, compuesto de ruedas y contrapesos, no observa las leyes de la naturaleza ni cuando está mal hecho y

señala la hora incorrectamente ni cuando satisface el deseo de su fabricante en todos los aspectos, consideramos el cuerpo humano como una especie de máquina compuesta de huesos, nervios, músculos, venas, sangre y piel que, aunque no tuviera mente, seguiría demostrando el mismo movimiento que en el presente se manifiesta de forma voluntaria.¹⁰

Y de una cosa a la otra. Si la humanidad era un mecanismo de relojería, también lo era el universo. Los planetas y las estrellas se movían como los engranajes de un reloj ideado por Dios, el relojero cósmico. Esto puso en marcha el debate acerca de si el genio de Dios le había dado motivos para intervenir sobre el mundo una vez éste estuvo “forjado”, lo cual culminó en una desafortunada discusión entre Gottfried Leibniz e Isaac Newton (quien discutía acaloradamente con frecuencia).

Y si el universo era un mecanismo de relojería, la forma de entenderlo era desmontarlo pieza por pieza y aplicarle la metodología reduccionista de la ciencia. Fue precisamente este enfoque el que Hobbes escogió para analizar el comportamiento de la sociedad: la dividiría en sus partes constituyentes y advertiría en sus movimientos las fuerzas causantes. Ésta fue su intención en su obra anterior al *Leviatán*, *De cive [Del ciudadano]*, publicada en 1642, que compartía muchas de sus ideas:

Porque todo se comprende mejor por medio de las causas que lo constituyen. Porque igual que en un reloj, o que con un motor pequeño, la materia, la figura y el movimiento de las ruedas no pueden conocerse a no ser que se las desmonte y examine por separado.¹¹

Para entonces, Hobbes se había unido a otros simpatizantes realistas en el exilio de París. Percibía lo que flotaba en el aire de la Inglaterra de 1640, año en que Carlos I se vio forzado a reconocer al Parlamento a fin de recaudar los impuestos necesarios para suprimir la rebelión de Escocia. Tan antirrealista era el nuevo Parlamento Breve, cuyos miembros se habían consumido en el descontento del destierro durante once años, que el rey no tardó en disolverlo otra vez —sólo para resucitarlo de nuevo cuando el ejército escocés alcanzó Durham en su marcha hacia el sur—. A partir de entonces, todo transcurrió en una cuesta abajo que precipitó

el estallido de la guerra civil en 1642. Por temor a que sus escritos políticos atrajeran la censura (o algo peor) del belicoso Parlamento Breve de 1640, Hobbes partió hacia Francia.

Hobbes formuló la mayoría de sus ideas sobre “el gobierno civil y los deberes de sus súbditos” antes de que empezase la guerra, pero su inminente proyecto empezaba a ser urgente. En principio tuvo intención de escribir una tesis de tres partes que empezaba con la física tradicional, extendía su aplicación a la naturaleza de la humanidad, y sólo más tarde desarrollaba una teoría “científica” del gobierno. Pero, como más tarde él mismo explicó, las circunstancias aceleraron la redacción de *De cive*:

en los años previos a la guerra civil, mi país hervía con preguntas concernientes a los derechos de dominio y a la obediencia debida de los súbditos, verdaderos precursores de la guerra. Y ésta fue la causa que maduró y cosechó de mí esta tercera parte.¹²

En Francia, Hobbes se unió al círculo de los filósofos mecanicistas franceses, a quienes conoció durante su primer viaje por Europa, entre 1634 y 1637. Entre ellos se encontraban Marin Mersenne (1588-1648) y Pierre Gassendi (1592-1655), colegas de Descartes y dos de los partidarios más entusiastas de la visión mecanicista del mundo. En este entorno amistoso, Hobbes depuró su teoría de la naturaleza humana y consiguió que avanzara hasta deducir las consecuencias de la estructura cívica. El *Leviatán* fue publicado en 1651 y Hobbes fue a regalárselo al fugitivo Carlos II, que se encontraba en el exilio y a quien, años atrás, el filósofo había enseñado matemáticas. Nadie, ni realista ni cabeza redonda, recibió sus opiniones de buen grado.

LOS UTÓPICOS

Hobbes no fue quien primero imaginó una utopía basada en razonamientos científicos. Los filósofos-gobernantes de la república de Platón llevan una vida sencilla y no conocen la propiedad privada, pero tienen poder absoluto sobre las clases inferiores compuestas por los soldados y el vulgo, que a Platón le importan muy poco. La de Platón es una utopía para aristócratas; la masa bien puede vivir en un estado totalitario,

aunque benevolente. Pero el término “utopía” se deriva del país imaginario diseñado por un abogado: el sabio Tomás Moro (1478-1535). En su libro, *Utopía* (1518), un marinero llamado Raphael Hythloday describe la isla epónima en la que ha habitado cinco años tras llegar por casualidad. El significado del nombre es objeto de polémica, pero normalmente se afirma que es “buen lugar” o “ningún lugar”.

En la Utopía de Tomás Moro, todo es ideal. La propiedad privada no existe: los habitantes de Utopía viven en casas idénticas y cada diez años se cambian para descartar toda idea de propiedad. Todos los hombres se visten igual, todas las mujeres se visten igual, con ropa sencilla; son inmunes a la moda. Todos trabajan –lo suficiente pero no demasiado– y reciben una educación, aunque ésta no es obligatoria. Se toleran la mayoría de las religiones y las personas viven con moderación y modestia. Es una visión por un lado refrescantemente liberal, igualitaria y justa, y, por otro, muy desabrida y carente de vitalidad.

La versión de Francis Bacon de la sociedad perfecta giraba en torno a la ciencia. No llegó a concluir su libro, *La nueva Atlántida*, que fue publicado incompleto un año después de su muerte. El título remite a Platón, quien en sus diálogos menciona varias veces la legendaria civilización perdida. La idea de Bacon recuerda a la de Moro: unos marineros europeos se desvían de su rumbo en el Océano Pacífico y van a parar a Bensalem (palabra hebrea que significa “hijo de la paz”; implícitamente quiere sugerirse que se trata de la “Nueva Jerusalén”), una isla desconocida. En Bensalem habita una sociedad cristiana, una sociedad acogedora, amable y compasiva pero también ferozmente patriarcal y jerárquica. En ella ocupa un lugar central la Casa de Salomón, una institución consagrada a la ciencia y a la búsqueda de nuevos conocimientos. Los científicos (los Padres) visten y actúan más bien como sacerdotes y cuentan con enormes recursos para llevar a cabo sus investigaciones. Existen laboratorios donde la naturaleza no sólo es examinada, sino también imitada y manipulada. Hay paisajes artificiales parecidos a minas, que reproducen las condiciones en las que se forman los metales y los minerales; también se idean y crean nuevas especies. “Y esto no lo hacemos al azar –explica un Padre–, sino que sabemos de antemano de qué materia y composición, de qué clase serán las criaturas que surjan”.¹³

La Casa de Salomón recuerda en muchos sentidos a una institución científica moderna, aunque libre de toda restricción ética. Algunos podrían

ver en ella el proyecto de esos laboratorios biotecnológicos en los que la vida es diseccionada, estudiada y reconstruida. Los Padres prestan juramento de privacidad y revelan sus hallazgos únicamente si les place. Resulta difícil imaginar que Bacon tuviera mayores dificultades con las patentes genéticas de los laboratorios modernos.

Pero la Bensalem de Bacon es una sociedad esencialmente arbitraria; una visión de lo que su autor consideraba deseable, no una sociedad basada en los principios de la ciencia, sino consagrada a ellos. Ésa es la razón de que el *Leviatán* sea tan original. Porque la obra de Hobbes no describe una sociedad precocinada y conformada por los gustos del filósofo, sino construida, con escrupulosa lógica, a partir de una visión mecanicista del comportamiento humano.

Pero hay que precisar. A Hobbes no le interesaba especialmente la psicología, ni pretendía deducir de qué forma responderían las personas ante un conjunto particular de circunstancias. Defendía una filosofía moral –se preguntaba si determinadas conductas eran *rectas* o no–. En este aspecto le había abonado el terreno el filósofo holandés Hugo Grocio (1583-1645), en cuyas *Leyes de la guerra y de la paz* (1625) pretendía definir los rasgos irreductibles del hombre desde un punto de vista individual y social. Hugo Grocio no buscaba leyes matemáticas ni científicas como actualmente las entendemos, sino “leyes naturales”, que, una vez más, también podrían considerarse derechos naturales. Con implacable eficacia, Grocio despojaba a la sociedad de sus rasgos más amables –la benevolencia, decía, está muy bien, pero no es esencial– y afirmaba que los seres humanos tienen el derecho natural a vivir en compañía, la expectativa de que nadie les ataque de forma injustificada y la libertad de defenderse en caso de que esto suceda. La sociedad es posible en tanto las personas se consagren a la autoconservación y eviten hacer daño a otros sin motivo. Éste, asegura Hugo Grocio, es el “estado natural”, el más básico de la existencia social. Normalmente, la civilización suele superarlo, alentando la cortesía, las relaciones, las artes, el conocimiento, etcétera, pero todos estos son elementos opcionales, extras. En realidad, la sociedad puede existir sin ellos.

La “sociedad mínima” de Hugo Grocio era cruda, lúgubre; y, al contrario de lo que hoy en día podríamos suponer, su idea de los derechos naturales no prefiguraba en absoluto el liberalismo. Ahora bien, no era obvio en modo alguno de qué forma podría mantenerse una sociedad

tan tosca y cruda. Porque, ¿quién dictaminaba cuándo una agresión era justa y cuándo no? Si el alimento escasea, ¿está justificado matar al vecino para proveerse? ¿Se puede matar al vecino como forma de prevención, anticipándose a la posible hambruna del año próximo? La estabilidad social no se consigue ni siquiera aunque todos reconozcan los derechos naturales de sus compañeros, porque no hay consenso respecto a la forma de ejercerlos.

En las sociedades jerárquicas de la Europa medieval esto no supuso ningún problema porque todos estaban acostumbrados a la idea de que debían hacer lo que sus superiores les pedían. Sufrían la desigualdad, pero no la cuestionaban. Con la llegada del Renacimiento, esas certidumbres se resquebrajaron, en parte a consecuencia de los cambios en la estructura social, en parte a causa de las disputas religiosas y de la Reforma, y en parte porque el humanismo situó a muchas personas ante nuevas corrientes de pensamiento y algunos cobraron conciencia de la diversidad de las sociedades pasadas y presentes. De pronto a la sociedad parecieron faltarle principios fundacionales o reglas de comportamiento establecidas.

Hobbes se percató de que este relativismo respecto al modo de concretar los derechos naturales significaba que, en el fondo, un “estado natural” giraba en torno a una sola cosa: el poder.

CÓMO CONSTRUIR UNA COMUNIDAD

Una persona sin libertad es una persona sin poder. Incluso el más humilde y apocado de nosotros desea algún poder –el de elegir cuándo comer y dormir, dónde vivir y con quién, qué decir y qué no–. En todo el mundo, muchos millones de personas carecen de todas esas libertades o de algunas de ellas y, sin embargo, aparecen reconocidas en la Declaración Universal de los Derechos Humanos como libertades que todos merecemos por el simple hecho de estar vivos.

Hobbes definió el poder como la capacidad de garantizar el bienestar o los privilegios personales, “de obtener algún Bien aparente y futuro”. Las personas, afirmó, poseen cierto “poder natural” que les permite hacer eso partiendo de cualidades innatas como la fuerza, la elocuencia y la prudencia. Y deben emplear esas cualidades para adquirir “poder ins-

trumental”, es decir, “los medios e Instrumentos para adquirir mayor” riqueza, reputación, amigos influyentes.

De forma que el modelo de sociedad de Hobbes gira en torno a la asunción de que las personas (si dijera “hombres”, no estaría, en este contexto, siendo preciso) pretenden acumular poder hasta un nivel personal de saciedad que varía de individuo a individuo. Se trata, sin duda, de una fórmula muy desangelada. El escocés Robert MacIver, estudioso de la política, lamentó que negara todo de cuanto bueno y digno tiene el hombre:

Hobbes ignoró todos los lazos sociales que emanan de la vida de la familia, todas las tradiciones y doctrinas que mantienen unidos a los grupos humanos, todas las costumbres e innumerables ajustes que revelan la inclinación socializante de la naturaleza humana.¹⁴

No cabe la menor duda de que esto es así, y a nosotros no nos importaría sumarnos a esta queja. El historiador social Lewis Mumford condena esta clase de abstracción de la sociedad al afirmar que reduce al individuo a “un átomo de poder enfrascado sin piedad en la búsqueda de todo tipo de poder que pueda dominar”.¹⁵ Hay que admitir que es esto precisamente lo que Hobbes pretendía.

Sin embargo, incluso en el siglo XIX, el romántico Ralph Waldo Emerson parece estar de acuerdo con la interpretación hobbesiana de la naturaleza humana cuando dice: “La vida es una búsqueda de poder”. Y, en cualquier caso, se puede estar de acuerdo o no con el descarnado punto de vista de Hobbes y pese a todo formular la pregunta válida: basándose en esos postulados, ¿qué sigue? Si los hombres actúan de ese modo, ¿qué clase de sociedad puede surgir y mantenerse?

El poder es relativo: su verdadera dimensión la cifra cuánto excede el poder de un hombre al de las personas que lo rodean. De ello se deduce, afirmó Hobbes, que la búsqueda del poder es, en realidad, la búsqueda del control sobre el poder de otros hombres. ¿Pero cómo llega una persona a imponerse sobre el poder de las demás? En la sociedad de mercado burguesa que llegó a dominar el paisaje cultural de mediados del siglo XVII, la respuesta era sencilla: lo compra. Un hombre paga a otro para que se someta a su voluntad y actúe en su beneficio.

Esto no significa necesariamente, como podría parecer, que un hombre poderoso contrate a otros para que sean sus matones, verdugos y mercenarios. Por el contrario, Hobbes pensaba en la forma en que un rico empresario emplea a sus trabajadores para fabricar y distribuir sus bienes, o en cómo un artesano contrata a unos ayudantes para cumplir un encargo. Pero esta formulación es tan glacial como su modelo del hombre como máquina: “El valor, o VALÍA, de un hombre estriba, como el de tantas otras cosas, en su Precio; esto es lo mismo que decir, cuánto se le pagaría por el empleo de su poder”.¹⁶ Es la ética del libre mercado: acabar con la competencia.

No es obvio que una sociedad en la que las apetencias de poder varíen tenga necesariamente que ser una sociedad inestable; quienes tienen ambiciones moderadas pueden contentarse con trabajar para los que no las tienen tan moderadas. Pero Hobbes sostenía que la codicia de algunos hombres no conoce límites. Esos individuos sedientos de poder desestabilizan una sociedad en la que, de otra forma, los hombres menos ambiciosos podrían trabajar en armonía:

Afirmo que el conjunto de la humanidad tiene una inclinación generalizada, un deseo perpetuo e incansable de Poder y más poder que sólo cesa con la muerte. Y la causa de ello no es siempre que un hombre espere un placer más intenso del que ha conocido, ni que no pueda contentarse con un poder moderado, sino que no pueda asegurarse el poder y los medios para vivir bien, como vive en el momento presente, sin la adquisición de más.¹⁷

Y así, todos nos vemos sumidos en una lucha perpetua por el poder. Sin freno, esta lucha conduce a la visión del Estado Natural hobbesiana, comparada con la cual la interpretación de Hugo Grocio –una sociedad fría y hosca– puede parecer sin duda idílica. La visión de Hobbes es desolada y espantosa como la que más.

Sin ley ni encargados de aplicarla, los hombres están abocados a la explotación violenta de los demás. Cuando todos quieren dominar a su vecino sin la menor restricción, afirma Hobbes,

No hay lugar para la industria [...] ni cultura de la Tierra [...] ningún conocimiento de la faz de la Tierra [...] ni Artes, ni Letras, ni

Sociedad, y lo que es peor, abunda un temor constante y el peligro de sufrir una muerte violenta; y la vida del hombre es solitaria, pobre, sucia, brutal y breve.¹⁸

¿Quién no haría cuanto pudiera por escapar de un estado semejante? Pero para proceder de forma lógica a un mundo mejor, a Hobbes le pareció necesario introducir dos postulados más que elevó al estatus de Leyes de la Naturaleza. La primera de ellas afirma que un hombre no puede desear activamente hacerse daño a sí mismo ni poner en peligro su vida, ni tampoco prescindir de lo que la haga más segura. Aunque a primera vista éste es un postulado muy razonable, en realidad nos otorga una percepción extraordinaria para prever las consecuencias de nuestras acciones, para que siempre emprendamos la que más favorece nuestra propia conservación. La segunda ley es todavía más discutible:

Cuando un hombre desee, cuando otros también lo hacen, la Paz y defenderse a sí mismo, habrá de pensar que este derecho se puede extender a todas las cosas; y tendrá que contentarse con la misma libertad frente a otros hombres como la que permita que otros hombres tengan frente a él mismo.¹⁹

En otras palabras, como corolario de su instinto de preservación, el hombre debe estar dispuesto a reprimir sus impulsos explotadores y a cooperar con los demás. Sólo así pueden la paz y la estabilidad llegar al Estado Natural.

Pero la cooperación no basta. A causa de su insaciable apetito de poder, los hombres violarán los términos de este contrato en cuanto crean que hacerlo les reporta algún provecho. Más tarde veremos que, esencialmente y con trescientos años de adelanto, Hobbes está formulando ya uno de los dilemas del comportamiento que más han influido en la sociedad contemporánea. La solución, arguye, consiste en que los hombres no sólo cedan parte de sus derechos naturales de hacer lo que les plazca, sino en *delegar* esos derechos en alguna autoridad con la potestad de hacer cumplir el contrato –si es necesario, por la fuerza.

¿En quién debe residir esa autoridad? En realidad, Hobbes daba poca importancia a la respuesta. Lo importante era la existencia de alguna autoridad. Sus postulados fundamentales dan por sentado un grado de

igualdad entre los hombres que rara vez encontró eco en la Europa del siglo XVII: en el Estado Natural ningún hombre está por encima de otro, si bien algunos tienen la ventaja de contar con mayor “Poder Natural”. La comunidad *elige* a algunos individuos y les otorga poder absoluto. En efecto, la comunidad escoge un monarca y delega en él su poder sin cuestionarlo.

Esta fórmula es una mezcla muy peculiar. Podría resumirse así: la creación del despotismo por medios democráticos a partir de un estado anárquico. Hobbes admite que la autoridad suprema podría ser un órgano electo y no un individuo –es decir, un Parlamento–, pero sospecha (¿y quién puede discutirse?) que, cuando hay más de un jefe de Estado, tarde o temprano se producen disputas intestinas por el poder.

Los poderes del monarca electo de Hobbes son absolutos; terminan sólo allí donde se topan con el derecho de los individuos a preservar sus propias vidas. Depende del soberano, una vez elegido, decidir cuánto poder debe tomar prestado de cada individuo para mantener el contrato social. Incluso en una tiranía, afirma Hobbes, los ciudadanos están obligados por el deber y la sumisión. Al mismo tiempo, el absolutismo une a las personas en una unidad cohesionada, una Comunidad: el Leviatán –curioso nombre para un estado social presuntamente deseable; es casi como si Hobbes hubiera querido que sus lectores imaginaran un régimen opresivo y espantoso–. El Leviatán es una temible criatura marina que aparece mencionada en el Libro de Job:

Si pones sobre él la mano,
Recordarás la lucha y no volverás a hacerlo.
Toda esperanza de someterlo es falsa,
Su mera visión abruma [...]
Cuando se levanta, los poderosos sienten temor;
Se retiran antes de que los ataque [...]
En la Tierra no tiene igual,
Es una criatura sin miedo.
Mira por encima del hombro a los altivos,
Reina sobre todos los orgullosos.²⁰

El mensaje es claro: quien desobedece al Leviatán corre un grave peligro.



Figura 1.1. El Leviatán de Hobbes es un soberano que facilita la cohesión de la sociedad en una comunidad –si es necesario, por la fuerza de la espada–. “El único modo –dice Hobbes– de erigir un Poder Común capaz de defender a las personas de la invasión de los Extranjeros y de las injurias de unos y de otros [...] es conferir todo su poder y toda su fuerza a un Hombre [...] que pueda reducir todas las Voluntades, mediante una pluralidad de voces, a una Voluntad [...] Hecho esto, a la multitud así unida en una Persona se la llama COMUNIDAD, en latín, *CIVITAS*. Ésta es la generación del gran LEVIATÁN, o más bien (por decirlo de un modo más pío) del *Dios Mortal*, al que debemos, bajo el *Dios Inmortal*, nuestra paz y defensa”. (T. Hobbes, *Leviatán*, p. 227.)

Sin embargo, como ha elegido libremente ser gobernada de este modo, la población comparte en cierto sentido la estructura política resultante. Por tanto, el Leviatán es “una persona, de cuyos actos una gran multitud [...] se ha convertido en autora”²¹ –imagen que refuerza el frontispicio de

la primera edición del libro, preparada, muy probablemente, por el artista Wenceslas Hollar (véase figura 1.1). Al personificar al Estado de esta forma, Hobbes seguía una larga tradición: en el siglo XIV, Thomas Brinton, obispo de Rochester, identificó al monarca con la cabeza del “cuerpo político” y a los trabajadores con los pies. Otros se entretuvieron anatomizando a todos los miembros de la sociedad, desde los sacerdotes (el pecho o las orejas) a los comerciantes (los muslos) o los jueces (las costillas).

La justificación del Leviatán, afirma Hobbes, es “la Conveniencia o Aptitud para conseguir la Paz y la Seguridad del Pueblo”. Se pueden deplorar los medios que el autor británico propone para lograr esos objetivos, pero se trata de objetivos que las democracias actuales han enaltecido. Al explicar de qué forma una masa de individuos egoístas puede unirse para crear una nación soberana, Hobbes concretó la idea moderna del Estado. Más incluso: según el historiador Frederick Nussbaum, “Hobbes descubrió la sociedad”.²²

Por lo tanto, valiéndose únicamente de la ciencia y la razón, Thomas Hobbes creyó demostrar que la monarquía era el mejor sistema de gobierno. Opinaba que las naciones que, como la Roma Imperial, disfrutaron de una prolongada estabilidad cívica dieron, a causa del azar o del buen juicio, con la solución ideal, la que, con él, la ciencia revelaba con su lógica inexorable. “La capacidad de construir y mantener una Comunidad –afirmó– consiste en ciertas Reglas, como las de la Aritmética y la Geometría, no sólo (como en el tenis) en la Práctica”.²³

UN CÁLCULO DE LA SOCIEDAD

Podría pensarse que Carlos II se habría sentido muy halagado con un tratado que se proponía demostrar científicamente que los reyes son los mejores gobernantes, pero el *Leviatán* no le complació –porque postulaba que el rey proviene de las filas de los hombres corrientes y que gobierna gracias a la elección arbitraria de las masas, igual que un vulgar parlamento!–, porque era bien sabido que los reyes gobernaban por decreto divino, que su autoridad no derivaba de ningún contrato social, sino de un contrato celestial. A los realistas, el libro les pareció una traición.

Tampoco los partidarios del sistema parlamentario encontraron consuelo. La autoridad suprema de Hobbes, sea ésta un individuo o un órgano

colectivo, tenía derecho a decidir su sucesor –por lo tanto, la democracia se ejercía una sola vez y luego quedaba relegada–. Y para empeorar las cosas, el *Leviatán* ofendió a los creyentes por arremeter contra las naciones que demostraban “aquiescencia con los grandes Misterios de la Religión Cristiana, que están más allá de la Razón”.²⁴ Para muchos, esto constituía una declaración de ateísmo. Hobbes no gustó a nadie.

El filósofo se había embarcado en un juego muy peligroso. En el invierno de 1651-1652, a poco tiempo de la aparición de su libro, renunció a la compañía de los realistas exiliados y regresó a la Inglaterra de Cromwell, donde el deseo de paz y estabilidad bajo el Protectorado había introducido cierto grado de tolerancia. Hobbes hizo amigos en las filas del nuevo régimen y se adaptó bien hasta 1660, año en que Carlos II recuperó el trono. Si había una cosa de Hobbes que a los realistas les disgustara más que su filosofía política, ésta era sus puntos de vista sobre la religión. Muchos lo habían tomado por ateo, sobre todo entre las poderosas filas de los anglicanos realistas, y bien podría haber acabado en prisión si, en 1666, el Parlamento hubiera aprobado una ley que pretendía convertir la herejía cristiana en delito penal. No obstante, esa amenaza pendió siempre sobre Hobbes a lo largo de su vida. Pese a ello y pese a décadas de delicada salud, el filósofo sobrevivió hasta la venerable edad de noventa y un años.

Ninguna nación quiso poner a prueba las advertencias del *Leviatán*. En realidad, según el historiador Richard Olson, “puesto que parecían inspirar tanto la inmoralidad como la revolución, todas las personas respetables observaron con recelo y aborrecimiento las teorías de Hobbes”.²⁵ Para el filósofo escocés David Hume, “la teoría política de Hobbes promovía la tiranía y su ética alentaba la conducta licenciosa”.²⁶ Sin embargo, como las argumentó con tanta potencia y precisión, sus ideas fueron un reto para todos los filósofos políticos posteriores. Hobbes podía escandalizar, pero era imposible no prestarle atención.

Por encima de cualquier otra consideración, el *Leviatán* introdujo la idea de que en la política había espacio para la razón. Las utopías anteriores no eran deductivas, sólo tenían una validez asertiva. En general pretendían bien refrendar el *statu quo*, bien retratar una sociedad que sólo existía en la imaginación del autor, sin explicar cómo se podía alcanzar la utopía. Por su parte, el *Leviatán* era el producto de la ciencia mecanicista. No era, necesariamente, algo que celebrar, pero era un mal necesario, la única alternativa a la sombría anarquía.

Puede parecer que el contrato social que propuso Hobbes prefigura los que defendieron John Locke (1623-1704) y Jean-Jacques Rousseau (1712-1778), pero sucede lo contrario. Para Locke y para Rousseau el poder del jefe de Estado conlleva la obligación de servir a los intereses del pueblo; para Hobbes el pueblo adquiere, mediante contrato, el compromiso de servir a su gobernante. Para Hobbes, el temor principal es la anarquía; para Locke, el abuso de poder, razón por la cual vio la necesidad de establecer salvaguardas para evitar el absolutismo.

Pero aunque parezca que está proponiendo la autocracia, Hobbes también proporciona argumentos que pueden refrendar tanto el capitalismo burgués como el liberalismo. Hobbes expresó su aversión a la forma en que la sociedad mercantilista creaba hombres cuya “única gloria consiste en hacerse excesivamente ricos gracias a su habilidad para comprar y vender”, cosa que consiguen “logrando que los pobres les vendan su trabajo al precio que ellos mismos fijan”.²⁷ Sin embargo, para él, la cultura burguesa era inevitable, así que su objetivo era encontrar un sistema que acomodara las tendencias más egoístas sin conflicto. Con este fin proponía que el mercado se encargara de fijar los precios de todo, trabajadores incluidos: “el valor de todas las cosas contratadas lo mide el Apetito de los Contratistas; por lo tanto, el precio justo es el que, por contrato, esos contratistas están dispuestos a ofrecer”.²⁸ Esta filosofía del libre mercado encontró eco en el siglo posterior con la *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*, de Adam Smith. Quienes atravesaron la década de 1980 en el Reino Unido y en Estados Unidos –y en cualquier otro país– saben que se trata de una actitud que no acabó en la Ilustración.

HOMBRE Y MÁQUINA

Cualquier teórico de la política que adopte una aproximación cronológica describirá el recorrido del pensamiento hobbesiano vía Locke pasando por pensadores posteriores que creían que existía algo así como un “cálculo de la sociedad”. Por ese camino descubriremos, a finales del siglo XVIII, el utilitarismo de Jeremy Bentham, que fue un intento de armonizar los intereses de la sociedad con la búsqueda de la felicidad del individuo. Al igual que Locke, Bentham creía que bastaba la razón para abrir

la senda. Cifraba su solución en el principio “de la mayor felicidad”, estado óptimo en el que la suma total de la felicidad humana era la mayor posible, admitiendo los conflictos de intereses que inevitablemente surgen cuando cada uno aboga por su interés particular. La utopía de Bentham es muy distinta a la de Hobbes: una democracia igual para todos, incluidas las mujeres. Bentham y los filósofos radicales, entre quienes se contaba John Stuart Mill, allanaron el camino al socialismo de Karl Marx. Por supuesto, Marx también estaba decidido a formular una teoría política “científica” –teoría que estuvo fuerte y equivocadamente influenciada por el darwinismo.

Podría continuar, pero no lo haré. Todas estas teorías se basan en el racionalismo y las revisaremos a lo largo de este libro alguna que otra vez, pero no son científicas en el mismo sentido que lo es el tema que nos ocupa. Pocos pensadores políticos han definido un modelo social con la precisión lógica de Hobbes y ninguno ha llevado sus preceptos a sus últimas consecuencias de una forma verdaderamente científica, más allá de las meras conjeturas. Con esto no quiero, ni mucho menos, denigrar ningún modelo; lo único que quiero es decir que parten de otros presupuestos. Los teóricos de la política tienden a ocuparse de lo que *debería* ser, los científicos se centran en lo que *es*. Lo mismo puede decirse de la nueva física de la sociedad: pretende, a través de la observación, encontrar descripciones de los fenómenos sociales y comprender de qué modo pueden surgir a partir de simples asunciones. Equipado con tales modelos, uno puede preguntarse qué se puede hacer para obtener otro resultado. Terminadas las preguntas científicas, la decisión de lo que es deseable debería ser motivo de un debate público. En este sentido, la ciencia abandona el papel de dictador y se convierte –y así debe ser– en instrumento y guía.

¿Y cómo es que la ciencia ha llegado a tener la confianza, quizá la arrogancia suficiente para aventurarse en el terreno de la ciencia social? En décadas recientes nadie ha emprendido la tarea de construir una física capaz de ello. Lo que ha sucedido es que los físicos se han dado cuenta de que tienen a su disposición instrumentos que pueden aplicarse a esta nueva tarea, aunque no fueron desarrollados para ese propósito: se inventaron para comprender la estructura del átomo.

En su libro *The Death of Nature* (1983), Carolyn Merchant sostiene que el surgimiento en el siglo XVII de la filosofía mecanicista atómico, san-

cionó las violaciones y manipulaciones de la naturaleza que continúan malogrando el mundo en la actualidad. La sociedad utópica que imaginó Thomas Hobbes, sociedad en la que las personas son poco más que autómatas impelidos a actuar de una forma o de otra en virtud de fuerzas mecánicas y en la que el razonamiento científico es el árbitro de la justicia social, parece un lugar desolador para vivir. Resulta difícil imaginar que un modelo de sociedad que considera que el comportamiento de los individuos está gobernado por reglas matemáticas rígidas pueda ofrecernos una forma mejor de vivir y no un mundo feliz de pesadilla.

Ésta, sospecho, es la objeción que, de forma intuitiva, muchos harán a la noción de una “física de la sociedad”. Pero espero demostrar que la nueva incursión de la física en el ámbito de las ciencias social, política y económica no se salda con la misma conclusión. No es un intento de prescribir sistemas de control y gobierno y mucho menos de reforzar con razonamientos científicos prejuicios acerca del modo en que ha de gestionarse la sociedad. Tampoco imagina a las personas como efigies homogéneas y sin alma que se mueven de acuerdo a ciegos principios matemáticos. En vez de ello, lo que la física actual trata de hacer es comprender de qué forma surgen las pautas de comportamiento –y no hay duda de que esas pautas existen– a partir de la mezcolanza estadística en la que los individuos obran de acuerdo a su propia idiosincrasia: ayudándose o entorpeciendo, cooperando o discutiendo, siguiendo a la masa o abriendo su propio camino. Con la obtención de ese conocimiento esperamos adaptar nuestras estructuras sociales a la forma en que las cosas *son* en lugar de al modo en que algún arquitecto o político o planificador urbanístico cree que deberían ser. Podemos identificar formas de organización que casan con la forma en la que actuamos instintivamente y en la realidad.

Son beneficios potenciales de una física genuinamente instintiva de la sociedad, pero de tales esfuerzos surge un mensaje de mayor calado. Se trata de esto: las acciones colectivas y los efectos son inevitables. No importa cuán individualistas nos guste pensar que somos: con frecuencia, nuestros logros son los detalles invisibles de una imagen más amplia. Lo cual, sin embargo, no es necesariamente la descripción de la impotencia. A los ecologistas y a otros activistas les gusta instigarnos a “pensar de una forma global, pero a actuar a escala local”; la física de la sociedad demuestra que lo inverso también es posible: ocupándonos

tan sólo de la forma en que interactuamos con nuestros vecinos más próximos, “pensando a escala local”, podemos, de forma colectiva, llegar a ejercer una influencia global y sólida. Merece la pena saber las consecuencias de ello –las buenas o las malas–.

Ninguna teoría científica nos enseñará a construir una utopía, pero la búsqueda de una física de la sociedad aprovechará las lecciones de tentativas tan quijotescas como la de Thomas Hobbes. Esos esfuerzos por crear una utopía racional nos muestran los peligros de programas tan rígidos. La ciencia no nos ofrece prescripciones, sino descripciones. Sabiendo esto, es posible que nuestras elecciones sean más lúcidas.

II
FUERZAS MENORES
LA FILOSOFÍA MECÁNICA DE LA MATERIA

*Se diría que la naturaleza fuera
La diversión, muy popular,
De millones y millones
Y millones de partículas que juegan
y juegan y juegan
al billar y al billar y al billar.*

PIET HEIN (1966)¹

El Boltzmann es magnífico. Estoy a punto de terminarlo. Su exposición es magistral. Estoy convencido de que los principios de la teoría son correctos, lo cual significa que estoy convencido de que en el caso de los gases estamos en verdad tratando con masas discretas de tamaño definido que se desplazan de acuerdo a ciertas condiciones [...] Es un paso adelante en la explicación dinámica de los fenómenos físicos.

ALBERT EINSTEIN (1900)²

Me he esforzado por demostrar que la peculiar función de la ciencia física es la de llevarnos a los confines de lo incomprensible, y a declararnos absortos y a aceptarlo con fe, hasta que llegue el tiempo en que el misterio se desvele.

JAMES CLERK MAXWELL (1856)³

Las leyes simplifican la vida, lo cual puede resultar liberador. Immanuel Kant se daba cuenta de ello cuando dijo: “Un hombre es libre si no tiene que obedecer a nadie, sino tan sólo la ley”.⁴

No es baladí que la ciencia haya llegado a emplear la terminología legal para describir las regularidades de la naturaleza. “Queda arrestado por violar las leyes de la física”, dice un policía a un hombre que levita en cierta serie de dibujos animados. Como muchos chistes buenos, éste revela las trampas del lenguaje. Podemos violar las leyes de la sociedad si nos atrevemos, pero a las leyes de la física ni siquiera hay que forzarlas, porque son inviolables.

El entusiasmo de la Ilustración por la filosofía mecanicista puede parecerse ingenuo hoy, pero no olvidemos lo que ofrecía. Como Aristóteles intuyó, las “leyes naturales” rara vez eran simplificaciones; con frecuencia no eran más que tautologías. Los objetos caen porque tienen tendencia a ir hacia abajo. El sol y la luna siguen su trayectoria en arco por el cielo porque los cuerpos celestes tienden a moverse en círculo. Por el contrario, la ley de la gravedad de Newton explicó por qué las bolas de cañón caen y la luna no. Condensó páginas de datos astronómicos en una fórmula simple y concisa. Contribuyó a encajar observaciones disparatadas en un solo marco. Y más allá de todo esto, sugirió que la humanidad puede comprender, y no sólo experimentar, los cómo y los porqués de la existencia.

Las leyes mecánicas de Galileo y de Newton se cumplen para los cuerpos planetarios y para las partículas de polvo, para la caída de una manzana y para la caída de una estrella. Son verdades profundas y elegantes —en el caso de que la verdad pueda llegar a discernirse— sobre el funcionamiento del universo. Por lo tanto, es posible que podamos perdonar a Hobbes y a sus coetáneos por su propensión a emplear la mecánica para explicarlo todo, incluso los misterios de la mente humana. Y sin embargo, en los dos siglos posteriores a la publicación del *Leviatán*, el entusiasmo por la mecánica no decayó. Al contrario, los científicos encontraron todavía más motivos para creer que habían atrapado los principios fundamentales del funcionamiento de la materia y que las explicaciones de todos los fenómenos sólo requieren la descripción mecánica adecuada.

Es esta explicación de la materia en el nivel fundamental, incubada en el siglo XIX, la que cimenta la física de la sociedad. En este capítulo veremos de dónde proviene y en qué consiste. Es una teoría que convoca a muchos jugadores, pero cada uno de ellos es demasiado pequeño para vislumbrar el conjunto.

PIEZAS DE TODAS LAS COSAS

En torno al año 440 a. de C., el filósofo griego Leucipo postuló la existencia de los átomos (la palabra significa “que no se pueden cortar”) como partículas fundamentales, irreducibles, constituyentes de todas las cosas. Demócrito, discípulo de Leucipo, indagó las consecuencias de la hipótesis con gran detalle. La idea del átomo suscitó la controversia de si entre ellos había espacio (vacío) o no lo había. Anaxágoras (c. 500-428 a. de C.) rechazó la noción de vacío, y el ateniense Epicuro (341-270 a. de C.) se preguntó si los objetos podrían moverse si el espacio entero estuviera atestado de átomos.

El atomismo de Demócrito cayó en el descrédito durante dos milenios, sobre todo porque a Aristóteles le disgustaba. Los teólogos medievales rechazaron la hipótesis porque no casaba con la creencia cristiana en la transubstanciación. El interés por él fue avivado por el redescubrimiento del poema *De rerum natura* [*De la naturaleza de las cosas*], del filósofo romano Lucrecio (99-55 a. de C.), seguidor de la doctrina atomista de Epicuro.

Galileo, Francis Bacon, Pierre Gassendi e Isaac Newton creían en los átomos, pero muchos otros grandes pensadores no. René Descartes, si bien aceptaba que la materia podía estar constituida por pequeñas partículas, no veía motivo para pensar que no se la podía dividir hasta el infinito. Afirmó que esas partículas eran arrastradas como semillas y polvo en los vórtices de los torbellinos de algún líquido que todo lo empapa.

En general, todos coincidían en que el reino microscópico era un mundo en movimiento, lo cual implicaba que la mecánica podía aprovecharse para comprender las propiedades cotidianas de la materia. Fue Daniel Bernoulli (1700-1782), matemático de ascendencia flamenca nacido en Basilea, quien primero formuló esta idea con claridad. En 1738, Bernoulli postuló que los gases están compuestos de pequeñas partículas que se mueven y colisionan. La presión que un gas ejerce sobre una superficie —por ejemplo, al hinchar un globo— era resultado del impacto de las pequeñas partículas al golpear sobre esa superficie.

En 1763, un jesuita croata llamado Ruder Josip Bošković (1711-1787) formuló las implicaciones últimas de esta teoría atómica mecánica. Un aspecto crucial de las leyes del movimiento de Isaac Newton es su capacidad de predicción. Si sabemos cómo se mueve un objeto en un instante

determinado, a qué velocidad y con qué dirección, y si también sabemos qué fuerzas actúan sobre él, podemos calcular su trayectoria futura con exactitud. Esta previsibilidad posibilitó que los astrónomos se valieran de las leyes del movimiento y de la gravedad de Newton para, por ejemplo, calcular cuándo podría producirse algún eclipse lunar o solar.

Bošković se dio cuenta de que si el mundo entero consistiera en átomos en movimiento y colisión, una mente omnividente

podría, a partir de un arco continuo descrito en un intervalo de tiempo –aunque fuera muy pequeño– por todos los puntos de la materia, derivar la ley de fuerzas [esto es, un mapa universal] [...] Ahora, si la ley de fuerzas fuera conocida, así como la posición, velocidad y dirección de todos los puntos en un instante determinado, una mente omnividente podría prever todos los estados y movimientos subsiguientes y los fenómenos que necesariamente se derivan a partir de ellos.⁵

Es lo mismo que decir que un matemático con la omnisciencia de un dios podría deducir el resto de la historia para siempre jamás a partir de un solo instante de tiempo. Comparada con la versión hobbesiana del determinismo, en la cual las personas son autómatas que se mueven ante la insistencia de fuerzas mecánicas, ésta es como una camisa de fuerza del mundo. Nada es desconocido ni incierto y nada se desvía del inevitable juego de fuerzas. El hecho de que no haya mente humana capaz de tales cálculos es irrelevante: según Bošković, el futuro ya está definido en el presente. El eminente matemático francés Pierre-Simon Laplace (1749-1827) hizo una aseveración parecida en 1814, la cual, como su autor, es mucho más conocida. Para una inteligencia tan asombrosa, afirmó Laplace, “el futuro, como el pasado, estaría presente ante sus ojos”.⁶

Al parecer, la mecánica había desterrado al libre albedrío.

MUERTE Y DISIPACIÓN

Las consecuencias de un universo mecánico no sólo eran filosóficas. Con la Revolución Industrial a pleno rendimiento, a principios del siglo XIX era grande el apremio de los científicos por resolver buen número de

problemas prácticos. En su breve vida, a la que el cólera puso fin, el francés Nicholas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) se ocupó de uno de los más importantes: cómo optimizar la eficiencia del combustible de las máquinas de vapor.

Lo que valía para la generación de energía en la época de Carnot vale también ahora, al menos en su mayor parte: extraer energía de una turbina significa generar calor y dejar que fluya. Pensemos en una turbina de gas alimentada por carbón. El calor producido por el combustible se transfiere del quemador al gas. El gas caliente se expande, la presión aumenta y sale un chorro de aire que mueve las aspas de la turbina. La rotación gira un electroimán que crea electricidad en las bobinas. La máquina de vapor, motor de la Revolución Industrial, también aprovechó la expansión de un gas caliente: el vapor de agua.

Pero, ¿qué es el calor exactamente? A finales del siglo XVIII muchos eminentes científicos coincidieron en que existía una sustancia física llamada “calórico” que fluía de lo caliente a lo frío. El científico estadounidense Benjamin Thompson (1753-1814) pensó otra cosa.* El calor, sugirió, es el movimiento aleatorio de átomos en colisión. No es el *producto* de tales movimientos; no es el calentamiento por la fricción de las superficies de los átomos. No, el calor debe ser identificado con los propios movimientos. Una sustancia se calienta más cuanto más furiosamente rozan sus átomos, por ejemplo, como resultado de colisiones atómicas cuando la sustancia entra en contacto con otro material en el que los movimientos son ya muy vivaces.** Carnot se sumó a la propuesta: “Así pues, el calor es producto del movimiento”,⁷ escribió en 1824. El mecánico mundo de los átomos había racionalizado un viejo misterio.

Los técnicos necesitaban capturar parte de este movimiento microscópico para convertirlo en el movimiento de los vagones de tren, de la maquinaria de las fábricas, de las bombas industriales. Carnot se percató de que esto estaba supeditado a conseguir que el calor *fluyera* de un cuerpo caliente a otro más frío. Dedujo una teoría general para calcular qué cantidad de este flujo de calor puede convertirse en trabajo útil (la conversión nunca es perfecta porque, inevitablemente, siempre se pierde

* Thompson, que más tarde se convertiría en conde de Rumford, fundó la Royal Institution en 1799.

** No es una idea totalmente original, porque Robert Boyle propuso una teoría mecánica del calor en 1675.

algo de calor) y cómo éste depende de la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el depósito de calor. Con el fin de desarrollar esta argumentación, Carnot pensó en un motor en el que el flujo de calor permitiera la expansión de un gas (al calentarse) y su contracción (al enfriarse), metiendo un pistón en un proceso cíclico conocido como “ciclo de Carnot”. Su análisis sentó las bases de una nueva disciplina llamada termodinámica –literalmente: “movimiento de calor”.

La mayor parte de las personas que se han tropezado con la termodinámica palidecen al oír mencionar su nombre, y es que se trata de una disciplina horriblemente tediosa tanto en la teoría como a la hora de abordarla experimentalmente. Es una pena, porque también es una de las teorías más asombrosas de la ciencia. Veamos: se trata de un campo de estudio iniciado para contribuir a que los ingenieros del siglo XIX construyeran motores más eficientes y que, finalmente, ha dado pie a una de las afirmaciones fundamentales acerca del funcionamiento del universo.* La termodinámica es la ciencia del cambio y, sin cambio, no hay nada que decir.

La termodinámica, como la teoría del movimiento newtoniana, tiene tres leyes. No vale la pena conocer la tercera a menos que seamos físicos. Pero cualquier persona que quiera comprender la ciencia debería grabar en piedra las dos primeras.

La Primera Ley de la Termodinámica es la más sencilla: la energía nunca se destruye, sólo se transforma. Los paneles fotovoltaicos recogen la energía del sol y la transforman –parte de ella, nunca toda– en energía eléctrica. (Desgraciadamente, la mayor parte de la energía solar se pierde, convertida en calor.) En una turbina, el calor se transforma en la energía del movimiento (llamada energía cinética) de las aspas de la turbina y, a continuación, en energía eléctrica. Por lo tanto, el universo conserva su energía. Sólo cuando el calor fue identificado con el movimiento (energía cinética) de los átomos, pudo formularse esta ley.

La Segunda Ley de la Termodinámica es más notable y algunos científicos opinan que todavía no la comprendemos del todo. Da testimonio de su importancia la famosa (aunque quizá demasiado rimbombante) queja que C. P. Snow manifestó en su obra *The Two Cultures*:

* Es probable que el físico Erwin Schrödinger tenga razón cuando señala que la termodinámica le debe más a las máquinas de vapor que las máquinas de vapor a la termodinámica. Sin duda, la teoría tiene sus implicaciones prácticas, pero pronto nos llevará a discusiones que rayan lo metafísico.

En buen número de ocasiones he estado presente en reuniones de personas a quienes, de acuerdo a los estándares de la cultura tradicional, todos tienen por muy cultas y que con considerable gusto vienen expresando su incredulidad ante la incultura de los científicos. Una o dos veces me han provocado y he preguntado a quienes estaban presentes cuántos de ellos podían describir la Segunda Ley de la Termodinámica. La respuesta fue fría, y también negativa. Y sin embargo, lo que yo preguntaba puede considerarse el equivalente científico de “¿ha leído usted alguna obra de Shakespeare?”.⁸

Esa ley puede expresarse de diversas formas. Cuando el físico alemán Rudolph Clausius (1822-1888) lo hizo por vez primera en 1850, dijo algo así como que el calor siempre va de lo caliente a lo frío. Igual que los anticlímax, esta explicación es un fiasco, pero lo que realmente quería decir es que hay procesos que avanzan en una sola dirección, que son irreversibles. El agua no fluye corriente arriba y, en sentido figurado, tampoco lo hace el calor.

Esta aseveración aparentemente inocua es el secreto de todos los cambios. Si hay procesos irreversibles, el tiempo es una flecha, una dirección singular definida por tales procesos. La Segunda Ley de la Termodinámica conecta con nuestra percepción de que, en el tiempo, siempre nos movemos hacia delante, jamás hacia atrás.

Pero Clausius no se paró aquí. Ideó el concepto que dio pie a una teoría matemática del cambio y la irreversibilidad: la *entropía*. La entropía surge en la termodinámica como cantidad bastante abstracta, pero, en realidad, uno puede medirla igual que puede medir el calor que se libera durante una reacción química. Por decirlo de forma sencilla, la entropía mide la cantidad de desorden de un sistema (dentro de unas líneas ajustaré esta definición). La Segunda Ley de la Termodinámica se reduce a la afirmación de que en todos los procesos de cambio espontáneo (como cuando el calor pasa de lo caliente a lo frío), la entropía se incrementa.

En 1852, William Thompson (1824-1907), futuro lord Kelvin, advirtió algo muy peculiar en la forma en que se transforma la energía. Existe, dijo, “una tendencia universal en la naturaleza a la disipación de la energía mecánica”.⁹ Lo que quería decir es que parte de la energía siempre se *pierde* en forma de calor (esto es, en un movimiento atómico aleato-

rio). Pensemos en la rotación de la turbina, cuyos engranajes se calientan a causa de la fricción. Es muy difícil recuperar energía útil alguna* a partir de ese calor que se disipa. En 1854, el físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) percibió las consecuencias de esa inevitable disipación: el universo acabará como una uniforme y tibia reserva de calor. A partir de ese momento no podrá haber más cambios, porque el calor no podrá fluir a ningún lugar más frío. Por lo tanto, afirmó, el universo acabará por fallecer de “muerte de calor”. En el funcionamiento de los máquinas de vapor podemos leer el destino de la creación.

LA DANZA DE LA PROBABILIDAD

Ya desde el nacimiento de la termodinámica, los investigadores desearon saber de dónde provienen las reglas de esta ciencia. Si el mundo en su conjunto no es más que átomos en movimiento y cada uno de ellos obedece a las leyes de Newton, ¿no se podrían deducir las leyes de la termodinámica considerando todas sus invisibles colisiones?

Daniel Bernoulli inició sus investigaciones con su explicación de la presión de los gases. Un inglés llamado John Herapath (1790-1869) se preguntó qué tipo de movimientos harían falta para cuantificar la presión del gas y calculó que las partículas de gas (átomos o moléculas, que en realidad son pequeños racimos de átomos) tendrían que viajar a una velocidad cercana a los dos kilómetros por segundo.

La presión de un gas puede alterarse modificando su temperatura. Cuando un gas se calienta en un recipiente hermético –esto es, en un volumen fijo–, la presión aumenta. Ése es el motivo de que los envases de aerosol estallen cuando se los tira a un fuego. Si, por otro lado, el volumen no es fijo –si los muros de la vasija son móviles–, un gas caliente se expande. Es lo que mueve el pistón en un ciclo de Carnot. En otras palabras, las tres características de un gas –temperatura, presión y volumen– se parecen mucho al célebre trío que uno encuentra en la ingeniería o en los negocios: coste, velocidad y calidad. Además, cuando se especifican dos de ellos al azar, el tercero está determinado. Podemos

* Es decir, energía que pueda aprovecharse para llevar a cabo alguna tarea mecánica como levantar un peso o mover una rueda. Los científicos llaman “trabajo” a la energía útil.

decidir que un gas tenga una presión y una temperatura particulares, pero entonces el volumen (o la densidad: número de moléculas en un espacio concreto) queda determinado. Otra forma de decir lo mismo es: si mantenemos constante uno de los elementos del trío, existe una relación matemática entre los otros dos. Por ejemplo, con un volumen fijo, la presión de un gas es proporcional a su temperatura.

Las relaciones entre la temperatura, la presión y el volumen de un gas –las llamadas leyes de un gas– fueron investigadas en el siglo XVII por Robert Boyle. Casi un siglo más tarde, los franceses Jacques Charles (que en 1783 realizó el primer vuelo en globo de hidrógeno) y Joseph Louis Gay-Lussac ahondaron en su estudio.

El reto consistía en comprobar si las leyes del gas podían derivarse de un modelo mecánico en el que los átomos fueran como bolas de billar y se movieran en línea recta hasta colisionar entre sí. Rudolph Clausius sentó las bases de la teoría cinética de los gases en la década de 1850, pero fue el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879) (véase figura 2.1) quien la desarrolló.

Cuando un jugador de billar golpea una bola, no es difícil calcular qué sucederá con las demás bolas de la mesa. Pero en un puñado de aire hay unos diez billones de átomos. No podemos saber cómo se mueven en un instante determinado y, aunque lo supiéramos, la tarea de calcular de qué forma se vería alterado ese movimiento por las colisiones producidas al instante siguiente, y al siguiente, es imponderable. Así que, ¿cómo pensar en cuantificar la conducta, tal y como la describen las leyes del gas, empezando por los “primeros principios” de los movimientos atómicos?

La intuición fundamental de Maxwell es que no es necesario que conozcamos todos los detalles. Lo importante no es la trayectoria precisa de todas las partículas del gas, sino su comportamiento *medio*. Maxwell imaginó un enjambre de abejas: las abejas zumban furiosamente en todas direcciones, pero el propio enjambre se mantiene estacionario, porque, teniendo en cuenta el *promedio* de sus vuelos, no es más probable que las abejas vuelen en una dirección que en otra.

Lo que importa de los movimientos de las partículas de gas, afirmó Maxwell, son dos cosas: la velocidad media a la que se mueve cada partícula –la cual determina su energía cinética media– y cuánto se aparta de esa media por arriba o por abajo. Maxwell intuyó que la distribución



Figura 2.1. James Clerk Maxwell, cuya introducción de las ideas estadísticas a la teoría atómica de los gases fue sólo una de sus importantes contribuciones a la ciencia. También clarificó la naturaleza del color, fue uno de los primeros en hacer fotografías en color y unificó todos los fenómenos electromagnéticos en una sola teoría.

de velocidades semeja el tipo de curva en forma de campana tan frecuente en las gráficas en que aparecen los resultados de las encuestas y estudios estadísticos –como, por ejemplo, el de las retribuciones salariales–. En el próximo capítulo veremos que esta intuición se inspiraba en gran parte en una nascente ciencia de la sociedad.

La curva de Maxwell indica cuántas partículas de gas se mueven a una velocidad determinada y se eleva suavemente desde velocidades bajas, alcanza el pico en la media, y vuelve a descender suavemente hacia las velocidades altas (véase figura 2.2). Esta distribución muestra que muy pocas partículas alcanzan velocidades *mucho* más altas que el promedio. Emyr Alun Moelwyn-Hughes, químico y físico galés, lo dijo en cierta

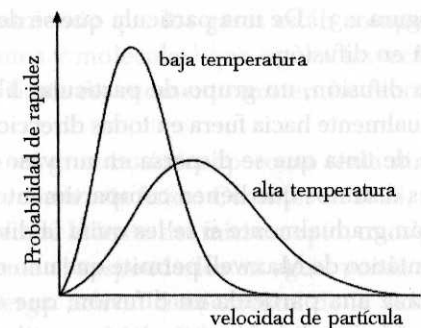


Figura 2.2. La distribución de velocidades de las partículas de un gas de Maxwell. Cuando el gas se calienta, la curva cambia a mayores velocidades y se hace más ancha y plana.

oportunidad de manera profética: “La energía es para las moléculas como el dinero para los hombres: los ricos son pocos, los pobres muchos”.¹⁰

La velocidad media de las partículas depende de cuánta energía cinética contenga el gas en su conjunto. Si insuflamos más energía, el gas se calienta, y la velocidad media aumenta: el pico de la curva de Maxwell se desplaza a velocidades más altas. Pero también ocurre otra cosa: la campana que forma la curva se hace más plana y ancha y pasa de ser un elevado pináculo a una suave loma (véase figura 2.2). Es decir, el abanico de velocidades se amplía. (Que cuando se insufla más “energía” a una economía se consigan o no los mismos resultados es otra cuestión.)

En realidad, el gas de Maxwell no se comporta como un enjambre de abejas que permanece estacionario en el aire. A diferencia de las abejas, las partículas están colisionando constantemente. Eso significa que están cambiando de dirección también constantemente, y al azar. Sin embargo, que todas las partículas se muevan al azar y no haya preferencia por ninguna dirección determinada no significa que las partículas estén amontonadas en un enjambre. Las partículas que se mueven aleatoriamente llegan en verdad a alguna parte, no dan vueltas eternamente alrededor de una posición fija. Sus erráticos caminos las llevan gradualmente más allá del punto de partida, pero en una dirección aleatoria. Es lo que se llama una trayectoria aleatoria, y a los físicos les gusta compararla con la de un borracho que avanza dando tumbos sin ningún destino en par-

ticular (véase figura 2.3). De una partícula que se desplaza de este modo se dice que está en difusión.

A causa de la difusión, un grupo de partículas liberadas en el aire se expandirá gradualmente hacia fuera en todas direcciones, de manera parecida a una gota de tinta que se dispersa en un vaso de agua. Del mismo modo, dos gases distintos que llenen compartimentos adyacentes de una caja se mezclarán gradualmente si se les quita la división que los separa. El análisis matemático de Maxwell permite que uno calcule la rapidez con la que se desplaza una partícula en difusión, que siempre será mucho menor a la velocidad real de la partícula, porque la trayectoria que conduce de un punto A a un punto B es considerablemente sinuosa.

Observando trayectorias aleatorias, los científicos llegaron por fin a un consenso sobre la existencia de los átomos. Maxwell predicó su teoría sobre la base de que los gases están compuestos de átomos y de moléculas; en 1873, recurrió a ella para calcular el tamaño de las moléculas —predijo que una molécula de hidrógeno mide 0,000006 milímetros de ancho (y erró sólo por un factor de tres). Pero, en realidad, nadie había visto ningún átomo e incluso a finales del siglo XIX, algunos científicos continuaban negándose a aceptar su existencia. A Ernst Mach, influyente físico alemán, le parecía un mal método científico aceptar la existencia de nada que no fuera accesible a la experimentación directa, así que prefirió abstenerse de emitir ningún juicio acerca de la teoría atómica. Pero en 1905 Albert Einstein publicó un estudio fundamental en el que

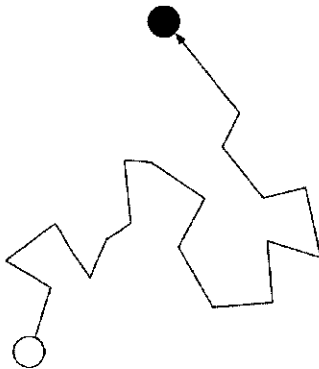


Figura 2.3. Una partícula de un gas que rebota entre choques ejecuta lo que se denomina una trayectoria aleatoria, alejándose gradualmente del punto de partida.

demostraba que, asumiendo que los gases están compuestos por partículas invisibles (átomos y moléculas) que siguen trayectorias aleatorias, se puede explicar el hasta ese momento misterioso fenómeno del movimiento browniano.

Robert Brown fue un gran botánico, pero no tenía ninguna intención de pronunciarse sobre la teoría física. Cuando, en 1828, vio por primera vez cómo, al otro lado de la lente del microscopio, unos granos de polen danzaban furiosamente al suspenderlos en agua, pensó que tanta actividad revelaba la “energía activa” fundamental de la vida, encarnada en la vieja teoría del vitalismo. Más tarde descubrió que los granos definitivamente *muertos*, incluidos (por extraño que parezca) fragmentos de la esfinge de Egipto, se comportaban del mismo modo, y las diversas explicaciones que de ese movimiento se propusieron en el siglo XIX dieron al traste con la hipótesis vitalista. Sin embargo, la teoría de Einstein fue la primera que dio cuenta de forma convincente de las observaciones de Brown. Einstein supuso que los pequeños granos de polen eran lo suficientemente pequeños para rebotar ante el choque con las partículas del agua, aunque los granos fueran visibles al microscopio y las moléculas no.* El artículo de Einstein fue el primero que se ocupó de la difusión y hacía varias predicciones sobre el movimiento browniano que, en 1908, el físico Jean Perrin verificó mediante una serie de experimentos extraordinariamente precisos. Perrin obtuvo el Premio Nobel en 1926. Por comprobar la validez de una teoría de más de dos mil años de antigüedad, el galardón parece merecido.

FE EN LOS NÚMEROS

La contribución de Maxwell a la teoría cinética de los gases es fundamental para el tipo de física del que nos ocuparemos en la mayor parte de este libro. Maxwell convirtió la física en estadística afirmando que cuando observamos un gran número de objetos virtualmente idénticos y en movimiento lo que importa no es el comportamiento detallado de

* En realidad, los granos de polen experimentan un desequilibrio en el grado de colisiones desde distintas direcciones. Se desvían de su trayectoria cuando les golpean más moléculas desde un lado que desde otro.

los individuos, sino el promedio del movimiento, amén de en qué medida se desvían de esa media quienes lo hacen. A cualquiera que esté interesado en el comportamiento humano a gran escala le resultará familiar esta idea. Los demógrafos no tienen por qué saber que Eric Baggins nació el 6 de marzo de 1969, sino la tasa de natalidad de ese año. A los responsables del tráfico les importa poco que Mary Parker fuera a un supermercado de Camberwell el martes por la mañana, se limitan a averiguar cuántos automóviles utilizan la carretera de Walworth un día cualquiera. Las estadísticas son cada vez más fiables a medida que crece el tamaño del censo. Si, por ejemplo, preguntamos por el comportamiento del puñado de materia que podemos coger con la mano, estamos hablando de billones de moléculas y el comportamiento estadístico es reproducible de un experimento a otro. En otras palabras: para el mismo gas contenido en dos tarros idénticos y a la misma temperatura, el gráfico de distribución de velocidades de Maxwell será totalmente idéntico.

Junto con la introducción de la estadística llega la noción de *probabilidad*. La gráfica de distribución de velocidades de Maxwell no nos dice nada concreto sobre la velocidad de una molécula de gas en particular, nos dice la probabilidad de que una partícula escogida al azar tenga una velocidad en particular. La velocidad más probable es la velocidad media; hay pocas probabilidades de que se mueva mucho más despacio o mucho más deprisa.* En realidad, resulta extraordinariamente conveniente que nos baste la estadística para estudiar el comportamiento de los gases, porque ni siquiera con los modernos instrumentos de medición se puede reunir información detallada de cada partícula de gas.

No obstante, Maxwell manifestó cierta incomodidad ante la teoría cinética, admitiendo que rompía con la tradición mecanicista, que recurría a las leyes del movimiento de Newton para deducir las trayectorias exactas de los componentes de un sistema, como se hace para explicar, por ejemplo, los movimientos planetarios. En otras palabras, se trataba de una nueva forma de hacer ciencia. Maxwell se dio cuenta de que la teoría tenía profundas consecuencias filosóficas y, como veremos más tarde, no se habría atrevido a publicarla de no haber existido un buen precedente.

*En realidad, la velocidad *media* y la velocidad *más probable* de la curva de distribución no son idénticas, difieren en un pequeño factor. El pico de la distribución es la velocidad más probable; la velocidad media es ligeramente mayor que ésta, porque la curva desciende más lentamente de lo que asciende.

La curva de probabilidades de distribución de las partículas de gas supone una contribución fundamental a la teoría cinética, pero la verdad es que Maxwell la dedujo empleando una fuerte dosis de conjeturas –aunque bien informadas– en lugar de matemáticas exactas. Ludwig Boltzmann (1844-1906), un inquieto matemático austríaco, abordó la tarea con más rigor.

Tras dedicarme regularmente a revisar la literatura científica en busca de novedades, me he percatado de que todo artículo cuyo título empiece “Nuevos hallazgos sobre...” merece poco más que una lectura superficial. Suelen ser palabrería científica sobre “Las cosas sueltas de las que no mereció la pena hablar en nuestro último artículo”. Así que resulta humillante comprobar que, de haber tomado esta actitud en 1872, habría pasado por alto uno de los artículos más explosivos del siglo. En “Nuevos hallazgos sobre el equilibrio térmico de las moléculas de gas”, Boltzmann no sólo demostró que los estudios de Maxwell eran irrefutables, sino que confirmó que, tal y como estipula la Segunda Ley de la Termodinámica, hay procesos irreversibles; y demostró por qué.

Maxwell probó que, cuando alcanzan cierta distribución de velocidades maxwelliana, las partículas de gas permanecen en el estado en que se encuentran, pero nada dijo de la forma en que llegan a ese estado. Boltzmann sí lo hizo: inventó una forma de calcular los cambios probables en la distribución de velocidades a lo largo del tiempo. Este matemático austríaco demostró que, para las partículas que se mueven aleatoriamente, “cualquiera que sea la distribución inicial de energía cinética, siempre tiende, transcurrido un periodo largo de tiempo, a identificarse con la curva de distribución de Maxwell”.¹¹

Es decir, Boltzmann observó el *cambio* bajo el prisma de la energía cinética, lo que situó en primer plano la Segunda Ley de la Termodinámica. Clausius había dicho que la entropía siempre aumenta durante un proceso irreversible; Boltzmann aclaró lo que esto significaba para las probabilidades de los movimientos de las moléculas. Demostró que la entropía puede equipararse con el número de posibles composiciones moleculares que, a escala normal, parecen idénticas.

Imaginemos el globo que un niño sostiene de una cuerda. Está lleno de moléculas de gas que se mueven al azar. Pues bien, la colisión de estas partículas con la pared elástica es el motivo de la presión que mantiene hinchado el globo. En cualquier instante, cada una de las moléculas del

gas sigue una trayectoria en particular con una velocidad en particular. Si contásemos con una cámara tan sofisticada que pudiera tomar instantáneas en las que aparecieran todas esas partículas, entonces, dos instantáneas tomadas con una hora –o un minuto, o un segundo– de diferencia, mostrarían composiciones muy distintas. Debido al elevado número de partículas, podríamos tomar un billón de instantáneas sin obtener la misma imagen. Pero en la escala en la que normalmente se efectúan los experimentos de laboratorio, el gas es el mismo en todos los casos: sigue teniendo la misma temperatura, presión y volumen.

En ese caso, el número de posibles composiciones moleculares es astronómico, pero, no obstante, finito. Podemos imaginar composiciones que *no* son equivalentes –por ejemplo, con todas las partículas en una mitad del globo–. En ese caso, la mitad vacía se desinflaría. Porque las partículas se mueven al azar y no hay nada en absoluto en las leyes de la física que evite esa composición, que puede surgir por pura casualidad. Pero la probabilidad de que todas las partículas adquieran de pronto velocidades que las sitúen sólo en una de las mitades del globo es tan minúscula que apenas se diferencia de cero. Y lo mismo sucede con casi todas las distribuciones en las que las partículas no están repartidas por igual en el interior del globo.

Por tanto, el globo permanece hinchado. Y no porque las leyes del movimiento de Newton lo digan, sino porque las distribuciones de partículas que garantizan que así sea son *abrumadoramente* más probables que las demás, sencillamente porque son muchas, muchas más de las que hay en otra composición no equivalente. Al equiparar la entropía de un estado con el número de composiciones moleculares equivalentes con las que se corresponde, Boltzmann estaba diciendo que el estado de un globo completamente hinchado tiene el máximo de entropía. Para él, la ecuación matemática que relacionaba la entropía con el número de “micro-estados” de un sistema fue la cumbre de su vida profesional. Y esa enigmática fórmula, $S = k \log W$, está grabada en la lápida de su tumba.

Cuando se produce un cambio en algún sistema, la entropía aumenta porque la nueva disposición de las partículas que constituyen ese sistema es más probable que la anterior. Por decirlo de otra manera, la dirección del cambio –la flecha del tiempo– está determinada por las probabilidades. Un gota de tinta se disuelve y se dispersa en el agua porque es mucho más probable que, a causa de sus movimientos aleatorios, las

partículas de tinta se alejen de la gotita original en todas direcciones y no que todas las partículas conspiran para que la gota se mueva al unísono hacia un lado o, por ejemplo, se encoja.

Lo importante de esta explicación de la Segunda Ley de la Termodinámica es que demuestra de qué forma la irreversibilidad del tiempo puede producirse en la operación de leyes mecánicas que no privilegian ninguna dirección a lo largo del tiempo. Imaginemos una película en la que dos bolas de billar se acercan, chocan y se separan. Si la proyectásemos al revés, no veríamos en la película nada extraño: de adelante atrás, el choque también obedece a las leyes de Newton.* Por el contrario, el espectador sí advertiría el truco en la proyección al revés de la dispersión de una gota de tinta en un vaso de agua cristalina, por mucho que cada una de las colisiones individuales de las partículas que “crean” esta composición se parezcan a las de las bolas de billar del ejemplo anterior. Esto se debe, sencillamente, al efecto de las grandes cifras en la probabilidad de ciertos procesos. La entropía no aumenta por decreto cósmico, lo hace tan sólo porque la probabilidad de que lo haga es espectacularmente superior a la de que no lo haga.

La teoría de Maxwell y Boltzmann no se deriva más que de la aplicación de las leyes del movimiento de Newton a enormes cantidades de moléculas en movimiento –a partir de llamada mecánica clásica– y marca el comienzo de la *mecánica estadística*. Es el campo que proporciona a la física moderna su principal marco organizativo. Relacionando la termodinámica con las propiedades de los átomos en movimiento, la mecánica estadística describe el comportamiento de la materia de arriba abajo.

El paso del determinismo newtoniano a la ciencia estadística es lo que hace posible una física de la sociedad. El camino no fue fácil pero, como veremos, podría haber sido aun más difícil si los científicos y filósofos no hubieran empezado a darse cuenta de que, en esencia, la sociedad es un fenómeno estadístico.

* Esto presupone que en el choque no se pierde ninguna energía cinética en forma de ruido o de calor por fricción. Por supuesto, en el mundo real, estos procesos disipativos no ocurren; incluso el choque de dos bolas de billar es un proceso irreversible que da como resultado un aumento de la entropía.

III
LA LEY DE LOS GRANDES NÚMEROS
REGLAS EN EL CAOS

Puede afirmarse sin temor a exagerar que se puede aprender más psicología en los datos estadísticos que en todos los filósofos –salvo Aristóteles.

WILHELM WUNDT (1862)¹

Introducido en la masa y en relación tanto a las leyes físicas como a las leyes morales de su existencia, la tan cacareada libertad del hombre desaparece y apenas puede citarse una sola acción de su vida en la cual los usos, las convenciones y las crudas necesidades de su ser no parezcan imponérsele como inevitables en lugar de permitir que queden a la libre elección de cada uno.

JOHN HERSCHEL (1850)²

Si hay alguna precisión, hay alguna ciencia.

HERBERT SPENCER (1880)³

Ludwig Boltzmann no fue un hombre feliz. Su poema “Beethoven en el Cielo”, escrito cinco o seis años antes de su muerte, expresa una angustia que, evidentemente, es la del propio autor y también el presentimiento de lo que estaba por llegar:

Con un tormento que preferiría no recordar
Mi alma escapó por fin de mi cuerpo mortal.
¡Ascenso a través del espacio! Qué dicha flotar
para alguien que ha sufrido tanta aflicción y dolor.⁴

Es posible que sus logros científicos le reportaran más “aflicción y dolor” que alegrías y satisfacciones, porque sus ideas suscitaron el furibundo ataque de varios de sus coetáneos. Aunque hoy la mayoría de los científicos coinciden con ella, su explicación de la flecha del tiempo deja abiertos muchos interrogantes en los que sus adversarios hincaron los dientes. Boltzmann respondió con firmeza a los ataques, pero estaba descorazonado.

Boltzmann era por naturaleza dubitativo y vacilante, y su pesimismo se acentuó en 1889, cuando su hijo mayor murió de apendicitis. Se volvió ansioso, incapaz de sentirse a gusto en ninguna de las diversas universidades austríacas y alemanas a las que se incorporó. El 5 de septiembre de 1906, mientras se encontraba de vacaciones con su familia en Duino, localidad cercana a Trieste, se ahorcó. Tenía sesenta y dos años.

La física teórica no parece una actividad capaz de poner en peligro la vida, pero lo cierto es que el suicidio de Boltzmann encontró eco en el de Paul Ehrenfest, su brillante sucesor, que se pegó un tiro en 1933. (Tras recordar estos episodios desgraciados, el físico David Goodstein dice con aspereza al lector de su moderno libro de texto que “ahora vamos a estudiar la mecánica estadística”).⁵

Sería poco sabio extraer alguna conclusión de los azares psicológicos de los físicos de principios del siglo XX antes de preguntarnos si el índice de suicidios entre los físicos era mayor al del conjunto de la población. La Viena *fin de siècle* era una hoguera de debates intelectuales alimentada por figuras como Sigmund Freud, Arnold Schoenberg, Ludwig Wittgenstein y Robert Musil; pero, como señaló Musil, sus ciudadanos no eran más que una multitud muda y sin alma sometida por las convenciones. “Sencillamente, la idea —dice en *El hombre sin atributos*— de que personas que viven así puedan reunirse alguna vez para la navegación planificada racionalmente de su vida y de su destino espirituales no era realista; era ridícula”.⁶

Resulta inquietante hasta qué punto estaba extendido el suicidio en aquella sociedad rígida y materialista. Así murieron tres hermanos de Wittgenstein, un hermano de Mahler y, en 1889, Rodolfo de Austria, heredero de la corona (que primero mató a su amante). La triste muerte de Boltzmann no nos dice nada de un contexto más amplio hasta que se la considera a la luz de las relevantes estadísticas demográficas de la época.

Para nosotros, esto es evidente, pero antes del siglo XIX casi nadie habría pensado así. Valorar los acontecimientos individuales en el con-

texto de su grado de incidencia es una práctica relativamente moderna. Sin ella, el mundo está maduro para la magia, la superstición, los milagros y las teorías conspirativas. Unos cuantos sucesos aislados pueden dar pábulo a lo sobrenatural. Incluso hoy en día hay quien mira la relevancia de las estadísticas por encima del hombro, a la luz de valoraciones de riesgo y coincidencias subjetivas. Cuando el *medium* Uri Geller detuvo, en apariencia, algunos relojes entre su audiencia televisiva en la década de 1970, nadie hizo mención a la probabilidad de que tal cosa ocurriera por casualidad debido al elevado número de telespectadores que seguía su programa.*

Siempre que alguien trata de encontrar algún sentido al comportamiento de una masa, sea ésta de átomos o de personas, las estadísticas son indispensables. Ahora esto nos parece tan fuera de cuestión que resulta difícil comprender la urgencia de los argumentos filosóficos que rodearon el empleo de las estadísticas en la ciencia del siglo XIX. Da la impresión de que, en esa época, Dios y el libre albedrío eran rehenes de los números. Las raíces de una física de la sociedad se enredan en este debate, así que nos vamos a encontrar con que alguna de las cuestiones morales que se suscitaron hace más de cien años prefiguran las que en la actualidad han motivado los descubrimientos descritos en el presente libro.

La historia de la mecánica estadística perfilada en el capítulo anterior es la ortodoxa, la que los físicos suelen contar. Es raro que alguien dé alguna pista de cómo empezó todo en realidad —no sólo entre los gases invisibles del laboratorio, sino en el comportamiento de las personas en sociedad—. Hablar de una física de la sociedad quizá suene muy posmoderno, pero lo cierto es que no hay nada nuevo bajo el sol.

MEDIR LA SOCIEDAD

Podría decirse que en el *Leviatán* Thomas Hobbes llevó a su conclusión lógica la analogía de su mentor Francis Bacon entre el “Cuerpo Natural” y el “Cuerpo Político”. Esta idea suponía que la política podría ser

* Los lectores españoles de más de cuarenta años recordarán que, en España, Uri Geller se hizo famoso no por detener los relojes de los telespectadores, sino por conseguir que muchos de éstos doblaran por simple fricción la cucharilla que les había pedido que cogieran. [N. del T.]

una especie de ciencia natural en la que la anatomía esperaba ser diseccionada por el escalpelo de la investigación sistemática y racional. En un intento de crear una teoría política de carácter científico, Hobbes escogió la física mecánica como marco de trabajo.

Hoy pensamos la física como una ciencia más que nada cuantitativa, por no decir matemática. Los físicos miden los números fundamentales de la naturaleza hasta la saciedad. Su literatura formal está plagada de símbolos, gráficos y ecuaciones. Así no eran las cosas en tiempos de Hobbes, pero todavía resulta asombroso que el *Leviatán* sea plenamente discursivo –no hay en él ni un solo número o ecuación–. A Hobbes le gustaba recurrir a analogías físicas, pero no tenía intención de convertir la ciencia política en una ciencia matemática.

Y sin embargo, era inevitable que eso ocurriera si el empeño no consistía tan sólo en tomar prestadas las ideas, sino en compartir la fuerza demostrativa de la ciencia natural. William Petty, que era discípulo de Hobbes, parece reconocerlo así al apelar a una “aritmética política”. “Hacer política –afirmó– sin conocer su simetría, tejido y proporción, es tan superficial como una charla de señoras mayores y de empíricos”.⁷

¿Qué números se proponía manipular esa aritmética? Pues, naturalmente, los que miden la sociedad. En la década de 1660, John Graunt (1620-1674), mercero londinense amigo de William Petty, introdujo el estudio de las “cifras de población” como medio para guiar la política social. Entre las cifras que más le preocupaban estaba el índice de mortalidad. En sus *Observaciones sobre los datos de mortalidad* (1662) elaboró tablas con los índices de mortalidad en las que “cualquier hombre” podía “corregir [sus] posturas y presentar otras por su cuenta”.⁸ ¿Cómo puede nadie, se preguntaba, legislar y gobernar razonablemente sin conocer los datos de nacimiento y muerte de la población?

Las estadísticas de Graunt no eran precisamente un modelo de fineza metodológica. Como él mismo admitía sin ambages, las humildes almas responsables de registrar las muertes se dejaban comprar con facilidad “tras las brumas de una jarra de cerveza y un soborno de dos monedas en lugar de una, que era lo que costaba la tasa”, para que anotaran como causa de la muerte algo anodino (como, por ejemplo, tisis), cuando la verdad era más escandalosa (por ejemplo, sífilis). Sin embargo, las tablas de causas y edades de la muerte eran un pródigo manantial para quienes querían comprender los flujos de la sociedad. Aunque no era más

que un comerciante, Graunt se convirtió en miembro electo de la Royal Society y Carlos II declaró: “Si encuentran a otro comerciante, admítanlo sin dilación”.⁹

William Petty continuó revisando las *Observaciones* de Graunt tras la muerte de éste. Fue el primero que estudió economía política por medio de esas estadísticas sociales, lo cual, sostuvo, proporcionaría una base racional en la formulación de cualquier política. En este aspecto era un empirista y trabajaba con observaciones de agregados sociales en lugar de extrapolar teorías basadas en suposiciones acerca de la psicología fundamental de los individuos, a la manera de Hobbes. Petty disfrutó del favor de Carlos I, Carlos II y Jacobo II (y además trabajó para Cromwell –lo cual da buena cuenta de su pragmatismo–), amén de ser miembro fundador de la Royal Society. Sin embargo, todos desoyeron sus recomendaciones políticas, lo cual, francamente, dio igual la mayor parte de las veces. Con frecuencia, Petty ejemplifica los peligros de una aproximación hiperracional y analítica a la política social que no tiene en cuenta los costes humanos.

Las cifras de población –las tasas de natalidad y de mortalidad– constituyeron la mayor preocupación de los primeros que analizaron la sociedad desde un punto de vista estadístico. Se consideraba que, para una nación, era de capital importancia que el número de sus súbditos se multiplicara –una necesidad que, al fin y al cabo, había santificado la Biblia–. El poder y la gloria de un país, se creía, quedaban reflejados en el tamaño de su población. Hasta tal punto era así, que algunos eruditos afirmaban que el origen de las guerras de conquista estaba sobre todo en el deseo de aumentarla. A mediados del siglo XVIII, Johann Peter Süssmilch (1707-1767), capellán del ejército alemán, sostuvo que para evitar las guerras bastaba con eliminar todas las barreras que impedían el crecimiento de la población, lo cual acabaría con la necesidad de los reyes de adquirir nuevos súbditos más allá de las fronteras de su reino.

Centrarse en la mortalidad era comprensible en una época que tan familiarizada estaba con la muerte. Las masas morían en ciudades malolientes, “Lugares donde se Malgasta y se Destruye la Humanidad”, según Thomas Short (1767).¹⁰ El hambre en el campo era endémica. Pocas guerras fueron tan devastadoras como la de los Treinta Años, aunque la guerra era todavía parte integrante de los problemas humanos y una constante fuente de desgaste de la población. La procreación era el único

remedio. Aunque desde nuestra perspectiva resulte irónico, los protestantes de Inglaterra y de Alemania denunciaron al catolicismo porque su defensa del celibato comprometía el crecimiento de la población.

En 1826, cuando el economista inglés Thomas Malthus (1766-1834) publicó su *Ensayo sobre el principio de la población*—crítica muy convincente sobre el aumento desenfrenado de la población que ejerció una enorme influencia en Darwin y en Marx—, los gobiernos de Europa y Estados Unidos habían empezado a apreciar las ventajas de contar a sus ciudadanos. De hecho, los censos se remontan a los esfuerzos de Norman por registrar en el *Domesday Book* la población de Inglaterra en el siglo XI, si bien esto no fue tanto un esfuerzo de cuantificación como la creación de una base burocrática para explotar a las poblaciones conquistadas. En el siglo XVIII se pensaba que las cifras de población enmascaraban códigos que permitían interpretar el funcionamiento de la sociedad. Süßmilch, por ejemplo, sostenía que las diferencias de las tasas de natalidad y de mortalidad de niños y niñas se equilibraban perfectamente a fin de que todos los ciudadanos tuvieran perspectivas de matrimonio. En otras palabras, del caos de la vida humana surgía una especie de ley de las masas que permitía una sociedad estable.

Las observaciones de Süßmilch contribuyeron a consolidar la idea de que la sociedad observaba reglas que ningún gobernante decretaba. Esto motivó que, en 1784, Immanuel Kant hablase de unas “leyes universales” que,

por oscuras que sean sus causas, nos permiten albergar la esperanza de que, si atendemos al juego de la libertad de la voluntad humana, podamos discernir en él un movimiento regular, y que lo que parece complejo y caótico para el individuo sencillo pueda ser considerado desde el punto de vista de la especie humana en su conjunto muestra de una evolución constante y progresiva aunque lenta a partir del patrimonio original.¹¹

Por un lado, esa creencia en unas “leyes” de la sociedad que se encuentran más allá del alcance de los gobiernos fue un producto de la fe de la Ilustración en el orden del universo. Por otro, no resulta difícil advertir en ella el espectro de la Revolución Industrial, con sus anónimas y esforzadas masas semejantes a una colmena de insectos. Antes del siglo XIX,

las leyes que se aplicaban a las “cifras de población” de Graunt parecían una evidencia de sabiduría y planificación divinas. Posteriormente, a muchos especialistas les parecieron las condiciones previas de la catástrofe y la revolución.

Este estudio de las cifras de población necesitaba un nombre. En 1749, el erudito alemán Gottfried Achenwall sugirió que, puesto que esa “ciencia” se ocupaba de los “estados” naturales de la sociedad, debería llamarse *Statistik*. A John Sinclair, ministro presbiteriano escocés, el término le gustó lo suficiente para introducirlo en el idioma inglés en su épico *Statistical Account of Scotland [Recuento estadístico de Escocia]*, el primero de cuyos veintidós volúmenes apareció en 1791. Pero los inventores de la disciplina no eran matemáticos; en realidad, casi no podría llamárseles “científicos”. Eran *tabuladores* de cifras, y se llamaban a sí mismos “estadísticos”.

LA IGLESIA DE NEWTON

Quienes se dedicaban a recoger datos estadísticos pronto se dieron cuenta de que esos datos nos revelan algo no sólo de lo que ha ocurrido, sino de la *probabilidad* general de lo que podría ocurrir. Por tanto, las estadísticas empezaron a atraer el interés de los matemáticos que ocupaban su tiempo con una de las ramas más filosóficamente recónditas y opuestas a la intuición de su materia de estudio: la teoría de las probabilidades.

Esta disciplina tiene su origen no en las cifras de población, sino en el juego. Cuando se juega a un juego de azar, lo mejor es conocer las probabilidades de antemano. Si al jugar a la ruleta alguien no sabe la diferencia entre apostar al negro o al número quince, lo más seguro es que no dure mucho tiempo en el casino. Los juegos con dados u otros elementos aleatorios tienen una larga historia, y en el siglo XVIII los matemáticos empezaron a investigar las reglas que los gobiernan. En esta materia aparentemente tan frívola, el matemático francés Marie-Jean-Antoine-Nicolas Caritat de Condorcet (1743-1794) encontró los instrumentos que necesitaba para elaborar una de las más optimistas de todas las utopías basadas en la ciencia.

Condorcet detalló su punto de vista en un libro escrito poco antes de que los líderes de la Revolución Francesa lo condenaran a la guillotina.

Su *Esbozo de un cuadro histórico de los progresos del espíritu humano*, escrito en 1793, es un himno a una especie de racionalidad que Condorcet debió de encontrar en escasa medida en el Reino del Terror. La sociedad, creía, debe fundarse en la razón y guiarse en su gran formalización: la ciencia. El siglo XVIII fue una época verdaderamente radical, cuando la fe en la libertad y la igualdad (pese al Terror de Robespierre) era algo más que la materia de las buenas intenciones, y muchos filósofos de la Ilustración confiaban sinceramente en que los principios aliados de la razón darían paso a una gloriosa época de libertad. Condorcet apoyaba la igualdad de la mujer y, en 1792, propuso quemar todas las cédulas nobiliarias –incluidas las suyas, pues era marqués–. Entabló amistad con Voltaire, cuyos escritos utópicos son, sin embargo, mucho más cínicos.

Condorcet fue un genio matemático precoz y sus primeros esfuerzos llamaron la atención del eminente académico francés Jean Le Rond d'Alembert. Bajo la influencia de D'Alembert, pasó de la pura matemática de la probabilidad a considerar asuntos sociales y económicos. En *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix* [*Ensayo sobre la aplicación del análisis de probabilidades a las decisiones de la mayoría*], su estudio de la toma de decisiones democráticas, concluyó con sus amigos los estadísticos que en el caso de existir (como en efecto sostenía) una ciencia de los asuntos humanos con leyes y axiomas propios, tiene que haber una ciencia estadística. Para observar esas leyes, uno debe reunir numerosos datos: "Todo lo que hace falta para reducir el conjunto de la naturaleza a leyes similares a las que Newton descubrió con ayuda del cálculo es contar con un número suficiente de observaciones y una matemática lo suficientemente compleja".¹²

Condorcet previó que un científico así equipado sería capaz de predecir el resultado de las decisiones democráticas, de modo que la propia historia se convirtiera en una ciencia. En tal caso nos encontraríamos en el umbral de la verdadera utopía, como indicó en su *Esbozo*:

Para el filósofo que lamenta los errores, los crímenes, las injusticias que todavía contaminan la tierra, y de las cuales es con frecuencia la víctima, ¡cuánto consuelo alberga esta visión de la especie humana, emancipada ya de ataduras, liberada del imperio del destino y del de los enemigos de su progreso, avanzando

con paso firme y seguro por la senda de la verdad, la virtud y la felicidad!¹³

No resulta difícil advertir en este pasaje un intento del autor de encontrar su propio consuelo a las puertas de un futuro desolador. El *Esbozo* fue escrito apresuradamente, en secreto, mientras los agentes de Robespierre buscaban a su autor. La suya fue una verdadera caída en desgracia que nos habla de la naturaleza de las revoluciones.

En 1792, la reputación intelectual de Condorcet y su apoyo a la causa republicana le valieron un lugar en el Comité de los Nueve, encargado de redactar la nueva Constitución francesa. Entre sus compañeros se encontraba Thomas Paine, quien, tras exiliarse de Gran Bretaña a raíz de la publicación de su obra *Los derechos del hombre*, había obtenido la ciudadanía francesa. Robespierre, resentido por no haber sido incluido en el comité, congeló el borrador de la Constitución. Cuando aceptaron una nueva versión, redactada apresuradamente por otro comité improvisado y llena de lagunas, Condorcet publicó una carta anónima urgiendo a la ciudadanía a que la rechazara. La autoría de la carta no se mantuvo en secreto mucho tiempo y Condorcet fue encarcelado, acusado de alta traición.

El *Esbozo*, escrito mientras Condorcet se ocultaba en un piso de París, era, teniendo en cuenta las circunstancias que rodearon su redacción, sorprendentemente optimista. Condorcet considera que la humanidad ha "evolucionado" desde el nivel de los animales hasta un estado de inteligencia superior donde las personas poseen un altruismo innato. No ve por qué esta evolución (que anticipaba a Darwin) no puede continuar hasta que las personas se "perfeccionen", una idea que supone un marcado contraste con el punto de vista de Jean-Jacques Rousseau, para quien el hombre civilizado es un ser corrupto. En la futura utopía, afirma Condorcet, la ciencia médica conquistará todas las enfermedades y las personas serán demasiado ilustradas para ir a la guerra. La educación abolirá las desigualdades sociales y todos hablarán el mismo lenguaje:

¿No hemos llegado ya a ese punto en que no hay nada que temer, ni de los nuevos errores, ni de una posible recaída en los pasados? [...] Todo indica que está próxima una de las grandes revo-

luciones de la historia humana [...] El presente estado de nuestros conocimientos nos asegura que será [una revolución] feliz.¹⁴

Esta elevada visión no era la de un hombre de mundo. Aunque Condorcet eludió a sus captores cuando fueron a apresarlo, sus refinados modales despertaron sospechas en la posada campestre a la que había huido y lo prendieron de inmediato. Fue internado en la cárcel de Bourglala-Reine, próxima a París. Siendo la guillotina su destino más probable, se envenenó, al parecer, en su celda. Si hubiera conseguido vivir oculto algunos meses, habría escapado de su perseguidor, porque Robespierre murió guillotinado en julio de 1794.

El *Esbozo* fue muy celebrado póstumamente. Malthus lo leyó, pero no compartía su optimismo. Condorcet fue consciente de que, con el tiempo, el crecimiento de la población podría agotar los recursos disponibles y amenazar la estabilidad de la civilización, para lo cual tenía un remedio sencillo: el control de la natalidad. A Malthus el problema no le parecía tan fácil. Admitía que, a causa de “las pasiones de la humanidad”, el crecimiento de la población escapaba del control de los gobiernos tanto cuando éstos se proponían estimular su crecimiento como cuando querían limitarlo. Consideraba que la multiplicación exponencial de la población era una “ley natural”, mientras que la sociedad no podía aumentar la producción de alimentos al mismo ritmo. Por eso, más tarde o más temprano, las naciones sucumbirían a la superpoblación, la miseria, la mala salud y la inquietud social –lo cual las llevaría a tener que optar entre represión y revolución–. Para escapar a ese destino, los ciudadanos harían bien en aceptar que, por sí solos, los estados, por buenos que sean, no pueden evitarles la catástrofe. En vez de ello, afirmó Malthus en su influyente *Ensayo* de 1826, era necesario conocer las leyes irrevocables, la “estructura interna de la sociedad”.

Otros, aunque menos pesimistas, coincidían con el punto de vista de Malthus de que sí existía una estructura interna, un conjunto de leyes que dictaban la forma en que la sociedad se comportaba y evolucionaba. Estas leyes habían de guardar con la sociedad la misma relación que las leyes de la mecánica de Newton con el movimiento de los cuerpos. La idea fue particularmente popular en Francia. El barón de Montesquieu (Charles Louis Secondat de la Brède, 1689-1755) la mencionó en *El espíritu de las leyes* (1748), que precedió a Condorcet en varias décadas. Claude-Henri

de Rouvroy, conde de Saint-Simon (1760-1825), compartió el sueño de Condorcet de una sociedad gobernada por la razón científica e imaginó que podría conducir a la fundación de una “religión newtoniana”. La idea apareció de forma particularmente explícita en *El sistema newtoniano del mundo: el mejor modelo de gobierno; poema alegórico* (1728), de Jean Théophile Desaguliers, en el cual el autor escribió que el concepto de fuerza de atracción “es ya tan universal en la política como en la filosofía”.¹⁵ El filósofo escocés David Hume (1711-1776) expresó un deseo en su *Tratado de la naturaleza humana* (1739-1740): el de convertirse en el Newton de la ciencia moral reduciendo la naturaleza humana a principios fundamentales a través del empirismo en lugar de un *apriorismo* cartesiano. Cuando, en 1741, Hume propuso “que la política se reduzca a una ciencia”,¹⁶ la idea no había convertido en lugar común, hasta el extremo de que era motivo de burlas: el Gulliver de Jonathan Swift amonesta a los brobdingnagianos por no haber “reducido la política a una ciencia, como los cerebros más agudos de Europa han hecho ya”.¹⁷

Fue Hume quien, en la década de 1760, presentó a Adam Smith, en un *Grand Tour* por Europa que realizaba en compañía de su pupilo, el joven duque de Buccleuch, a François Quesnay (1694-1774), el físico de Louis XIV en Versalles. En la década de 1760, Quesnay había empezado a interesarse por la economía y recopilaba datos y cifras con la esperanza de discernir, a partir de ellos, “fuerzas sociales” semejantes a las fuerzas físicas de Newton. Su *Tableau économique* (1758) es una de las primeras obras de teoría económica –los discípulos de Quesnay se contaron entre los primeros en recibir el nombre de *économistes*–. Su obra dejó una huella tan evidente en *La riqueza de las naciones* (1776) (véanse pp. 212-213) que Adam Smith se la habría dedicado a Quesnay de no haber muerto este dos años antes de su publicación.

La creencia en una teoría política “científica” había triunfado sobre todo en el extremo liberal del espectro político. (Es en parte por esta razón por lo que a Thomas Hobbes puede considerársele un liberal.) Cuando Thomas Jefferson escribió la Declaración de Independencia estadounidense, su idea de una nación libre y feliz era la de un hombre enamorado de la mecánica de Newton y de los ideales de la Ilustración, de un hombre que creía que los seres humanos están impelidos a la felicidad igual que las manzanas están impelidas a caer al suelo. Jefferson consideraba que la felicidad podía medirse con la misma precisión cuan-

titativa con la que la materia puede pesarse. El irlandés Edmund Burke (1729-1797), a quien muchos consideran el padre del conservadurismo, abjuró de esta idea, sosteniendo que las leyes del Estado y las instituciones no pueden deducirse de principios fundamentales, sino que surgen empíricamente a partir de procesos históricos particulares. Por esta razón, uno debería considerar esas leyes como probadas y comprobadas, atemperadas por la experiencia y la tradición y no tan sólo elaboradas a partir de teorías *racionales*, abstractas. Al fin y al cabo, sostenía Burke, las personas son demasiado complejas para que se pueda extrapolar de ellas algún análisis *científico*:

En la tupida y complicada masa de las pasiones y preocupaciones humanas, los derechos primitivos de los hombres pueden sufrir tal variedad de refracciones y reflexiones que llega a ser absurdo hablar de ellos como si continuaran siendo fieles a la simplicidad de su dirección original.¹⁸

En otras palabras, sus “trayectorias” son aleatorias. ¡Pero qué revelador resulta que incluso Burke cayera en la tentación de formular su argumentación con la terminología de la mecánica y la óptica newtonianas!

Pero fue el filósofo francés Auguste Comte (1798-1857), que basó su pensamiento en una religión racional que auguraba el progreso y el bienestar de la humanidad, quien llevó a su cenit el espíritu de la Ilustración. Como Adam Smith, Comte creía que esos fines se obtendrían revelando las leyes naturales de la sociedad más que sus interferencias políticas. Aunque no compartía el entusiasmo de los *estadísticos* por la cuantificación, acuñó un término que expresaba su fe en una ciencia de la civilización y su deseo de que ésta cobrara forma: *physique sociale*. En su *Cours de philosophie positive* (1830-1842), sostuvo que esa ciencia completaría la descripción científica del mundo que habían iniciado Galileo, Newton y otros:

Ahora que la mente humana ha comprendido la física terrestre y celeste, mecánica y química, la física orgánica, la vegetal y la animal, queda una ciencia que ha de completar la serie de ciencias de la observación: la física social. Es la física de la que los hombres tienen mayor necesidad, y el objetivo principal de la presente obra es establecerla.¹⁹

ORDEN A PARTIR DEL CAOS

Nadie hizo más por difundir la idea de una comprensión científica de la sociedad que el astrónomo belga Adolphe Quetelet (1796-1874) (véase figura 3.1). En la obra de Quetelet se congregan todas las ramas que desarrollaba la investigación social –la política mecanicista de Hobbes, el valor de la cuantificación estadística y la creencia en las leyes naturales de la sociedad– y, durante medio siglo, no pareció haber demarcación alguna entre la física, la matemática, la economía, la política y la sociología.

Como Hobbes, Quetelet tenía gran interés por demostrar que la perspectiva científica de la sociedad podía promover la estabilidad. Realizó sus investigaciones en una época de gran agitación política en Bélgica. A finales del siglo XVIII, la mayor parte del país había pasado a formar parte de Francia, pero las provincias del sur se habían incorporado a los Países Bajos. En 1830, los belgas se sublevaron y declararon su independencia. El conflicto que se inició a partir de entonces imposibilitó cualquier tipo de investigación o estudio. Los científicos abandonaron su trabajo para incorporarse al ejército y las universidades cerraron. El Observatorio

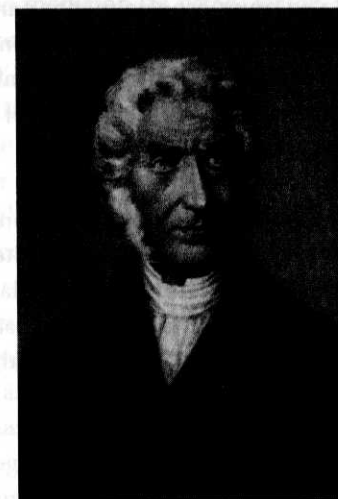


Figura 3.1. Adolphe Quetelet, cuya *mécanique sociale* fue un intento de encontrar unas “leyes de la sociedad”, análogas a las leyes de Newton que gobiernan el movimiento de los cuerpos inanimados.

Real de Bruselas, que Quetelet ayudó a formar y del cual fue director, fue ocupado por los soldados y, según sus propias palabras, “se convirtió en una fortaleza [...] rodeada de pozos y murallas”.²⁰ A los pocos meses de iniciarse la revolución, Quetelet publicó su primer artículo sobre *mécanique sociale*, disciplina aliada explícitamente con la física social de Comte. Estableciendo analogías directas entre las fuerzas que organizan un sistema solar y las de un sistema social metódico, ordenado, pretendía demostrar que la sociedad se regía por leyes tan estrictas como las que rigen el movimiento de los astros.

Había un magnífico precedente para esas comparaciones. En realidad, Quetelet tenía la impresión de que los astrónomos debían dar las gracias por la introducción de la estadística en los estudios sociales. La primera tabla de índice de mortalidad, señaló, la había elaborado un amigo de Newton, el astrónomo Edmond Halley (que la había publicado en 1693). Quetelet argumentó que era natural que los astrónomos percibieran orden en la estructura social:

Las leyes que conciernen al hombre y las que gobiernan el comportamiento social siempre han tenido una especial atracción para el filósofo y, tal vez, muy especialmente para quienes dirigen su atención al universo. Acostumbrados a considerar las leyes del mundo material y perplejos ante la admirable armonía que allí reina, no pueden convencerse de que en el mundo animado no existen leyes similares.²¹

Lo cual a Quetelet le resultó evidente cuando, en 1823, lo enviaron al Observatorio Real de París a ampliar conocimientos en el marco de su preparación para dirigir el observatorio de Bruselas. En realidad, Quetelet descubrió muchas cosas sobre la ciencia celeste, y también que las estrellas del firmamento astronómico francés estaban muy interesadas por la estadística.

LA FORMA DEL ERROR

La figura dominante de la astronomía francesa era Pierre-Simon Laplace, que profundizó en la mecánica de Newton y la aprovechó para descu-

brir nuevos aspectos del movimiento de los planetas. Laplace era un matemático formidable, así que sabía, como lo sabían sus coetáneos, que sus mediciones de los movimientos de los cuerpos celestes rara vez coincidían exactamente con la estricta regularidad matemática que demandaban las leyes de Newton. Toda medición incurre en un error que puede dar pie a desviaciones aparentes de las fluidas relaciones previstas por las leyes de la mecánica.

Los astrónomos franceses desarrollaron métodos para ocuparse de los errores que permitieron describir las suaves curvas o líneas que explicaban la dispersión de los datos. Laplace y uno de sus discípulos, Siméon-Denis Poisson (1781-1840), pensaban que los errores de medición eran sobre todo aleatorios. Podían ser de cualquier magnitud, pero no se producían con la misma probabilidad. Asimismo, la probabilidad de que se produjera un error concreto —una desviación de esa magnitud a partir de la “ley verdadera” que gobernaba las observaciones— decrecía a medida que el tamaño de ese error aumentaba. Es lo que ocurre si alguien se propone medirse el pie utilizando una regla, hay más probabilidades de equivocarse por algún milímetro que por algún centímetro. El error no será el mismo en todas las mediciones, ni siquiera cuando se emplean las mismas técnicas e instrumentos de medición. Si usted, lector, mide los pies de todos los miembros de su familia, unas veces errará por sólo medio milímetro y otras quizá por dos. Y eso no sólo depende de la precisión de la regla que emplee, sino del cuidado con que haga cada medición. En gran medida, el error es cuestión de azar. Los astrónomos franceses se dieron cuenta de que el índice de error guarda relación con la teoría de las probabilidades.

Para saber qué probabilidad hay de que se produzca un error en particular necesitamos conocer, con una muestra de mediciones representativa, con cuánta frecuencia se produce. Es preciso reunir estadísticas de esos errores. Los científicos franceses se dieron cuenta de que los errores siempre se distribuyen de la misma forma. No sólo los errores pequeños eran, siempre, más frecuentes que los grandes, sino que la proporción inversa entre el tamaño del error y la reiteración con que se producía era predecible. Recogida en un gráfico, la distribución estadística de los errores respondía a una curva en particular que bautizaron como “curva de error” (véase figura 3.2). Su omnipresencia sirvió para que, además, la llamaran *distribución normal*. En 1807, al analizar sus propiedades, el matemático alemán Carl Friedrich Gauss (1777-1855) dio otro nombre a

esta curva con forma de campana; desde entonces, al menos en el mundo de la física, suele decirse que los datos que entran dentro de esta curva obedecen a una estadística *gaussiana*. Llamémosla como sea, la curva de errores responde, básicamente, a la distribución de probabilidades de los resultados obtenidos en un proceso aleatorio.

Esta curva la conocían ya los matemáticos interesados en las probabilidades, porque en 1733 Abraham De Moivre demostró que responde a la distribución de los resultados que se obtienen cuando se tira una moneda al aire. La misma probabilidad hay de que salga cara como de que salga cruz. El resultado depende (si no se hacen trampas) del puro azar. Ahora bien, cuando el número de veces que la tiramos es elevado, la diferencia entre las veces que sale cara y las que sale cruz es muy pequeña.

Que este resultado predecible surja de una serie de sucesos aleatorios no resulta tan sorprendente, porque, sencillamente, refleja la anulación de las desviaciones probables en una u otra dirección. Que salga cara varias veces seguidas se verá compensado por el hecho de que, tarde o temprano, salga cruz más veces que cara. La igualdad resultante nos lleva al número cincuenta, porque hay un cincuenta por ciento de probabilidades de que salga cara y un cincuenta por ciento de probabilidades de que salga cruz. A principios del siglo XVIII, Jacob Bernoulli, tío de Daniel

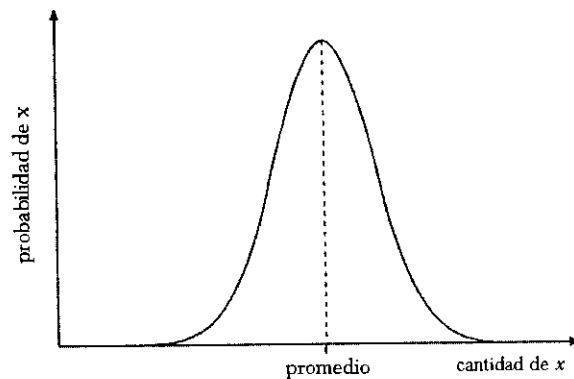


Figura 3.2. La curva de error. Esta curva en campana describe las estadísticas de todos los procesos aleatorios. (Estrictamente hablando, los matemáticos hablan de procesos *estocásticos*, lo cual quiere decir que cada resultado u observación es independiente de las demás.)

(página 45), señaló que cuando el resultado de un acontecimiento está gobernado por un ratio de probabilidad fija (en este caso 1:1), la distribución de resultados reales convergerá hacia ese mismo ratio si el acontecimiento se repite con suficiente frecuencia. Poisson consagró esta idea en 1835 con su “ley de los grandes números”, una forma de decir que el azar puro cede ante el determinismo cuando el número de sucesos aleatorios es lo suficientemente elevado. Por lo tanto, que un acontecimiento sea aleatorio no tiene por qué descartar necesariamente que se produzca dentro de una serie de sucesos predecibles.

Pero la probabilidad 50:50 no está garantizada y no siempre es observada. Si tiramos al aire una moneda diez veces, que cuatro veces salga cara y seis veces cruz no puede sorprendernos: el azar ha modificado el equilibrio en favor de las cruces, así que se ha producido una desviación del veinte por ciento con respecto a lo que parecía más probable. Cuantas más veces tiremos la moneda, más cerca estará el resultado de responder a una distribución 50:50. Si tiramos la moneda cien veces, que cuarenta y nueve salga cara y cincuenta y una cruz no es un resultado improbable –de nuevo, una diferencia de dos, pero esta vez, la desviación es menor (dos por ciento)–. Una nueva serie de cien tiradas puede dar otro resultado; por ejemplo, cincuenta y dos caras y cuarenta y ocho cruces. De Moivre demostró que, para muchas series de un número fijo de tiradas, la curva de error con forma de campana se ajusta considerablemente a la distribución de resultados.

Cuando se tira una moneda es posible, en teoría, calcular la forma de la curva de error, esto es, formular una ecuación exacta que describa la probabilidad de cada resultado en una sola serie de tiradas. Pero este cálculo es muy laborioso; y lo era mucho más con las técnicas de que disponían los científicos del siglo XVIII. Sin embargo, De Moivre demostró que era posible aproximarse a la curva con bastante precisión por medio de una ecuación matemática más simple.

Podríamos considerar las desviaciones del ratio 1:1 de caras y cruces al tirar una moneda como “errores” que alejan la “medición” de su valor “verdadero”. Podría parecer perverso hacerlo así, puesto que si no fallamos los resultados y los anotamos sin equivocarnos, no hay “error” como tal, sino, tan sólo, intervención del azar. Sin embargo, en la década de 1770, Laplace se percató de que los errores de medición también responden a factores que, aunque son demasiado complejos para ser cuan-

tificados, provocan desviaciones aleatorias del valor verdadero. De modo que empezó a emplear la ecuación aproximativa de De Moivre para cuantificar los errores en mediciones astronómicas.

En el primer tercio del siglo XIX, el matemático francés Joseph Fourier (1768-1830) amplió el campo de aplicación de la curva de error. Como director de la Oficina Estadística del Departamento del Sena, Fourier publicó varios documentos de estadísticas demográficas y contribuyó a introducir la curva en las ciencias sociales. Por su parte, Laplace también había querido aplicar la ecuación de De Moivre a la estadística social. En 1781 sostuvo que la igualdad casi total del número de nacimientos de niños y niñas en París, que a otros les parecía una señal de la divina providencia, no era más que el efecto esperable de un proceso aleatorio con dos resultados posibles, cuyas variaciones eran coherentes con la curva de error.

Cuando conoció el trabajo de Laplace, a Quetelet le impresionaron estos ejemplos y empezó a sospechar que la curva de error era el tema fundamental de la demografía humana. En 1844 demostró que la curva de distribución de las dimensiones humanas —altura y contorno— tenía el mismo perfil de campana. Para Quetelet, esto era indicativo de la regularidad y el orden de la naturaleza. Si miramos a la calle, veremos a personas de muchas tallas. Al principio puede parecer que (dentro de unos límites obvios) las dimensiones de un ser humano no son predecibles, pero si recopilamos datos suficientes, obtendremos esa curva en forma de campana.

COMPORTAMIENTO METÓDICO

Quetelet recogió de los científicos franceses la idea de que la variación está vinculada con el error. En lugar de considerar las diferencias de altura como un rasgo característico de la naturaleza, las vio como desviaciones de una forma ideal. Los errores eran menos prominentes a medida que era mayor el número de personas incluidas en la medición, tal y como predecía la ley de los grandes números de Poisson. Esto es válido, decidió Quetelet, no sólo para los rasgos físicos, sino para el comportamiento, puesto que las flaquezas del temperamento individual se desvían del promedio de las tendencias de la masa. En 1832, Quetelet escribió que,

considerada en masa, todo lo que concierne a la especie humana pertenece al dominio de los hechos físicos; a mayor número de individuos, más se suma la voluntad individual bajo la serie de datos generales que dependen de las causas generales de acuerdo a las cuales la sociedad existe y se conserva.²²

Puesto que, evidentemente, es deseable que la sociedad “exista y se conserve”, de ello se deduce que el comportamiento promedio es el comportamiento *correcto*. De este modo, la física social de Quetelet se fundó en el concepto de “hombre medio” (*l'homme moyen*), cuyas dimensiones y rasgos físicos, amén de sus atributos morales y estéticos, representaban a un hombre perfecto al que todos debían aspirar. Ser grande era ajustarse al promedio: “un individuo que, en un momento dado, sea el epítome de todas las cualidades del hombre promedio, representaría toda la grandeza, belleza y bondad del ser”.²³ Esta inquietante veneración de la uniformidad tiene su corolario en el aborrecimiento de todas las singularidades: “Las desviaciones más o menos pronunciadas del promedio han constituido [...] la fealdad en el cuerpo así como el vicio en la moral y un estado enfermizo de la constitución general”.²⁴

La idea de que la perfección moral y física de la humanidad queda reflejada en la conformidad a unos datos matemáticos se remonta al Renacimiento, cuando, además, llegaron a definirse los instrumentos para cuantificar la perfección. Pasado el tiempo, es fácil advertir en la teoría de Quetelet sobre el hombre medio un trasfondo de pureza racial y de rígida conformidad social, pero en una época en la que se creía en la fisionomía esto era perfectamente racional, aunque eso no sirva de excusa para disculpar sus tintes siniestros.

En cualquier caso, el gobierno francés no tardaría en descubrir que *l'homme moyen* tenía su utilidad. En 1844, Quetelet comparó la distribución de la altura de los hombres de la población en general con la de cien mil reclutas de leva del ejército francés y encontró una discrepancia de la que extrajo la conclusión de que unos dos mil hombres habían mentado al declarar cuánto medían, aduciendo, para evitar su alistamiento, una altura que estaba por debajo del mínimo.

Muchos coetáneos de Quetelet quedaron profundamente impresionados y mostraron un gran entusiasmo por las constantes que encontró en

las estadísticas de los asuntos humanos. Al revisar los trabajos de Quetelet en 1850, el eminente astrónomo inglés John Herschel escribió:

Nadie se ha esforzado tanto, y conseguido mayor efecto, en la recopilación y combinación científica de datos físicos en esos departamentos que dependen para su progreso de la acumulación de tales datos en masas voluminosas y vastas, a lo largo de muchos años sucesivos, y recogidos en distritos geográficos muy extensos.²⁵

Florence Nightingale insistió en que la física social de Quetelet, que ella consideraba un indicador de los designios de Dios, se enseñara en Oxford.* Karl Marx se basó en las leyes estadísticas de Quetelet para desarrollar su teoría del valor del trabajo. Y John Stuart Mill, sucesor de Jeremy Bentham en la doctrina utilitarista, creía que la obra de Quetelet apoyaba su convicción de que la sociedad y la historia estaban regidas por leyes tan absolutas (aunque más difíciles de discernir) que las de las ciencias naturales. En *Un sistema de la lógica* (1862), Mill tenía en mente la curva de error universal cuando escribió,

muchos sucesos que, por su naturaleza, parecen caprichosos e inciertos, y para los cuales en ningún caso individual existe grado obtenible de conocimientos que nos permita preverlos, ocurren con un grado de regularidad que raya lo matemático, si se tienen en cuenta cifras considerables.²⁶

LA CIENCIA DE LA HISTORIA

En Gran Bretaña, el encargado de difundir la obra de Quetelet fue Henry Thomas Buckle (1821-1862), uno de los mayores defensores de una física social vinculada a las leyes. Como muchos de los partidarios de la

* La imagen idealizada que el poeta H. W. Longfellow (1807-1882) dejó de Florence Nightingale (1820-1910) como "Dama de la lámpara" hace un flaco favor a sus logros. Era más formidable que angelical, de otro modo no habría influido tanto en el cambio de las condiciones sanitarias durante la guerra de Crimea. Menos conocida es su afición a las matemáticas, que aprendió de niña tras suplicar a sus padres que le pusieran un profesor. En Crimea recopiló estadísticas sobre los índices de mortalidad e ideó la forma de expresarlas en gráficas en forma de cuña. Se dice que la *Física social* de Quetelet era la segunda Biblia de Nightingale; su ejemplar estaba repleto de anotaciones.

filosofía positivista de Comte, Buckle quería proteger el mundo de los hombres de la intromisión de los gobiernos. De acuerdo con el punto de vista de Quetelet, los gobiernos apenas ejercían influencia alguna en las leyes estadísticas, que trascendían la intervención humana. Por su parte, Buckle sostenía que ni siquiera debía intentar alterarlas: al igual que Adam Smith, insistió activamente en el principio del *laissez faire* y en la necesidad de que los pueblos se gobernaran a sí mismos. Si se las dejaba hacer, creía, las sociedades encontrarían automáticamente "orden, simetría y ley", mientras que los legisladores ponían, "casi siempre, obstáculos a la sociedad en lugar de ayudarla".²⁷

Según Buckle, los filósofos metafísicos persiguieron en el pasado el objetivo fútil de desentrañar los mecanismos que articulan la sociedad por medio del análisis de los individuos. La ciencia empírica de la estadística social evitaba esos imponderables descubriendo las leyes que gobernaban los números. Para apoyar su tesis, a Buckle le pareció necesario demostrar los efectos de esas leyes a lo largo de la historia. Tradicionalmente, la historia se había centrado en la crónica de las vidas y hechos de reyes y reinas. La historia de Buckle sería otra cosa, sería una ciencia.

Kant anticipó esta búsqueda de las "leyes históricas" aludiendo a la forma en que el comportamiento colectivo atempera nuestra impredecibilidad individual. En su ensayo "Idea de una historia universal desde un punto de vista cosmopolita" (1784), afirmó:

Mientras persiguen sus propósitos, los individuos, e incluso las naciones, apenas se dan cuenta [...] de que, inconscientemente, avanzan guiados por un propósito natural que les es desconocido.²⁸

Buckle estaba de acuerdo. Para él, la historia estaba gobernada por una "gran verdad", la de que

las acciones de los hombres [...] nunca son en verdad incoherentes; por caprichosas que puedan parecer, forman parte del vasto sistema del orden universal [...] la regularidad subyacente del mundo moderno.²⁹

H. T. Buckle defendió su idea de orden universal en su libro *History of Civilization in England [Historia de la civilización en Inglaterra]*. Los prime-

ros dos volúmenes de su ambiciosa obra fueron publicados entre 1857 y 1861, pero, exhausto por el esfuerzo, murió antes de poder completarla. Su libro dice más del resto del mundo que de la patria del autor. Su intención era elaborar una historia universal y no pudo resistirse a ofrecer los frutos de su gran idea en los volúmenes iniciales, por mucho que, en su opinión, la historia de Inglaterra revelase las leyes de la historia con mayor claridad que la de ninguna otra nación.

En su gran compilación de constantes en las estadísticas sociales, Buckle recurrió a gran parte de los datos de Quetelet: tasas de natalidad y de mortalidad, índices de criminalidad, número de suicidios y de matrimonios. Su *Historia de la civilización en Inglaterra* contribuyó a que el ambiente intelectual británico de mediados del siglo XIX se centrara en la idea de un *laissez faire* liberal de acuerdo al cual los gobiernos eran innecesarios y, en consecuencia, no deseados. En 1860, William Newmarch, de la Sociedad Estadística de Londres, escribió:

los hombres empiezan a darse cuenta de que todo intento de elaborar o administrar leyes que no se basen en una visión certera de las circunstancias sociales no es ni más ni menos que una forma de impostura gigantesca y peligrosa [...] Desde el mayor al más pequeño, todos los temas de los que se ocupan los legisladores de acuerdo al [...] capricho [...] están gobernados por leyes propias, completas e irrefutables.³⁰

El mismo año, el economista británico Nassau Senior resumió así el espíritu de la época: “la voluntad humana obedece a leyes casi tan precisas como las que regulan la materia”.³¹

Para algunos observadores, este nuevo modo de considerar el comportamiento humano era decididamente raro. En un número de 1850 de *Household Words*, revista semanal dirigida por Charles Dickens, el humor de Frederick Hunt no oculta cierto grado de escepticismo:

los eruditos dejan atrás a los antiguos astrólogos y a las modernas gitanas y adivinas cuando revelan las hasta ahora leyes ocultas que gobiernan ese cautivador misterio de los misterios, esa meta de las jóvenes doncellas y los jubilosos mancebos: el matrimonio.³²

Ralph Waldo Emerson también observaba con recelo la presunta precisión de las leyes estadísticas. En su ensayo de 1860, “Destino”, explicaba la reivindicación central de “la nueva ciencia estadística”: “que cuando la base de población es lo bastante amplia, los acontecimientos más casuales y extravagantes son fruto de un cálculo fijado de antemano”. Y proseguía burlándose de lo que, a su parecer, le resultaba una idea muy rígida:

En una gran ciudad, las cosas más casuales y las cosas cuya belleza reside en su casualidad se producen tan puntualmente y de acuerdo a un orden como la madalena del panadero está lista para el desayuno. *Punch* cuenta exactamente un buen chiste a la semana y los diarios se esfuerzan por publicar una buena noticia todos los días.³³

Entretanto, Mark Twain (en un comentario que él mismo atribuyó a Benjamin Disraeli) dejó marcada a la estadística de por vida cuando dijo: “Hay tres tipos de mentiras: las mentiras, las malditas mentiras y las estadísticas”.³⁴ Por su parte, Friedrich Nietzsche, que creía firmemente que la historia es forjada por un puñado de “grandes hombres”, fue particularmente mordaz: “si la historia tiene leyes, ni esas leyes valen nada ni la historia vale nada”.³⁵

DE LAS PERSONAS A LOS ÁTOMOS

Otros encontraron inspiración en estas manifestaciones de regularidad dentro de un azar aparente. Ante la fiabilidad de las leyes estadísticas de la sociedad, muchos científicos sentían el impulso de emplearlas como analogías para los procesos aleatorios del mundo natural. Entre esos científicos se encontraba James Clerk Maxwell.

Pocos meses después de la publicación de la gran obra de Buckle, Maxwell escribió en los siguientes términos a su amigo Lewis Campbell:

Esta noche he leído ciento sesenta páginas de *History of Civilization* de Buckle, un libro engreído, de fuerte positivismo, emancipación de los conceptos trillados y ese tipo de cosas, pero también portador de una gran cantidad de información verdaderamente

original, resultado del estudio fértil y no de meras elucubraciones mentales.³⁶

Cuando se planteó hasta qué punto era imposible observar los choques constantes de las partículas constituyentes de los gases, Maxwell admitió que se trataba de un problema similar al que Buckle se había encontrado al considerar la sociedad, donde las causas de la conducta individual son inescrutables:

la porción más pequeña de materia a la que podemos someter a un experimento consiste en millones de moléculas, de las que ni una sola se manifiesta jamás individualmente ante nosotros. No podemos, por tanto, saber con certeza los movimientos de ninguna de esas moléculas; así que estamos obligados a abandonar el estricto método histórico [newtoniano] y a adoptar el método estadístico de tratar con grandes grupos de moléculas [...] Al estudiar las relaciones entre cantidades de moléculas de esta clase, nos encontramos con un nuevo tipo de regularidad, la regularidad de los promedios, de la que sin mayores problemas podemos depender a efectos prácticos.³⁷

Como el mismo Maxwell manifestó en 1873, gracias a las experiencias de la estadística social adquirió confianza suficiente para saber que, desde esta perspectiva estadística, podía extraerse el orden del caos microscópico:

la uniformidad que observamos en nuestros experimentos con cantidades de materia que contienen millones de millones de moléculas, es como la que explicó Laplace y como la que llamó la atención de Buckle, porque surgía de un crisol de causas en modo alguno uniformes.³⁸

¿Se habría atrevido Maxwell a abandonar el “método histórico estricto”, la obligación de explicarlo todo en términos de mecánica newtoniana de partículas individuales, si los estudios de la sociedad no hubieran revelado leyes que son válidas incluso en sistemas complejos donde las causas directas del comportamiento son tan oscuras? ¿De qué otro modo

podría haber fe suficiente para buscar leyes viendo lo tristemente incompletos que eran los conocimientos de la ciencia sobre el movimiento de los objetos?

Maxwell empezó a trabajar en la teoría cinética de los gases poco después de leer a Buckle. Pero en su obra temprana también recurrió a los estudios, más analíticos, de Quetelet, cuya pródiga aplicación de la curva de error le llamó la atención a través de la descripción que John Herschel hizo de la obra del científico belga en 1850. En ella, Herschel había aludido a las relaciones existentes entre la física social y la primera teoría cinética de los gases.

Maxwell sabía que, en 1857, Rudolf Clausius había recurrido a las leyes de la probabilidad para reducir el papel de los choques moleculares en la presión ejercida por un gas contra las paredes del recipiente que lo confina. Pero Clausius sólo se había interesado en la velocidad promedio de las partículas. Maxwell quería saber la distribución de esas velocidades en torno a ese promedio. Si la curva de error servía tan bien para describir las desviaciones del promedio en la física social, ¿por qué, entonces, no iba a servir también en sus estudios?. En 1859 llegó a la conclusión de que la curva de error de Quetelet podía describir los movimientos de las partículas de los gases y demostró lo que esto suponía para las propiedades mensurables de un gas.

Como vimos en el capítulo anterior, la distribución de velocidades de las partículas de un gas de Maxwell no era más que una suposición hasta que, en 1872, Ludwig Boltzmann demostró que cualquier grupo de partículas en movimiento de un gas *debe* converger hacia esa distribución. También Boltzmann conocía la obra de Buckle y no tardó en establecer analogías entre sus partículas y los individuos de los censos sociales que poblaban las estadísticas de Buckle:

Las moléculas son parecidas a muchos individuos, pasan por los más diversos estados de movimiento, y las propiedades de los gases sólo permanecen inalteradas porque el número de esas moléculas, que, de promedio, tienen un estado de movimiento dado, es constante.³⁹

Boltzmann asemejó las leyes de los gases, una afirmación de la invariancia de los promedios estadísticos, con los beneficios uniformes de las com-

pañías de seguros. En 1886, Peter Guthrie Tait, un amigo de Maxwell, comparó el enfoque estadístico de la teoría cinética con

la extraordinaria regularidad con la que el número de fenómenos tan impredecibles aunque no tan extraordinarios como los suicidios, los nacimientos de gemelos y de trillizos, las cartas muertas,* etcétera, se mantiene año tras año en todo país populoso.⁴⁰

Hoy en día, los físicos consideran que la aplicación de la mecánica estadística a los fenómenos sociales es una aventura nueva y arriesgada. Al parecer, pocos recuerdan que, en origen, el proceso se originó al revés, en los días en que la ciencia física y las ciencias sociales eran los vástagos gemelos de la filosofía mecanicista y cuando nadie se sonrojaba por invocar las costumbres de las personas para explicar las costumbres de las partículas inanimadas.

Las limitaciones, por no decir los peligros, de reducir los asuntos humanos a leyes estadísticas se veían, sin embargo, ampliamente ilustrados en otras esferas. Cuando Charles Darwin convirtió, al menos en apariencia, a los humanos en simios evolucionados, primero en *El origen de las especies* (1859) y luego, más explícitamente, en *El origen del hombre* (1871), apeló al azar y a la suerte como motores de la diversidad de la naturaleza. Muchos advirtieron de inmediato la analogía con la teoría cinética de los gases. En 1877, Charles Peirce escribió:

El señor Darwin se ha propuesto aplicar el método estadístico a la biología. Lo mismo se ha hecho en una rama totalmente distinta de la ciencia, la teoría de los gases. Aunque no pueden predecir el movimiento de una partícula de gas, Clausius y Maxwell han sido capaces [...] mediante la aplicación de la doctrina de las probabilidades [...] de deducir ciertas propiedades de los gases, especialmente en lo que se refiere a sus relaciones de calor. De forma parecida, aunque no pueda decir en qué consistirá la variación ni cuál será la selección natural en cada caso individual, Darwin ha demostrado que, a largo plazo, esas operaciones [la variación y la

* Esto es, las que se quedan en Correos porque llevan mal la dirección. Laplace comentó que su número constituía una fracción constante del total de la facturación postal.

selección natural] adaptarán, o adaptarían, a los animales a sus circunstancias.⁴¹

Francis Galton, el primo de Darwin, advirtió que, puesto que la selección natural era una teoría básicamente estadística, la variación natural en el seno de una especie podría atemperarse en virtud de la ley del error de Quetelet. Las investigaciones que Galton llevó a cabo sobre las distribuciones estadísticas de los rasgos y el comportamiento humanos le llevaron a concluir que existía un “mejor” y existía un “peor”, que una distribución así suponía que los hombres no son “de igual valor, como unidades sociales, igualmente capaces para votar, etcétera”.⁴² De ahí a la idea de la reproducción selectiva para mejorar la distribución no quedaba más que un pequeño paso, como sostuvo en *Hereditary Genius [Genio hereditario]* (1869). Su insistencia en la necesidad de que los estudios sobre la herencia recurrieran a la estadística le condujo a formular la base matemática central de la biometría, la medición de la variación biológica. Pero Galton es conocido también por ser el padre de la eugenesia, una de las apuestas más entusiastas de la izquierda socialista hasta que los fascistas la introdujeron en su doctrina, lo cual alertó al mundo de sus verdaderas consecuencias.

Herbert Spencer, cuya célebre expresión “la supervivencia de los más dotados” creó gran confusión en torno a la teoría de Darwin, consideró que los hallazgos de Quetelet justificaban un enfoque evolutivo de la sociología. También tomó del concepto de Quetelet de *homme moyen* la discutible idea de que la selección natural descartaba las desviaciones defectuosas y daba como resultado la supervivencia de un “especimen perfecto”. En general, el aspecto estadístico del darwinismo motivó que, a finales del siglo XIX, muchos lo considerasen una teoría tan “mecanicista” como la de Maxwell, basada en “fuerzas” definitivas pero desconocidas. Ésa es la opinión que, por ejemplo, Boltzmann tenía de él.

VOLUNTAD Y DESTINO

Hasta la década de 1850, los “estadísticos” eran en general personas que recogían datos referentes a hábitos y tendencias sociales y se los tenía por el brazo empírico de la economía política. Después, la estadística

pasó a ser menos una forma de ciencia social y más un *método*, un medio de manejar la cuantificación en todas las disciplinas científicas. Condorcet y Laplace se contaban entre quienes previeron el amplio papel de la matemática de la probabilidad, pero, como el economista Antoine Augustin Cournot admitió en su obra sobre la teoría de las probabilidades en 1843, muchos (él no) tenían ideas más limitadas: “La estadística [...] se entiende principalmente como la recopilación de hechos que produce la suma de hombres en la sociedad política”.⁴³

Fue el inglés J. J. Fox quien, en un documento que expuso ante la Sociedad Estadística de Londres en 1860, enunció con claridad por vez primera la idea de que la estadística no era una disciplina científica sino una técnica. La estadística, aseguró,

no cuenta con hechos por sí misma, es ciencia en tanto y en cuanto pertenece al dominio de las matemáticas. Su gran e inestimable valor consiste en que es un “método” que pueden aprovechar las demás ciencias. Es un “método de investigación” fundado en las leyes de la ciencia abstracta, fundado en la teoría matemática de las probabilidades, fundado en lo que tan felizmente se ha denominado “lógica de los grandes números”.⁴⁴

Puede que esto induzca a pensar que la estadística es una cosa modesta, un instrumento, como la geometría de Euclides o el cálculo de Newton y Leibniz. ¿No están los instrumentos, las herramientas, simplemente para disponer de ellos y usarlos? Que la verdad sea tan distinta nos recuerda no sólo con cuánta profundidad examinaron los científicos del siglo XIX la base filosófica de su obra, sino también cuánto les influyeron las ideas religiosas. Lo que el pensamiento estadístico sostenía al otro lado del espejo era, nada más ni nada menos, que el concepto de libre albedrío de los hombres.

Desde un principio, los enfoques estadísticos de la ciencia social fueron controvertidos. Cuando más probable parecía que las estadísticas revelasen las presuntas leyes naturales de la sociedad, resultó insoslayable ignorar la cuestión de qué implicaba eso para el comportamiento humano individual. Esta bien puede ser la pregunta en las mentes de quienes se encuentran con la nueva “física de la sociedad” por primera vez. El rabioso (realmente *rabioso*) debate que se produjo en el siglo XIX bien nos puede informar de los argumentos.

En primer lugar está la cuestión de las causas y los efectos; las conclusiones que podríamos extraer al derivar las causas de sus efectos. Muchos estadísticos creían, y no les faltaba razón, que tenía poco sentido recopilar datos para que luego nadie los interpretase. Pero las interpretaciones no tardaron en tener una carga política. Una de las principales preocupaciones de los estadísticos de principios del siglo XIX (algo que todavía preocupa a los sociólogos de hoy) era el crimen. ¿Era posible que la ciencia estadística lograra revelar la forma de acabar con él y, por tanto, de conseguir el gran objetivo de la época, la mejora de la sociedad? Para ello era necesario deducir las causas del crimen.

En la actualidad, la advertencia de que una correlación entre cifras no revela necesariamente ninguna causa y efecto –“correlativo no equivale a motivo”– casi constituye un mantra entre los estadísticos (por mucho que no siempre se le preste atención). Esto es lo mismo que decir que del hecho de que dos series de estadísticas arrojen la misma tendencia, no se deduce necesariamente que una sea la causa de la otra. Sin embargo, en los días incipientes de la estadística, muchos no tuvieron reparos en desprender conclusiones causa-efecto que confirmaban sus prejuicios. Cuando, en 1828, el francés A. Taillandier supo que el sesenta y siete por ciento de la población carcelaria era analfabeta, extrajo una conclusión para él evidente: “¿Qué prueba más definitiva de que la ignorancia, como la pereza, es la madre de todos los vicios?”⁴⁵ (Taillandier ni siquiera se preocupó de cotejar, y cabe pensar que ni siquiera lo conocía, el porcentaje de analfabetismo de la población en su conjunto.)

Frente a esos abusos, la junta directiva de la Sociedad Estadística de Londres, entre cuyos cofundadores se encontraban, en 1834, personajes eminentes como Malthus, Charles Babbage y William Whewell, intentó que quienes *practicaban* la estadística se mantuvieran dentro de ciertos límites y anunció:

La ciencia estadística difiere de la economía política porque, aunque su objetivo es el mismo, no habla de causas ni de razones a partir de probables efectos; se limita a recopilar, ordenar y comparar.⁴⁶

William Farr, de la Oficina del Registro General británica, se hizo eco de la petición de la Sociedad Estadística y solicitó que los agentes “exclu-

yeran todas las opiniones". En 1861 le dijo a Florence Nightingale: "El estadístico no tiene nada que ver con la causa [...] La estadística debería ser la más árida de todas las lecturas";⁴⁷ algo que, sin embargo, sólo se cumplía pocas veces. Como Alphonse de Candolle señaló en 1830, en manos de los políticos la estadística podía convertirse "en un inagotable arsenal de armas de doble filo".⁴⁸

En segundo lugar, está la cuestión de lo que las estadísticas tienen que decir sobre el futuro: las conclusiones que se pueden extraer mirando *hacia delante*.

Mientras las estadísticas sociales se quedan en las tablas —como mero registro de acontecimientos— no suscitan controversia. Pero esas estadísticas cobran un significado enteramente nuevo cuando nos damos cuenta de que, en potencia, pueden valer para hacer predicciones. Si, por ejemplo, seis de cada cien ingleses vivos a comienzos de 1790 habían muerto a final de año, y si lo mismo ocurrió en 1791 y 1792, ¿no sería lógico suponer, a principios de 1793, que el seis por ciento de la población inglesa en ese momento habría muerto a finales de año? Suena muy razonable y, sin embargo, la extrapolación suscitó enconadas disputas.

Una cosa es saber qué *ha ocurrido* y otra muy distinta asegurar que se sabe qué *ocurrirá*. Por supuesto, los índices de mortalidad no son totalmente constantes, es posible que en 1791 muriesen cinco de cada cien personas y en 1792 siete de cada cien. De igual manera, sería lógico suponer que, en 1793, el índice de mortalidad estaría en torno al seis por ciento. Pero esta sugerencia habría suscitado una rabiosa oposición en 1793. ¿Cómo puede nadie vaticinar el próximo índice de natalidad? ¿Y si una enfermedad infecciosa y fatal assolaba Europa ese año? ¿Y si estallaba otra guerra? ¿Y si ese año era extraordinario en el terreno de la salud y sólo moría el uno por ciento de la población? Ciertamente, nadie podía saber si estas cosas ocurrirían o no.

Es preciso entonces establecer una distinción entre *estadística*, es decir, cifras que reflejan hechos, y *probabilidad*. La primera se ocupa de certezas —en tanto se empleen buenos métodos de recopilación de datos—, la segunda de lo desconocido. Para algunos científicos y filósofos eran como la velocidad y el tocino y no había que mezclarlas. Hacerlo no sólo era matemática o lógicamente incorrecto, era herético, promovía el fatalismo y socavaba el concepto de libre albedrío.

En 1784, Kant ya había reconocido que las constantes evidentes en las tablas de nacimientos y fallecimientos de Johann Peter Süßmilch parecían poner frente a la fe en el libre albedrío una especie de determinismo:

Sea cual fuere la idea que uno quiera defender, desde un punto de vista metafísico, en lo relativo al libre albedrío, desde luego sus apariencias, que son acciones humanas, al igual que cualquier otro suceso natural, están determinadas por leyes universales.⁴⁹

Pero no resultaba difícil explicar las regularidades estadísticas en términos teológicos: eran una evidencia de la sabiduría divina. Haciendo, por ejemplo, que nacieran más o menos el mismo número de niñas que de niños, Dios garantizaba que, en un principio, todas las personas tuvieran posibilidad de matrimonio, lo cual, por lo demás, garantizaba la estabilidad de la sociedad.

Sin embargo, había datos estadísticos más difíciles de asimilar. Porque, ¿qué clase de Dios era ése que permitía que el número de suicidios y de asesinatos y de crímenes de todo tipo permaneciera constante año tras año? Además, ese número era lo suficientemente alto para que también el no creyente estuviera preocupado. Un biólogo ateo no tenía por qué buscar las razones de que el número de nacimientos fuera casi parejo para ambos sexos, pero el suicidio y el crimen eran actos volitivos y, evidentemente, no explicables en términos de *mecanicismo* natural.

Para Adolphe Quetelet, las regularidades estadísticas de actos voluntarios como el crimen situaban estos actos fuera de la responsabilidad del individuo. Quetelet fue quien primero sugirió que la causa del crimen no está en la maldad, sino en la sociedad. No debería atribuirse, dijo, "a la maldad de los individuos, sino a las costumbres de ese ser concreto que llamamos gente y al que consideramos dotado de voluntad y costumbres propias, de las que es difícil apartarlo".⁵⁰ En otras palabras, "la sociedad me obligó a hacerlo, señoría", o, en palabras del propio Quetelet: el delito "es un peaje que pagamos con regularidad".⁵¹ En una época mecanicista esto no suponía tanto que las condiciones de la sociedad tendieran a crear una proporción constante de criminales sino más bien que existía una *fuerza* que impelía a las personas a violar la ley hasta que la cuota se hubiera completado. En el marco de esta filosofía el mundo es totalmente determinista y no hay espacio para el libre albedrío.

¿No era esto una conveniente excusa para los delincuentes? Alguien despachó este argumento rápidamente con un razonamiento satírico: por la misma razón, una fuerza determinista impelía a los jueces a sentenciar a los criminales a fin de cumplir con la cuota anual de presos carcelarios. Pero en la segunda mitad del siglo XIX el fatalismo que parecía inferirse de las estadísticas de Quetelet y Buckle inquietó a muchos. En *Cornhill Magazine*, William Cyples lamentó que la humanidad estuviera amenazada con “un destino expresado en fracciones decimales, que nos caen encima no personalmente, sino en promedios”.⁵² En 1860, el príncipe Alberto contó en el Congreso Estadístico Internacional de Londres que algunas estadísticas conducen

necesariamente al panteísmo y a la destrucción de la religión verdadera, porque privan, de acuerdo a la estimación del hombre, al Todopoderoso de su poder de libre determinación y convierten su Verbo en una mera máquina.⁵³

El alter ego de Fiodor Dostoyevski en *Memorias del subsuelo* protesta furiosamente contra el determinismo que las estadísticas amenazaban:

Ahora bien, supongamos que un día descubrieran de verdad una fórmula que constituyera la raíz de todos nuestros deseos y caprichos, y que nos dijera de qué dependen éstos, a qué leyes están sometidos, cómo se desarrollan, hacia qué apuntan en tal y cual caso, etcétera; es decir, supongamos que encontrasen una verdadera ecuación matemática. Bueno, lo más probable es que entonces el hombre deje de tener deseos.⁵⁴

Si eso fuera posible, como insistió Buckle, lo cierto es que el futuro sería desolador.

Todos los actos humanos serán incorporados, por medio de una lista, a algo así como tablas de logaritmos, digamos hasta el número 108.000, y trasladados a un almanaque. [...] de forma que en el acto desaparecen todos los problemas posibles, porque todos reciben las soluciones posibles. [...] [El hombre] se convertiría en un pedal de órgano o algo por el estilo.⁵⁵

Para evitar un destino tan racionalista y matemático, dice el recluso escriba de Dostoyevski, los hombres siempre se esforzarían por ejercer su voluntad, incluso hasta el extremo de actuar irracionalmente o ajenos a toda cordura:

Pero es posible que uno haga cualquier cosa por puro tedio. [...] un hombre, siempre y en todas partes, prefiere actuar como se le antoja, y no como le dicen la razón y sus intereses.⁵⁶

A su modo, es decir, con más mesura, León Tolstoi combatió en *Guerra y paz* las cuestiones que planteaba la visión determinista de la historia de Buckle, con lo que llamó la relación de la libre voluntad con la necesidad. Tolstoi sospechaba que la “nueva concepción de la historia” podría responder a la pregunta fundamental de las relaciones internacionales: “¿Qué fuerza mueve a las naciones?”.⁵⁷ Pero incluso admitiendo que la existencia de esas fuerzas parecía poner en tela de juicio la idea de que podemos elegir nuestro destino:

Una partícula de materia no puede decirnos que sea ajena a las leyes de atracción y repulsión y que la ley no se cumpla; pero el hombre, que es el sujeto de la historia, dice, rotundamente: soy libre y, por tanto, no estoy sujeto a leyes.⁵⁸

Este reto, concluyó Tolstoi, depende de que exista un residuo de ignorancia sobre las causas de los acontecimientos: “El libre albedrío es para la historia sólo una expresión que connota lo que no sabemos sobre las leyes de la vida humana”.⁵⁹

El escritor y crítico Maurice Evan Hare lo dijo con más humor:

Érase una vez un hombre que dijo: “¡Maldita sea!”
Me he dado cuenta de que soy
Una maquina que se mueve
Por surcos predeterminados
No soy ni un autobús, soy un tranvía.⁶⁰

Los partidarios del libre albedrío sostienen (con razón) que puesto que las leyes estadísticas no son leyes verdaderas en el sentido de que

no describen la causa y el efecto –como, por ejemplo, la ley de gravedad de Newton–, no pueden aplicarse a los individuos y, por tanto, nada nos dicen del posible comportamiento de una persona. A la inversa, la fe decimonónica en la *naturalidad* de la irracionalidad permitió que otros considerasen las regularidades estadísticas como una *demonstración* de la existencia del libre albedrío, porque, ¿no había sostenido el propio Kant que el libre albedrío tiende a orientar a los hombres a una conducta ordenada? Desde este punto de vista, el libre albedrío podía equipararse no con el mero capricho, sino con su opuesto.

Desde una perspectiva moderna podemos aducir otras consideraciones. Intuitivamente, identificar el azar con un máximo de impredecibilidad parece lo correcto, pero esto no es necesariamente así (como veremos en el capítulo X en particular). Considerándolo desde cierta distancia, el azar se convierte en uniformidad: las partículas de un gas se mueven caprichosamente pero presionan por igual en todas direcciones, de modo que un globo se hincha en forma de esfera. Sin embargo, los fenómenos que más complejos nos parecen no son aleatorios. La aleatoria distribución de puntitos blancos de una televisión sin sintonizar ofrece una imagen caótica que, en último extremo, parece monótona e inmutable, mientras que en una película nunca podemos estar seguros de qué va a ocurrir a continuación (aunque es posible que éste sea un comentario bastante generoso).

Y existen, como veremos, muchos ejemplos de comportamiento aleatorio donde una especie de regularidad y orden provienen no de ninguna predeterminación de los destinos de los participantes sino de la propia limitación de la gama de sus elecciones viables. Cuando andamos por un pasillo, en principio, entre nuestras opciones está la de caminar en zigzag o progresar en epiciclos ptolemaicos, pero nadie que tenga sus facultades intactas optará por ellas en perjuicio de una trayectoria más directa.

Además, muchos de los fenómenos que encontraremos en este libro suponen, no un comportamiento estable, sino cambios bruscos entre ciertas formas de comportamientos alternativas. En los siglos XVIII y XIX muchos creían con firmeza en el equilibrio de la sociedad, en que mantenía un estado constante y estable. Con frecuencia, lo que más nos preocupará en este libro será la toma de decisiones y los cambios súbitos que puede provocar.

UN DEMONIO OBSTINADO

Si las estadísticas de la sociedad ponían en tela de juicio el libre albedrío a nivel individual, la Segunda Ley de la Termodinámica, tal y como fue formulada por Clausius, daba pie a una especie de determinismo que era igualmente preocupante. Como William Thomson y Hermann von Helmholtz sostuvieron en la década de 1850, la inexorable senda de la entropía –el continuo paso del calor al frío– suponía una “muerte de calor” cósmica en la que el conjunto de la creación se reducía a un vago zumbido de calor débil e inútil incapaz de dar pie a la organización que la vida necesita. No con un *bang*, sino con un gimoteo. Y la Segunda Ley de la Termodinámica insiste en que, antes de este triste final, todo cambio privilegia una dirección en la que la crece la entropía. ¿No sugiere esto que, igual que una pelota que soltásemos en la cima de una colina tiene que rodar cuesta abajo, los humanos, compuestos de tantos átomos danzantes, tienen que comportarse de una forma determinada? El libre albedrío supone que podemos hacer una cosa u otra; la Segunda Ley parece afirmar que, cuando haya posibilidad de cambio, éste ha de ocurrir en un cierto sentido.

Maxwell fue tan determinista como Laplace cuando recurrió a las leyes del movimiento de Newton, pero, a diferencia de Laplace, tenía una fuerte necesidad de la hipótesis de Dios. Era un cristiano devoto y no podía aceptar un universo en el que Dios priva de libre albedrío al hombre. Y sin embargo, ¿cómo podía operar el libre albedrío sin contravenir la termodinámica? Alfred Tennyson quiso escapar del fatalismo de los átomos con la licencia poética que un científico no puede permitirse. Maxwell recogió la descripción que hizo Tennyson de un sueño en el que el poeta

Vio las corrientes de átomos llameantes
Y los rápidos torrentes de sus miríadas de universos
Corriendo por el ilimitable vacío,
Volar para volver a chocar otra vez y construir
Otro y otro y otro conjunto de cosas,
Por siempre.⁶¹

Maxwell advirtió que Tennyson “intentó romper los lazos del Destino haciendo que sus átomos se desviarán de su curso en momentos y luga-

res inopinados atribuyéndoles, por tanto, una especie de libre voluntad irracional".⁶²

Su propia respuesta fue más compleja. Se dio cuenta de que la Segunda Ley de la Termodinámica es una ley estadística, una "ley de grandes números". En 1867 vio la forma de, en sus propias palabras, "encontrar una falla" en el mandato cósmico. La inevitabilidad estadística, dijo, es resultado de nuestra ignorancia: no sabemos y no podemos saber los movimientos de todos los átomos, ni siquiera de una pequeña porción de materia. Pero eso no quiere decir que esos movimientos no puedan saberse *por principio*. Supongamos, dijo Maxwell, que existiera "un observador capaz y objetivo",⁶³ un observador de una escala tal que le permitiera observar el vuelo de los átomos, el vuelo de cada átomo. Un ser así subvertiría selectivamente la Segunda Ley de la Termodinámica cogiendo, para aplicarles un tratamiento especial, algunos átomos que se movieran en cierta dirección: ejerciendo su libre albedrío en conjunción con su conocimiento sobrehumano.

Digamos, por ejemplo, que ese ser tan poderoso abre una trampa en la pared que divide en dos la bodega de un barco cargado de gas. Abriendo la trampa sólo a las partículas de gas que se mueven en una dirección, podría conseguir que el número de partículas, y por tanto la presión, de uno de los compartimentos se incrementase a expensas del número de partículas del otro. Esto contravendría la Segunda Ley, pues produciría una configuración de partículas *menos* probable que la configuración inicial. Si nosotros los humanos hiciéramos un agujero en la pared divisoria, lo único que conseguiríamos es igualar las presiones, que es, con mucho, el resultado más *probable* de tal acción.

William Thomson llamó al ser de Maxwell "demonio" –para disgusto del propio Maxwell, devoto creyente–. A pesar del éxito aparente de este argumento, Maxwell temía que su demonio no se bastase por sí mismo para rescatar al libre albedrío, y a lo largo de la década de 1870 continuó buscando otras fallas de la ley física que permitieran al libre albedrío operar sin violar el principio de conservación de la energía (la Primera Ley de la Termodinámica). Pero la búsqueda estaba condenada. Décadas después de que, en torno a 1940, se estudiaran los paralelismos entre la termodinámica y la teoría de la información del ingeniero de telecomunicaciones Claude Shannon, los científicos descubrieron la falla en el propio argumento de Maxwell: éste no había

tenido en cuenta la termodinámica del procesamiento de la información que su demonio debía llevar a cabo. Es decir, el demonio no puede elegir si abre o no abre la trampa sin generar al menos tanta entropía como la que *ahorra* al dejar que una partícula pase de un compartimento a otro. Así pues, ni siquiera el demonio de Maxwell es inmune a la Segunda Ley de la Termodinámica.

A menudo se dice que, al introducir la probabilidad en el mismo corazón de la materia, la mecánica cuántica destruyó el universo determinista de la mecánica newtoniana. Pero sin duda, existe una enorme diferencia entre la incertidumbre sobre el movimiento de los objetos en la práctica, como Maxwell y Boltzmann aceptaron al desarrollar la mecánica estadística, y la incertidumbre de tales movimientos por principio, circunstancia que en 1927 recogieron la mecánica ondulatoria de Erwin Schrödinger y, más en particular, el Principio de Incertidumbre de Werner Heisenberg. La mecánica cuántica afirma que hay cosas que no sólo no sabemos, sino que no podemos saber.

Sin embargo, es muy probable que la introducción de la estadística en la ciencia física "clásica", a finales del siglo XIX, allanase el camino hacia la física probabilística de la mecánica cuántica. En 1918, el físico polaco Marian Smoluchowski afirmó que las probabilidades eran fundamentales para la física moderna:

A partir de esta tendencia, sólo las ecuaciones de Lorentz, la teoría de los electrones, la ley de la energía y el principio de relatividad no se ven afectados, pero es muy posible que, con el paso del tiempo, sus leyes exactas se vean sustituidas por regularidades estadísticas.⁶⁴

El camino hacia la ciencia estadística habría sido más tortuoso si, tras la experiencia del siglo XIX con la estadística social, los científicos no hubieran adquirido confianza suficiente para creer que el orden y la regularidad a gran escala de la naturaleza pueden surgir incluso cuando no sabemos, o ni siquiera podemos proponer, una causa determinante de cada acontecimiento. En tales situaciones debemos confiar en que hay leyes que gobiernan los grandes números.

IV
EL GRAN KABOOM
DE POR QUÉ HAY COSAS QUE OCURREN
AL MISMO TIEMPO

La naturaleza tiene una forma propia de hacer las cosas de la mejor manera posible y hay sitios en que nos lo dice bien a las claras, basta que tengamos los ojos y los oídos bien abiertos.

RALPH WALDO EMERSON (1860)¹

En el método de investigación estadístico no seguimos el sistema durante su movimiento, sino que fijamos nuestra atención en una fase en particular y confirmamos si el sistema está en esa fase o no y también cuándo entra en esa fase y cuándo la abandona.

JAMES CLERK MAXWELL (1878)²

Las Atracciones de Gravedad, Magnetismo y Electricidad alcanzan distancias muy sensibles y han sido observadas por Ojos vulgares, pero hay otras que alcanzan distancias tan pequeñas que escapan a la Observación; además, es posible que la Atracción eléctrica pueda llegar a esas distancias tan pequeñas.

ISAAC NEWTON (1704)³

Hacia el final de la novela *Cuna de gato*, de Kurt Vonnegut, ocurre algo que, no por inevitable desde el principio, resulta menos escalofriante:

Se oyó un ruido como el del suave cerrarse de unas puertas grandes como el cielo, las enormes puertas de cielo cerrándose muy despacio. Se oyó un gran KABOOM.⁴

Era el sonido del mar congelándose, convirtiéndose no en hielo ordinario, del que cabe esperar que se deslice lentamente desde los polos si la temperatura de la Tierra descendiese por debajo del punto de congelación. El mar de la novela de Vonnegut se congela en hielo 9, una forma hipotética de hielo que es estable hasta los 100°C. Cuando un bloque de hielo 9 cae al mar, solidifica instantáneamente el agua de los océanos.

Ésa es la naturaleza de la congelación: es repentina, brusca. Una sustancia es líquida y móvil (por encima de su punto de fusión) o bien es sólida y rígida (por debajo de esa temperatura). No hay término medio, el agua no se vuelve viscosa antes de congelarse. Siempre hay un gran kaboom. Y lo mismo puede decirse cuando el agua hierve: o bien burbujea en la cacerola o escapa en volutas de vapor.* Siempre hay una superficie en la que el agua líquida se transforma en vapor.

A esas transformaciones entre sólido, líquido y gas se les llama *transiciones de fase*, y proporcionan el eslabón perdido entre la teoría cinética de los gases y una comprensión a escala molecular de las demás formas de materia. Todas las partículas de agua, hielo y vapor son idénticas, son moléculas de agua, el trío atómico de H₂O,** pero organizadas de forma distinta: en el gas están alborotadas, se mueven frenéticamente; en el sólido están inmóviles y regimentadas; en el líquido, empujándose unas a otras como una densa y anárquica muchedumbre.

Maxwell y Boltzmann descubrieron los apuntalamientos microscópicos del comportamiento de los gases. Pero, ¿qué podría decir la mecánica estadística de los líquidos y de los sólidos? No había forma de explicar el gran kaboom a partir de la teoría de los gases de Maxwell y Boltzmann. Era evidente para todos los científicos del siglo XIX que la forma de pasar un gas a estado líquido era enfriarlo. Y si se enfriaba todavía más, se conseguía un sólido. Pero, según la teoría cinética de los gases, si se baja la temperatura, todo lo que se consigue es que las moléculas se muevan, de promedio, más lentamente. La curva en forma de campana se hace más pronunciada y su pico cambia a velocidades más bajas. Sólo enfriando el gas a la temperatura más baja posible —el cero abso-

* La nubecita que se ve sobre el agua hirviendo, sin embargo, es líquida: diminutas gotas de agua que se han condensado a partir del vapor cuando éste asciende hacia aire más frío. El vapor de agua es tan invisible como el aire.

** Estrictamente hablando, esto no es cierto, puesto que unas pocas moléculas se separan en fragmentos cargados llamados iones.

luto, o -273°C— se obtienen partículas que carecen de energía y no se mueven. Pero la teoría no prescribe cómo es que pueden alinearse regularmente en sólidos cristalinos como el hielo. Y en todo caso, los sólidos reales aparecen antes de que se alcance el cero absoluto. ¿Y qué hay del estado líquido que precede al estado sólido?

En este capítulo hablaremos de las transiciones de fase, que es uno de los conceptos centrales que subyace a la física de la sociedad. Otros han invocado las transiciones de fase, con frecuencia de forma inconsciente o metafórica, para explicar los cambios súbitos que tienen lugar en algunos contextos sociales; por ejemplo, René Thom en su teoría de las catástrofes y Malcolm Gladwell con su idea de “punto clave” en modas, normas y tendencias (véase p. 268).⁵ El arquitecto posmoderno Charles Jencks habla de “la creatividad y la sorpresa de un universo que evoluciona en cambios de fase: saltos súbitos de la organización”, para justificar una arquitectura basada en la sorpresa, la “simetría rota” y una inestabilidad aparente.⁶ Los cambios del paradigma de Thomas Kuhn en la evolución del pensamiento científico⁷ también se han relacionado vagamente con las transiciones de fase. Pero hemos de ver que esas transiciones no son una alegoría adecuada para los cambios bruscos de pensamiento o conducta. En realidad parecen ocurrir en la sociedad, y la teoría típica desarrollada para comprenderlas se puede, hasta cierto punto, transferir directamente a las descripciones de la conducta social.

Con respecto al papel que las transiciones de fase desempeñan en la física estadística, ya es importante darse cuenta de que existen, que son bruscas y que relacionan estados de materia en los que las partículas están dispuestas de distinto modo. Pero la nueva física de la sociedad tiene un aspecto crucial, y para comprenderlo es necesario que sepamos el *por qué* y el *cómo* de las transiciones de fase. Ese aspecto tiene que ver con la curiosa brusquedad de los cambios. Porque cuando cada partícula discurre alegremente por su propio camino, ¿qué ocurre para que, de pronto, todas conspiran para crear el gran kaboom?

PROBLEMAS DE CONTINUIDAD

A primera vista, es precisamente por esta brusquedad por lo que podría parecer que la falta de una explicación de las transiciones de



fase en la teoría cinética de los gases carece de importancia. Porque, ¿no implica que algo especial está sucediendo en ese punto donde el vapor se condensa en agua, algo que no ocurre cuando el vapor se contenta con ser vapor? El hecho de que la teoría de los gases no explique la transición de fase indica que tiene alguna falla, pero en lo referido al comportamiento de las partículas por encima del punto de ebullición del agua, ¿no es cierto que funcionaba? Los físicos del siglo XIX sabían que, tristemente, no funcionaba en absoluto. Sabían que era imposible que un gas pasase a un estado líquido *sin* atravesar una fase de transición. En la jerga de la época, sabían que entre los dos estados había cierta *continuidad*.

Un aristócrata francés llamado Charles, barón Cagniard de la Tour, fue el primero en demostrar que esto era así. En 1822, observó que si se calientan en un tubo sellado el éter, el alcohol o el agua pueden, en apariencia, pasar por un estado intermedio entre líquido y gaseoso sin las transiciones de evaporación o condensación. En 1830, John Herschel concluyó:

Hay pocas dudas de que los estados sólido, líquido y aeriforme de los cuerpos sean algo más que etapas de un progreso gradual de transición de un extremo a otro y que, por marcadas que sean las distinciones entre ellos, acabarán por distinguirse no mediante líneas de demarcación súbitas o violentas, sino pasando de uno a otro mediante gradaciones insensibles.⁸

A partir de sus meticulosos estudios del “estado Cagniard de la Tour” en la década de 1860, Thomas Andrews, químico del Queen’s College de Belfast, llegó a la conclusión de que, en realidad,

los estados líquido y gaseoso ordinarios eran, en pocas palabras, sólo formas muy separadas de la misma condición de la materia a la que se puede hacer pasar de un estado a otro mediante una serie de gradaciones tan sutiles que ese paso no presentará ninguna fisura ni interrupción en su continuidad.⁹

Esto era posible sólo por encima de cierta temperatura, que variaba de un fluido a otro. Por debajo de esta temperatura, siempre intervenía

una brusca fase de transición. Llamamos a ese punto de inflexión *temperatura crítica* o, con mayor laxitud, punto crítico.*

El físico holandés Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) consiguió la hazaña excepcional de explicar todo esto, al tiempo que relacionaba la teoría cinética de los gases con la existencia de los líquidos. Lo hizo en su tesis doctoral de 1873, en la que se había embarcado sin que ese fuera su objetivo ni mucho menos, sino el mucho más modesto de explicar ciertos aspectos de la teoría de la capilaridad. Derivada sobre todo de las ideas de Pierre-Simon Laplace a principios del siglo XIX, esta teoría describe cómo se comportan los líquidos cerca de superficies sólidas. Pero Van der Waals exploró un terreno que, en la década de 1870, era lo bastante fértil para dar una cosecha más abundante.

La teoría cinética explica de qué forma la presión de un gas resulta del movimiento de sus moléculas. Van der Waals sabía que un líquido también ejerce presión sobre la superficie con la que está en contacto. Era sabido que esa presión es enorme, tal vez en torno a varios miles de atmósferas, porque los líquidos son mucho más densos que los gases y, por lo tanto, son muchas más las moléculas que chocan sobre una superficie concreta. Pero nadie sabía cómo calcular la presión de un líquido a partir de sus características físicas conocidas. Esto es lo que decidió hacer Van der Waals. La única teoría que explicaba que la presión se derivaba de los movimientos microscópicos de las partículas responsables de la misma era la teoría cinética de los gases, de modo que éste fue el punto de partida de Van der Waals.

Como los gases, los líquidos están formados por moléculas que siguen un movimiento rápido y desordenado. Pero, a diferencia de los gases, los líquidos poseen cierto grado de cohesión: una gota de agua no se deshace mientras cae. En 1806, Laplace supuso que esta cohesión era debida a la tendencia de todas las partículas a atraerse. Esta fuerza de atracción explica por qué los líquidos tienen una superficie de tensión: el empuje mutuo de las moléculas en la superficie forma una especie de piel.

La teoría cinética de los gases no necesitaba tener en cuenta tal fuerza de atracción. Esto no es porque las moléculas de un gas no se atraigan

* Para el agua, la temperatura crítica es 374°C. En otras palabras, por debajo de 374°C el agua no puede pasar de líquido a gas sin una brusca transición de fase; por encima de 374°C el agua puede pasar suavemente de una densidad en la que parece un líquido, a una densidad en la que parece un gas (alterando la presión) sin ningún salto repentino.

entre sí como en los líquidos. Al contrario, es así porque la atracción es muy limitada, despreciable, en realidad, cuando dos moléculas están separadas por una distancia superior a su anchura. En el gas, la distancia media entre una molécula y otra es mucho mayor, así que, sencillamente, las moléculas no están lo bastante cerca para “sentir la fuerza” de atracción. En un gas, las moléculas se aproximan y chocan ocasionalmente, pero no se quedan pegadas porque se mueven demasiado deprisa. Así pues, constituye una simplificación muy eficaz ignorar las fuerzas de atracción. Para describir la presión de un líquido, Van der Waals imaginó que el líquido era una especie de gas pegajoso: un gas cuyo comportamiento se ha visto modificado por las fuerzas de atracción.

E incluyó otro factor en su teoría. Las moléculas son muy pequeñas, pero no infinitamente pequeñas. Sin embargo, la teoría cinética estándar las trata como “puntos” infinitesimales con masa pero sin tamaño. Van der Waals supuso que, en un líquido, que es mucho más denso que un gas, las moléculas ocupan un espacio que no es insignificante. El volumen de espacio en el que cada molécula puede moverse no equivale al volumen del contenedor en el que están confinadas, pero es menor que éste por una cantidad igual al volumen total de todas las demás moléculas.

Esto no era exactamente así. En el siglo XVIII, Daniel Bernoulli había señalado la necesidad de tener en cuenta el tamaño molecular y, en 1863, el científico francés Gustave-Adolphe Hirn había considerado que tanto este tamaño como la existencia de fuerzas de atracción podrían modificar el comportamiento del gas. Se sabía ya que muchos gases no se comportan con arreglo a las leyes del gas (y a la teoría cinética en la que éstas se integran) y, en general, se suponía que era muy probable que esa desviación la explicaran factores como el tamaño finito y las atracciones mutuas de las partículas.

Sin embargo, en su tesis, “Sobre la continuidad de los estados líquido y gaseoso”, Van der Waals relacionó todas esas circunstancias y unificó la teoría de los líquidos y de los gases. Haciendo ciertas suposiciones sobre el carácter de las fuerzas de atracción y de los efectos secundarios del tamaño de las partículas, el holandés demostró que dentro de cierto registro de temperaturas y de presiones un fluido puede existir en una de dos densidades distintas. Observó que el estado más denso debe corresponder al líquido y el estado más enrarecido al gas. Además, se percató de que, en algún punto, mientras se comprime y enfría, el gas

se hace inestable y pasa a estado líquido. Y predijo que habría una fase de transición.*

Lo más relevante de ese cambio es su brusquedad. Podemos enfriar un gas, y seguir enfriándolo, pero seguirá siendo un gas hasta que, de pronto, ¡kaboom!, se convierte en líquido. Van der Waals demostró que la densidad de un fluido no es arbitraria: podría tener un valor pequeño (como el del gas) o un valor muy grande (como el de un líquido), pero no un valor intermedio. Ésas son las dos únicas situaciones estables del grupo de partículas. Es el dato clave que debemos tener en mente. Al observar las partículas podríamos decir: “Oh, me gustaría que estuvieran *así*”, pero incluso suponiendo que ese hito de la manipulación pudiera realizarse, nos daríamos cuenta de que ese “así” no responde en realidad a un sistema estable y de que las partículas pasan rápidamente a una de las dos configuraciones posibles.

En otras palabras, en lo referente al comportamiento colectivo, no todo es posible.

¿Y qué hay de la *continuidad* de los líquidos y de los gases? Al fin y al cabo, éste era el tema que la tesis de Van der Waals anunciaba en su título. Su teoría predecía que, a medida que aumenta la temperatura, disminuye la diferencia de densidad entre los estados líquido y gaseoso. A cierta temperatura, la diferencia de densidad disminuye y el fluido tiene posibilidad de existir sólo en un estado: ni líquido ni gaseoso, sino algo intermedio. Es decir, la teoría de Van der Waals predecía el punto crítico.

Lo importante de la teoría de Van der Waals no es inmediatamente obvio, pero es vital para lo que sigue. Cuando el fluido pasa de gas a líquido o viceversa, las partículas individuales no cambian, siguen comportándose como bolitas duras, cada una con su propio campo de atracción, pequeño y de corto alcance. Pero su estado *colectivo* es decididamente (y también bruscamente) distinto: en determinado momento es un gas tenue, a continuación, un líquido viscoso. Las partículas no se condensan o evaporan *por prescripción*, simplemente, ocurre, como si todas se pusieran de acuerdo para hacer lo que hacen al mismo tiempo. Salvo que las partículas no tienen cerebro, así que no hay partícula que podamos

* No obstante, Van der Waals no pudo predecir en qué punto tendría lugar esta fase de transición con un cambio de la temperatura o de la presión del gas. Maxwell, que dio a la teoría su cauta aprobación, demostró cómo hacer precisamente eso algunos años después.

coger y de la cual, tras analizarla, decir: "Ah, vaya, parece evidente que a esta partícula le gusta formar líquidos". Sólo cuando consideramos en conjunto toda una masa de partículas podemos saber qué harán.

Van der Waals averiguó qué tenía que suceder para que se diera este comportamiento. A primera vista, daba la impresión de que una interacción atractiva entre las partículas bastaba para promover la licuefacción de un gas, pero, en realidad, se produce un sutil equilibrio entre atracción y repulsión. Van der Waals pensó que las moléculas experimentan una especie de repulsión a causa del calor, provocadas, en otras palabras, por el hecho de que se mueven con mucha rapidez. Pero lo cierto es que introdujo la idea de repulsión tan pronto como tuvo en cuenta el tamaño molecular: porque ello implicaba la idea de que, una vez que las partículas se tocaban, no podían aproximarse más. Es lo mismo que decir que la repulsión entra en juego cuando las partículas entran en contacto. Parece obvio, pero si no tenemos en cuenta su tamaño y nos ocupamos de las partículas como puntos infinitesimales, no hay nada que les impida seguir acercándose indefinidamente.

Así pues, una fase de transición surge a partir del compromiso. El equilibrio entre atracción y repulsión da como resultado un líquido estable. Si la fuerza de desorden (esto es, el calor) es demasiado grande, el gas se hace más estable. Además, la tensión entre estos factores no da pie a un cambio gradual sino catastrófico: una victoria aplastante para un bando o para el otro. Esa victoria aplastante es el gran kaboom.

UN PRINCIPIO UNIFICADOR

La teoría de Van der Waals contribuyó a que el estado líquido de la materia ingresase en la región de la mecánica estadística. Recibió alabanzas generalizadas. El propio Maxwell afirmó: "no hay duda de que el nombre de Van der Waals estará muy pronto entre los más eminentes de la ciencia molecular".¹⁰ Y así fue, en efecto, porque recibió el Premio Nobel de Física en 1910. Sin embargo, en un principio, la teoría no pareció decir nada más general sobre el comportamiento del agua. No podía describir las transiciones de fase de la congelación y de la fusión que separan un líquido de un sólido y tampoco parecía tener gran relevancia para la física.

Y sin embargo, las transiciones de fase se producen en situaciones muy distintas. Desde hacía siglos se sabía que los imanes pierden su magnetismo cuando se calientan (y lo recuperan cuando se enfrían). Para el hierro magnético, el cambio se produce a unos 770°C, una temperatura que alcanzaba ya la forja de los herreros medievales. El mismo año que Van der Waals presentó su tesis en Leiden, William Barrett planteó que la desmagnetización inducida por el calor no es un proceso gradual, sino que ocurre de pronto, a una temperatura particular: se trata de una transición de fase.

En 1889, John Hopkinson, del King's College de Londres, llegó a la notable conclusión de que, cuando se evalúa en términos cuantitativos, la pérdida de magnetismo comparte semejanzas matemáticas con la forma en que un fluido pierde su estado líquido y gaseoso en su punto crítico. Con frecuencia, este descubrimiento se atribuye erróneamente al francés Pierre Curie, el esposo de Marie, que llegó a la misma conclusión en 1895. Esto se debe a que el físico francés Pierre Weiss, que desarrolló una teoría de la transición magnética en 1907, llamó a la temperatura crítica de un imán "punto de Curie" en memoria de su compatriota, que había muerto en un accidente de tráfico el año anterior.*

Los átomos de un sólido bloque de hierro están apilados como huevos en una caja: inmóviles y ordenados; y no tienen el mismo aspecto caótico de las partículas de un gas o de un líquido. Y sin embargo, la teoría de Weiss recurre a algunos de los mismos conceptos que Van der Waals invocó para explicar las transiciones de fase y el punto crítico de los fluidos. ¿Por qué?

Para explicar esto nos ayudará un modelo de magnetismo ideado en 1920, a partir de los trabajos de Weiss, por el físico alemán Wilhelm Lenz. Un trozo de hierro es magnético porque cada uno de sus átomos actúa individualmente como un imán diminuto. Podemos pensar en esos átomos como pequeños compases con agujas magnéticas con tendencia a alinearse la una con la otra. Los físicos llaman a esas "agujas magnéticas" *spins*, es decir, "giros" (lo cual no significa que, literalmente, estén girando). En el hierro, la orientación que adopta cada *spin* está determinada por campos magnéticos creados por los spins que la rodean. Por lo tanto, el

* Hopkinson también tiene derecho a un recordatorio cuando menos tan sentimental: murió trágicamente en 1898 y junto con tres de sus hijos, en un accidente de escalada.

spin de cada átomo influye en el spin de sus vecinos. En general, las interacciones magnéticas impulsan a los spins adyacentes a alinearse, de forma que la situación más estable es aquella en la cual todas las “agujas” apuntan en la misma dirección. En esta configuración, los pequeños campos magnéticos de cada átomo se suman para crear un gran campo magnético y, así, un trozo de hierro se convierte en un imán.

Pero al igual que opone las fuerzas de atracción entre los átomos en un líquido, la influencia del calor tiende también a perturbar el alineamiento de los spins magnéticos. El calor produce un efecto semejante al que se produciría al agitar las brújulas atómicas, porque subvierte la capacidad de cada una para alinearse con todas las demás. Incluso aunque los átomos no se salgan de sus apretadas filas, aplicándoles suficiente calor perderán su ordenada formación y apuntarán en diversas direcciones al azar. En ese caso, los diminutos campos magnéticos se anularán entre sí y el trozo de hierro dejará de estar imantado.

Así pues, ¿es la transición a la desmagnetización semejante a la evaporación de un líquido? Ni mucho menos. Ocurre a una temperatura –el punto de Curie– concreta y bien definida, pero el imán no cambia bruscamente y no pasa de ser un potente imán a ser un trozo de hierro desmagnetizado. No, la fuerza del magnetismo (se la llama magnetización) desciende paulatinamente hacia cero a medida que nos aproximamos al punto de Curie. Por lo tanto, el punto de Curie se parece al punto crítico de transición de gas a líquido o viceversa, en el cual la distinción entre líquido y gas disminuye paulatinamente hasta anularse.

Se trata de una transición de fase genuina –se produce un cambio rotundo entre un no imán por encima del punto de Curie y un imán por debajo de él–, pero distinta de la evaporación, condensación, derretimiento o congelación. Las transiciones de fase que ocurren cuando un sistema atraviesa un punto crítico se llaman, como es natural, transiciones de fase críticas (o a veces, por motivos técnicos, transiciones de fase de segundo orden). Las que conllevan súbitos saltos de alguna propiedad del sistema, como la densidad, se llaman transiciones de fase de primer orden (véase figura 4.1).

Lenz decidió describir todo esto con el modelo más sencillo que se le ocurrió. En lugar de considerar que los átomos de hierro eran como brújulas con agujas muy sensibles, supuso que sus spins sólo podían señalar en una de dos direcciones opuestas –para mayor claridad diremos que

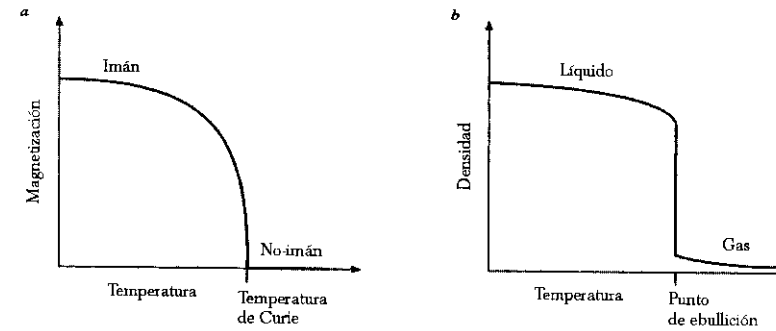


Figura 4.1. Dos transiciones de fase distintas. En una transición crítica (o de segundo orden), una propiedad característica de todo el sistema (como la magnetización de un imán) desciende gradualmente hasta cero cuando un “parámetro de control” (por ejemplo, la temperatura) se modifica (a). En una transición de primer orden (como la congelación o la evaporación), la propiedad (en este caso la densidad de un fluido) cambia bruscamente en el punto de transición (b). Con ambos tipos de transición de fase podemos encontrarnos en la física de la sociedad.

hacia “arriba” o hacia “abajo”–. Por lo tanto, dos spins vecinos sólo podían estar bien alineados, bien en oposición, sin posiciones intermedias. En efecto, algunos metales magnéticos se comportan así (da la casualidad de que el hierro no). Además, Lenz supuso que cada átomo, que ocupa una posición sobre un entramado regular, tan sólo percibe los campos magnéticos de sus vecinos más próximos.

En 1925, un alumno de Lenz en Hamburgo, Ernst Ising, imaginó cómo funcionaría este modelo en el caso más sencillo posible. Un imán de verdad está compuesto por una trama tridimensional de átomos apilados en ordenadas capas. De este modo, cada uno de esos átomos está expuesto a la influencia de un número enorme de vecinos. Menos complejo es lo que ocurriría en un imán de dos dimensiones en el que los átomos se situarían en un entramado semejante a un tablero de ajedrez; en tal caso, cada uno de ellos tendría muchos menos vecinos. Pero Ising optó por un modelo todavía más sencillo: un imán de una sola dimensión en el que los átomos se situarían en una sola fila y, por lo tanto, cada uno de ellos estaría flanqueado por tan sólo otros dos, uno a cada lado. Por supuesto, esto tiene muy poco que ver con lo que sucede en

un trozo de hierro y, por lo tanto, quizá no resulta demasiado sorprendente que Ising obtuviera un resultado muy descorazonador. En su imán unidimensional no se producía ninguna transición de fase hasta que se enfriaba a una temperatura de cero absoluto: menos 273°C. Sólo entonces quedaban alineadas todas las brújulas atómicas. El calor más leve permitía que las fuerzas de la perturbación vencieran a las del orden, y las filas de átomos perdían su magnetización.

Ising nunca llegó a hacer nada ni remotamente notable en el campo de la ciencia; se hizo maestro de escuela, huyó de la Alemania antisemita de Hitler en 1938 y acabó enseñando física en Estados Unidos, donde murió a la avanzada y venerable edad de noventa y ocho años. Pero se había ganado una especie de inmortalidad, porque los modelos basados en una red de átomos magnéticos siguen siendo ampliamente utilizados por los físicos estadísticos y se los conoce no como modelos de Lenz, sino como "modelos de Ising". En el modelo de Ising, las interacciones de corto alcance "impulsoras de orden" entre partículas individuales compiten con el generalizado efecto perturbador del calor. Sin embargo, para extraer de ese modelo algo vagamente parecido a lo que sucede en el mundo real, hay que pasar de una a dos dimensiones. Ésta es la parte más difícil. Se tardaron casi veinte años más en hacer siquiera algún progreso.

El físico noruego Lars Onsager (1903-1976) tuvo que inventar un nuevo tipo de matemáticas antes de poder deducir el comportamiento del modelo de Ising de dos dimensiones, cosa que finalmente consiguió en 1942.* A diferencia del modelo de una dimensión, este imán semejante a un tablero de ajedrez (véase figura 4.2a) experimenta una transición de fase de un estado magnético a un estado no magnético a cierta temperatura por encima del cero absoluto, y se trata de una transición de fase crítica como la que tiene lugar en el punto de Curie de los imanes de verdad. Pero si resolver un modelo de dos dimensiones fue difícil, resolver el modelo, que se corresponde con la realidad, de tres dimensiones, parece imposible. Nadie lo ha conseguido y existen evidencias de que es un problema insoluble.

Cuando los científicos se topan de frente con la insolubilidad, en lugar de alzar los brazos al cielo con desesperación, ponen en marcha sus orde-

* El científico anglo-alemán Rudolf Peierls predijo este comportamiento en 1936, pero no pudo demostrarlo de forma rigurosa.

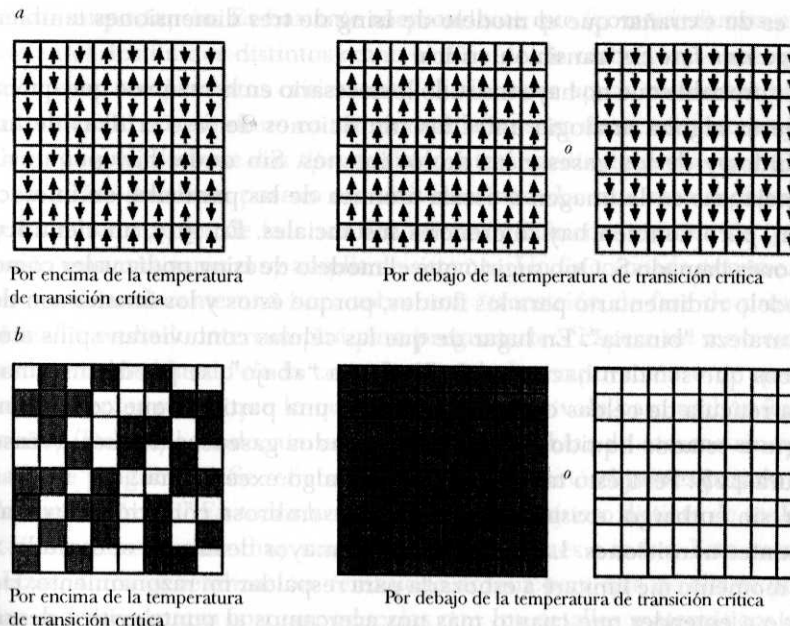


Figura 4.2. El modelo del magnetismo de Ising (a) presupone que la "aguja magnética", o spin, de cada átomo puede señalar en sólo una de dos direcciones opuestas. Los átomos se sitúan en una red regular de una, dos (como aparece en la figura) o tres dimensiones. En el estado magnético, todos los spins permanecen alineados. Por encima de la temperatura de transición crítica, los spins se sitúan en una configuración aleatoria y, en conjunto, no hay magnetización. El mismo modelo puede utilizarse para describir las transiciones de líquido a gas y su confluencia en un estado fluido en el punto crítico (b). En este caso, el modelo permite que convivan dos tipos de red: ocupada por una partícula (lo cual corresponde a estado líquido denso) y vacía (gas). Por debajo del punto crítico, el sistema puede estar en estado líquido o en estado gaseoso. Por encima del punto crítico, está (promediadamente) en un estado fluido de densidad intermedia.

nadores. Aunque parece imposible resolver las ecuaciones algebraicas que se ajustan al modelo de Ising de tres dimensiones, resulta sencillo simular cómo funcionaría ese modelo en un ordenador. Es como pronosticar el tiempo: es imposible resolver todas las ecuaciones que describen el movimiento del aire, pero aun así podemos poner en marcha una simulación por ordenador y ver qué ocurre. En lo que nos atañe,

no es de extrañar que el modelo de Ising de tres dimensiones también tenga una fase de transición crítica.

Es probable que no haya insistido lo necesario en la razón de que quepa esperar alguna analogía entre las transiciones de fase críticas de los líquidos y de los gases y las de los imanes. Sin duda, hay pequeñas semejanzas en la imagen a escala atómica de las partículas en interacción, pero también hay diferencias sustanciales. En 1947, un científico japonés llamado S. Ono sugirió que el modelo de Ising podía valer como modelo rudimentario para los fluidos, porque éstos y los imanes son de naturaleza "binaria". En lugar de que las células contuvieran spins atómicos que señalan hacia "arriba" o hacia "abajo", se puede imaginar una retícula de celdas ocupadas o no por una partícula que correspondería a estados líquidos (densos) o a estados gaseosos (tenues) (véase figura 4.2b). Pero esto también podría ser algo excepcional.

Y sin embargo, existe una estrecha y asombrosa conexión entre las distintas transiciones. La consideraré con mayor detalle en el capítulo X de momento me limitaré a esbozarla para respaldar mi razonamiento. He dado a entender que cuanto más nos acercamos al punto crítico de un líquido y de un gas, más pequeña es la diferencia de densidad entre ambos estados. Es algo que se puede cuantificar. A un noventa y nueve por ciento de la temperatura crítica, la diferencia de densidad podría ser, por ejemplo, de factor 2 (el líquido es dos veces más denso que el gas). A un 99,5 por ciento podría descender a 1,5, etcétera. Existe un *ritmo* característico al cual el fluido se aproxima a su punto crítico. Y lo mismo vale para un imán próximo a su punto de Curie, donde no es la diferencia de densidad sino la magnetización la que se aproxima a cero. Y lo más extraordinario es que, expresado en términos de porcentajes, estos ritmos son idénticos para los fluidos y para cierto tipo de imanes. Experimentalmente, la magnetización de estos imanes y la diferencia de densidades de un fluido descende a cero precisamente al mismo ritmo. Y lo que es más, una simulación por ordenador de un modelo de Ising en tres dimensiones demuestra que también tiene el mismo ritmo hacia el "momento culminante" —pese a que el modelo de Ising sea en realidad muy tosco para un fluido o para un imán—. Los detalles difieren espectacularmente en los tres casos, pero su "conducta crítica" sigue la misma trayectoria.

A esto, los críticos lo llaman *universalidad*, término que pretende decir que hay en el mundo algunos procesos para los cuales los detalles care-

cen de importancia. Es bastante sorprendente que (como veremos más adelante) dos fluidos distintos como el dióxido de carbono y el metano, que tienen temperaturas críticas muy distintas, se aproximen a sus puntos críticos al mismo ritmo en términos relativos (es decir, en porcentaje). Causa perplejidad que dos *tipos* de sistema totalmente distintos —un fluido y un imán— también posean esa universalidad. Lo que esto sugiere es que las transiciones de fase son fenómenos genéricos: ocurren de igual modo para una gama muy amplia de sistemas. Un físico puede ponerse en pie y hablar durante una hora sobre una "transición de fase de primer orden" y nadie lo interrumpirá para preguntarle: "Espere un momento, ¿está usted hablando de la congelación, de la evaporación o de qué?" Los presentes saben que lo que se está diciendo vale para ambos fenómenos. De igual modo, un urbanista puede hablar de atascos sin que nadie le pregunte: "¿Se refiere al follón que se armó el jueves pasado en Parson's Corner?" En todos los atascos hay un conjunto distinto de coches y circunstancias, pero hay rasgos que son comunes a todos. Esto suena, quizás, a una generalización demasiado amplia para que de ella se puedan extraer algunas correspondencias con los detalles matemáticos del comportamiento de imanes y fluidos. Pero quedan cosas por decir de las transiciones de fase.

CERCA DE CERO

La teoría de Van der Waals describe la forma en que, por debajo de su punto crítico y mediante una transición de fase, están relacionados los gases y los líquidos *en general*. Algunos científicos esperaban que esta teoría permitiera predecir cómo y cuándo se produce el cambio de estado en algunas sustancias. Es evidente que no todos los fluidos son iguales: el agua es líquida en unas condiciones en las que el dióxido de carbono es gaseoso; y el dióxido de carbono se licua a mayor temperatura que el nitrógeno. Esto no es ningún misterio: distintas moléculas tienen distintos tamaños y ejercen distintas fuerzas de atracción. Pero Van der Waals se percató de que el punto crítico es el punto de referencia que revela todas esas singularidades.

Si nos informáramos de la altura de todas las niñas de entre doce y catorce años de un colegio de Londres y reflejásemos los resultados en

un gráfico, obtendríamos algo parecido a la curva campaniforme de la figura 3.2 (página 76). El número de alumnas de una altura concreta se elevaría hasta un máximo y luego descendería. Si repitiésemos el estudio en todos los colegios de Londres y recogiéramos los resultados en el mismo gráfico, la curva tendría la misma forma pero sería mucho más alta, porque las cifras absolutas (reflejadas en el eje vertical) serían mayores. Si el estudio se realizase en toda Gran Bretaña, el pico de la curva estaría todavía más arriba, pero las *proporciones* serían las mismas en todos los casos: la fracción de niñas cuatro centímetros por debajo de la media sería más o menos idéntica en todos los estudios. Así pues, se pueden fundir todas las curvas campaniformes en una sola “curva maestra” cuando se recogen no cifras absolutas, sino proporciones relativas: la fracción del total que mide ciento treinta centímetros, la que mide ciento cuarenta centímetros, etcétera.

Si hiciéramos lo mismo para niños comprendidos dentro de las mismas edades, la forma de las curvas sería la misma, pero cambiarían ligeramente en el eje horizontal: la altura más corriente sería un poco mayor.* Sin embargo, incluso las dos curvas maestras de los niños y las niñas pueden superponerse en una sola curva –haciendo que las alturas sean relativas y no absolutas–. Esto es, la curva recoge la fracción de niños o de niñas que se desvía de la principal un dos por ciento, un cinco por ciento, etcétera.

Van der Waals hizo prácticamente el mismo “reajuste” de curvas para los líquidos y los gases y se dio cuenta de que las relaciones entre presión, temperatura y densidad para las distintas sustancias pueden fusionarse en la misma curva maestra cuantificándolas en términos relativos, con referencia a los valores de esas magnitudes en el punto crítico. La temperatura relativa, por ejemplo, es la temperatura dividida por la temperatura crítica. Este principio, llamado “principio de los estados correspondientes”, demuestra que todos los líquidos y todos los gases son (en una primera aproximación) el mismo “fluido maestro” reajustado por algún factor relacionado con el punto crítico. Y el reajuste está determinado por las propiedades de las partículas individuales (las moléculas) de las que está constituida la sustancia, porque la temperatura, la pre-

sión y la densidad críticas se pueden calcular, según la teoría de Van der Waals, a partir de las características individuales de las partículas: su tamaño y el alcance y potencia de sus fuerzas de atracción.

Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) era director del Laboratorio de Física de Leiden, donde trabajaba Van der Waals. Empezó a interesarse por el principio de los estados correspondientes por razones prácticas: permite predecir el comportamiento de los fluidos muy por debajo del punto crítico, a partir del conocimiento de las propiedades críticas (la temperatura, la densidad y la presión críticas). Escalando la “curva maestra” según estas cantidades, se pueden deducir las relaciones entre presión, temperatura y densidad para todo el registro en el que el estado líquido permanece estable. A Kamerlingh Onnes le interesaba saber cuánto podían enfriarse algunos gases antes de licuarse.

El helio era especialmente resistente a la licuefacción y, a principios del siglo XX, con las técnicas criogénicas existentes no se podían conseguir temperaturas lo suficientemente bajas para condensarlo. De forma experimental, adecuando a las ecuaciones de Van der Waals el comportamiento observado del helio con temperaturas que sobrepasaban su punto crítico, Kamerlingh Onnes predijo que tendría que llegar a los 5 o 6°C por encima del cero absoluto para convertirse en líquido. El cálculo es muy estimable: en realidad, el helio no se condensa hasta alcanzar los 4,2°C por encima del cero absoluto a la presión atmosférica, una temperatura que Kamerlingh Onnes logró finalmente en 1908.

Cuando dispuso de helio líquido, Kamerlingh Onnes pudo utilizarlo como fluido refrigerante para investigar cómo se comportan otras sustancias en temperaturas tan extremas. Los físicos de la época sospechaban que, como las vibraciones que el calor inducía en los átomos de los metales perturban el flujo de corriente eléctrica que los atraviesa, los metales podrían ser mejores conductores a temperaturas muy bajas y situaron la conductividad “perfecta” (sin resistencia) en el cero absoluto. Sin embargo, cuando en 1911 Kamerlingh Onnes quiso comprobar lo que sucedía al enfriar el mercurio, se llevó una gran sorpresa. La resistencia eléctrica del mercurio no descendía suavemente a medida que bajaba la temperatura: caía bruscamente a cero en torno al punto de ebullición del helio. En ese punto, el mercurio se convierte en un superconductor, capaz de transmitir una corriente a la que no se opone resistencia eléctrica alguna.

* En realidad, es en torno a los doce o trece años cuando la altura de los niños empieza a destacar por encima de la de las niñas.

Pronto se supo que otros metales tienen el mismo comportamiento por encima (y muy cerca) del cero absoluto. El plomo, por ejemplo, es un superconductor a $7,2^{\circ}\text{C}$ sobre cero. El cambio al estado de superconductor tiene todas las características de una transición de fase crítica: la resistencia desciende rápidamente a cero cuando se aproxima a la temperatura de transición del superconductor, de igual modo que la magnetización del hierro baja a cero cerca de su punto de Curie. Pero eso no era todo. En 1937, el físico soviético Piotr Kapitsa descubrió en Moscú que si se enfría helio líquido por debajo de su punto de ebullición, ligeramente por encima de los 2°C sobre el cero absoluto, desarrolla propiedades muy extrañas. Pierde toda viscosidad y no puede dejar de fluir en cuanto empieza a hacerlo. Esta forma de helio líquido es capaz incluso de ascender por la pared de su contenedor y salir. A un fluido con esta propiedad se le llama "superfluido".

A finales de 1930 la ciencia ofreció una explicación teórica de la superfluididad. La superconductividad de los metales era más difícil de entender y nadie la explicó de forma satisfactoria hasta 1957. Estos dos fenómenos tan exóticos se producen porque, a temperaturas muy bajas, las leyes de la mecánica cuántica se imponen a las leyes de la física clásica, que gobiernan los materiales a temperaturas más altas. Sin embargo, ambas se manifiestan por medio de transiciones de fase genuinas. Ambas son manifestaciones de una conducta colectiva que surge de las interacciones entre los componentes de los materiales a escala atómica. Por lo tanto, las transiciones de fase no se limitan a las partículas que se comportan de acuerdo a las venerables leyes del movimiento de Newton. Se dice con frecuencia que la mecánica cuántica dio al traste con toda la física clásica anterior, pero en modo alguno dio al traste con la física de las transiciones de fase: la mecánica cuántica se limita a darle otro sabor (un sabor que sólo se evidencia a bajas temperaturas).

En realidad, da la impresión de que las transiciones de fase persisten por mucho que uno remodele los fundamentos de la física. Para comprender la estructura interna de partículas subatómicas como los protones y los neutrones que conforman el núcleo de los átomos, no basta la teoría cuántica tradicional surgida en la década de 1920. En la década de 1970, los físicos tuvieron que desarrollar una nueva teoría llamada cromodinámica cuántica. Esta teoría emplea muchas de las herramientas conceptuales de la mecánica estadística como los modelos de retícula

—por ejemplo, el modelo de Ising— y da cuenta de las bruscas transiciones de fase que tienen lugar entre los elementos subatómicos: saltos súbitos entre distintas composiciones estables de estas partículas. Y muchos cosmólogos opinan que una transición de fase reconfiguró el universo entero durante una fracción de segundo absurdamente breve después del Big Bang. Postulan que durante esa "era inflacionaria", el universo experimentó una transición de fase cósmica en la que se expandió, pasando de un tamaño mucho menor al de un protón a un tamaño semejante al de sus actuales y pantagruélicas dimensiones. En lo relativo a las transiciones de fase, éste ha de ser el kaboom más espectacular de la historia.

HORA DE CAMBIAR

El lector imaginará ahora que detrás de todo cambio brusco hay una transición de fase, pero no es así. Si enciendo una luz apretando un interruptor, ilumino una sala que antes estaba oscura, pero no se ha producido ninguna transición de fase. He abierto una válvula, eso es todo, y ha fluido una corriente eléctrica. La noción clave de las transiciones de fase es que se producen a la vez en todos los rincones de un sistema (esto es, a escala global). Esto ocurre así debido a una conspiración en la que intervienen incontables conjurados.

Una transición de fase es un cambio global y repentino de una conducta surgido de las interacciones de muchas partículas. Lo normal es que esas interacciones sean de corto alcance, *locales*: cada partícula atiende únicamente a sus vecinas más próximas y ni sabe ni le importa lo que está ocurriendo más allá. La transición de fase se produce cuando algún elemento que actúa sobre las partículas cruza cierto umbral. En un momento dado las partículas se comportan de manera "normal", como si nada ocurriera; luego, sin previo aviso (o casi, como veremos), cambian y se comportan de un modo totalmente distinto.

La mecánica estadística de Maxwell y Boltzmann, humildemente concebida para explicar el comportamiento de los gases, ha mutado y se ha convertido en una disciplina llamada, menos arcaicamente, *física estadística*. Tradicionalmente, los físicos estadísticos se han interesado en las complejidades del comportamiento de la materia inanimada, particularmente cuando experimenta transiciones de fase y, especialmente, tran-

siciones críticas. Se trata de una ciencia estadística porque, por lo general, se ocupa de sistemas que manejan un gran número de partículas o de componentes separados que interactúan entre sí de forma que, con frecuencia, el comportamiento promedio es cuanto importa.

Los físicos estadísticos empiezan a vislumbrar vistas mucho más bonitas y sugerentes que las de un gas en un tarro. Para llegar a esa posición estratégica, primero tienen que trabajar furiosamente para rediseñar las herramientas que desarrollaron los grandes científicos de hace un siglo para nuevos usos para los cuales no fueron diseñadas. La mecánica estadística tradicional se ocupa de cosas extraordinarias, pero se esfuerza por decir mucho del mundo dinámico por el que caminamos. La termodinámica del siglo XIX se ocupaba de los estados de equilibrio, para los cuales nada se sumaba ni se restaba y en los cuales, en general, nada cambiaba jamás. En el capítulo siguiente veremos que la física estadística de hoy en día es más como la vida: está llena de procesos de crecimiento y decadencia.

V DEL CRECIMIENTO Y LA FORMA *SURGEN LA FORMA Y LA ORGANIZACIÓN*

Los razonamientos sobre las maravillosas e intrincadas operaciones de la Naturaleza están tan llenos de incertidumbre que, como con tanto acierto asegura el Sabio, apenas sabemos nada de cierto de las cosas que suceden sobre la Tierra y con esfuerzo encontramos las cosas que están delante de nosotros.

STEPHEN HALES (1727)¹

¿Se parecen los atributos de la sociedad, considerados aparte de sus seres vivientes, semejantes a los de un cuerpo que no vive? ¿O se parecen a los de un cuerpo que vive? ¿O no se parecen en nada a ninguno de los dos?

HERBERT SPENCER (1876)²

¡El orden es la criada de todas las virtudes! Pero ¿qué nos lleva al orden?

GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG³

Una transición de fase llena de magia las altas instancias. Mientras paseaba por los bosques en 1856, Henry David Thoreau se enamoró de los cristales de hielo que destellaban a su alrededor:

¡Qué lleno del genio creativo está el aire en que se generan! No podría admirarlos más si cayeran las estrellas y se metieran en mi abrigo. La naturaleza está llena de genio, plena de divinidad, y ni un copo de nieve escapa a su mano creadora.⁴

Los copos de nieve se forman en la atmósfera cuando el vapor de agua se congela —una transformación directa de gas a sólido—. ¿Qué puede decirnos la mecánica estadística acerca de esos cristales de seis puntas que los científicos llevan estudiando desde el siglo XVII? Hasta hace bien poco, la respuesta era “no mucho”. Si le hubiéramos pedido a un mecanicista estadístico de la década de 1940 que nos hablara de los copos de nieve, habría arrastrado los pies y, después de carraspear, habría dicho: “Bueno, verán, la teoría no se pensó para eso”. ¿No se pensó para que nos dijera algo de una de las transiciones de fase más comunes de una de las sustancias que más abundan en el mundo? ¿Para qué se pensó entonces?

Podría decirse que la mecánica estadística tradicional, tal y como la conocemos, debe su existencia a un hombre por encima de los demás: el científico estadounidense Josiah Willard Gibbs (1839-1903). En su libro *Elementary Principles in Statistical Mechanics [Principios elementales de la mecánica estadística]* (1902), este catedrático de Yale juntó todas las hebras y tejió con ellas un sólido y elegante tapiz. Basándose en la obra de Clausius, Maxwell, Boltzmann y Van der Waals, entre otros, Gibbs elaboró una física termodinámica coherente y explicó cómo surgían sus leyes a partir de la descripción microscópica de un sistema.

Gibbs demostró que, en los procesos de cambio, lo fundamental es la *minimización*. Dicho de forma sencilla, es algo parecido a cuando el agua baja de las montañas y se acumula en las depresiones del terreno formando pozas y lagos. Cuanto más alto el punto de partida, mayor energía gravitatoria o “potencial” tiene el agua. Si no se le pone ningún obstáculo, minimizará su energía desplazándose hacia una posición lo más baja posible. Aunque no resulte obvio a primera vista, se trata de un corolario directo de la Segunda Ley de la Termodinámica: todo cambio espontáneo se salda con un aumento de entropía.

Cuando el agua forma un lago, alcanza una especie de equilibrio: deja de bajar y se queda en donde está. La termodinámica se ocupa de los impulsos que conducen a estados de equilibrio como ése. Describe procesos de cambio de un estado de equilibrio a otro estado de equilibrio todavía más estable: como la apertura de una represa en una montaña para que el agua descienda hasta una presa más baja. Gibbs afirmó que, para que un sistema esté en equilibrio (una situación estable sin propensión inmediata al cambio), “es necesario y suficiente que en todas

las variaciones posibles del estado del sistema que no alteran su energía, la variación de su entropía o bien desaparezca o bien sea negativa”;⁵ que es una forma de decir que cuando un sistema está en equilibrio, se le puede apretar, pisar, tirar de él o hacer todo lo que se quiera, que acabará por volver a su estado inicial. Ésta es la paradoja de la termodinámica “clásica”. Pretende dar cuentas del cambio, pero en realidad no revela nada del proceso de cambio. Sólo puede ofrecer descripciones del punto de partida y del punto de llegada, pero guarda silencio acerca de lo que ocurre entre uno y otro.

Pensemos ahora en el copo de nieve. Empezó siendo vapor de agua y terminó siendo hielo: dos estados en equilibrio separados por una transición de fase. Pero en un caso el copo de nieve se convierte en una estrella de seis puntas con brazos que parecen las ramas de un árbol de Navidad, en otro sus brazos parecen hojas de trébol, un tercero está hecho de sólidos hexágonos, el cuarto como una flor con seis pétalos... Puede hojear el clásico *Snow Crystals [Cristales de nieve]* (1931), de Wilson A. Bentley y W. J. Humphreys, y verá dos mil copos de nieve distintos. Cada uno de ellos podría contar una historia diferente: es evidente que importa mucho *cómo* se solidificó el vapor de agua.

Si bien es verdad que los copos de nieve ofrecen la cara más creativa de la naturaleza, el hecho de que sean tan variados no supone ninguna novedad. ¿Hay algún árbol igual a otro? ¿Se puede repetir el tiempo meteorológico de un día? En un río que fluye sin cesar alrededor de unas rocas, ¿describe el agua las mismas figuras de un instante a otro? Como dijo Heráclito en el siglo VI a. de C.: es imposible bañarse dos veces en el mismo río.

Con frecuencia, los procesos de cambio que se producen en torno a nosotros son la clase de saltos entre los platónicos estados de equilibrio que la termodinámica está diseñada para manejar. Muchos son procesos en curso, como si esa corriente de agua recorriera eternamente meandros entre colinas, buscando una cuenca que llenar, al tiempo que la lluvia repone eternamente los manantiales en los que nace. Se trata, en pocas palabras, de procesos que no están en equilibrio y que nunca lo estarán, o, al menos, no en toda una vida.

Incluso cuando en una transición parecen existir puntos de partida y de llegada estables, como el vapor y el cristal, la forma resultante puede ser muy compleja e imposible de predecir. Esto es así porque, en el

caso de un copo de nieve, el proceso de crecimiento se produce lejos de algún estado de equilibrio. Es como sí, más que abrir una represa para que el agua caiga suavemente por la pendiente, una presa entera se viniera abajo y el agua del pantano iniciara un furioso descenso cuyo curso nadie puede anticipar.

Esto no quiere decir que la termodinámica sea perfecta en teoría e inútil en la práctica. Al contrario, es inmensamente útil. Nos permite, por ejemplo, comprender y predecir la dirección de un cambio y saber bajo qué condiciones tendrá lugar ese cambio —explicar, por ejemplo, por qué el agua se congela a 0°C a nivel del mar. A la termodinámica de los estados de equilibrio se puede recurrir para entender la generación de energía en las células vivas y en las centrales eléctricas, la formación de los minerales en la corteza terrestre y la disipación de calor en un ordenador. Pero se trata de una teoría limitada. Si nos ocupamos de procesos que nada tienen que ver con el equilibrio constante y, en particular, si nos ocupamos de procesos relativos al crecimiento y la forma, hace falta algo más.

LA HISTORIA IMPORTA

He tomado el título del capítulo de uno de los textos verdaderamente clásicos de la ciencia, un texto apto para compartir estantería con *El origen de las especies*, *Principia matemática* y *Tratado elemental de química*. Pero si el libro de Darwin dio inicio a la biología moderna, el de Newton a la física moderna y el de Lavoisier a la química moderna, *On Growth and Form* [*Sobre el crecimiento y la forma*] el ecléctico y particular libro del escocés D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948) no abrió ningún campo nuevo de la ciencia. En vez de ello, desde su publicación en 1917, ha dado pie a que varias generaciones de científicos de todo el mundo se den cuenta de que viven en un mundo de profunda belleza del que todavía queda mucho por comprender.

El libro de Thompson fue un intento de poner en tela de juicio la tendencia, imperante en su época (y que hoy todavía está lejos de erradicarse), de responder a todas las preguntas de la biología sacando a Darwin de la chistera y pronunciando la palabra mágica: ¡Adaptación! Thompson sostenía que muchas de las cosas que ocurren en la natura-

leza pueden explicarse puramente sobre la base de la geometría, las matemáticas, la física y la ingeniería, sin necesidad de invocar la selección natural.

En muchos sentidos, *On Growth and Form* se adelantó a su época, lo cual era una limitación, porque planteaba muchos ejemplos que eran la consecuencia de lo que ahora identificaríamos como procesos de crecimiento *en desequilibrio*. En 1917, considerar que la idea de cambio podía no tener nada que ver con el equilibrio era una idea que estaban lejos de comprender incluso los creadores de la termodinámica, y mucho menos un zoólogo escocés, por erudito que fuera —era un sabio conocedor de griego, latín y geometría—. Al plantear cómo una gota de tinta se dispersa en el agua, cómo se extienden las grietas en el barro o la circulación convectiva de los líquidos en una cacerola, Thompson se vio forzado a ser descriptivo más que analítico. Se dio cuenta de que, cuando experimentan algún cambio, algunos sistemas llegan “a una ‘situación estable’, si no a un equilibrio estable”,⁶ pero no pudo decir más acerca de la naturaleza de esos estados aparentemente constantes. Que, no obstante, nada tienen que ver con los plácidos estados de equilibrio de Gibbs.

Lars Onsager (página 110) lo sabía. Onsager fue uno de los primeros en hacer frente a las limitaciones de la termodinámica clásica y, en la década de 1930, se propuso hacer algo al respecto.

Limitándose a los estados de equilibrio, se diría que, dentro del mundo de la ciencia, la termodinámica optaba a propósito por quedarse arrinconada. ¿Cómo se pueden producir los cambios salvo si se perturba la tranquilidad de la que se ocupa? Una vez se han abierto las compuertas de nuestra represa, el agua que contiene deja de estar en equilibrio, y hasta que llega a la presa más baja, reina el desequilibrio. Lo mismo puede decirse del agua en proceso de congelación. No puede hacerlo a velocidad infinita, así que, mientras están en proceso, la termodinámica no sirve para describir lo que está ocurriendo.

La termodinámica clásica salva el problema con habilidad de prestidigitador. Se ocupa del proceso como si ocurriera muy, muy despacio —estrictamente hablando, como si ocurriera infinitamente despacio—. Eso permite observar el sistema en cualquier momento y decir: “Vaya, no ocurre nada: sigue en equilibrio”. Es como horadar la represa con el más diminuto de los agujeros diminutos para que salga un chorrito casi imperceptible. Ciertamente, en tal caso, la presa de abajo se llenaría gota a gota

y se diría que, en todo momento, la presa y la represa guardan un equilibrio estable.

Podría parecer que esto está en contra de mi sugerencia anterior en el sentido de que las transiciones de fase son cambios bruscos, pero por "brusco" no necesariamente quiero decir "instantáneo", aunque he de confesar que al invocar el gran kaboom de Kurt Vonnegut pretendía sugerir precisamente eso. Lo que quiero decir es que si en las condiciones imperantes no se produce ningún cambio, es preciso inducir la transición. Para cruzar la frontera de agua líquida a hielo, sólo hace falta modificar la temperatura en una proporción infinitesimal. A una centésima de grado sobre 0°C, el estado de equilibrio es aquel en el que toda el agua es líquida. A una centésima de grado bajo cero, todo es hielo.

Más que la clase de proceso en pseudoequilibrio del que puede ocuparse la termodinámica, muchas transformaciones del mundo real tienen lugar cuando la "fuerza impulsora" es mucho mayor que la mínima necesaria: por ejemplo, cuando la temperatura del agua cae de repente muy por debajo de cero. Los copos de nieve se forman así, a temperaturas que están varios grados por debajo del punto de congelación del agua.

Onsager consideró que el mejor punto de partida para desarrollar una termodinámica de los estados de desequilibrio era aquel en el que los estados se apartan sólo muy ligeramente de los estados de equilibrio, impelidos por fuerzas impulsoras relativamente pequeñas. No abrimos las compuertas de la represa, sencillamente agrandamos ese agujero del diámetro de un alfiler.

Ni siquiera los procesos de desequilibrio escapan a la Segunda Ley de la Termodinámica, porque también aumentan la entropía total del universo. Pero si la termodinámica del equilibrio nos dice que la entropía será mayor *después* que *antes*, un proceso dinámico de desequilibrio nos induce a considerar de qué forma cambia la entropía a lo largo del tiempo. Onsager empezó preguntándose por el *ritmo* al cual esos procesos generan entropía.

Para los estados de equilibrio, el criterio para determinar el comportamiento de un sistema es el principio de Gibbs: el sistema configurará sus componentes para minimizar su energía.* Onsager buscó una regla equi-

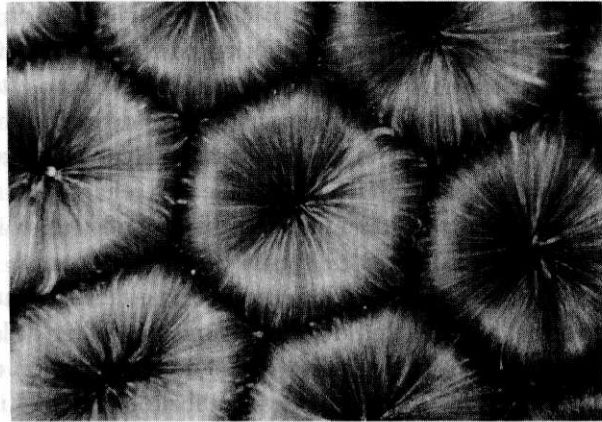
valente al principio de Gibbs que determinara el carácter de un estado de desequilibrio estable. Incluso sin equilibrio, los sistemas son capaces de adoptar estados que, en cierto sentido, no varían. Un río no está en equilibrio puesto que sus aguas fluyen constantemente de arriba abajo, pero, generalmente, permanece en un estado constante en el que las aguas quedan confinadas en su cauce a un nivel constante. Las células vivas se encuentran también en ese estado "dinámico" estable: mantienen su integridad y sus funciones al tiempo que, de forma constante, queman energía y liberan desperdicios. Los estados de desequilibrio estables son ubicuos: el vórtice de un torbellino, un automóvil en movimiento, el flujo de las mareas.

En realidad, Onsager no llegó muy lejos en la elucidación de los criterios que hacen que los estados de desequilibrio estables se impongan a otros estados posibles de un sistema. Demostró que, cerca del equilibrio, existen reglas generales que relacionan la fuerza impulsora con el ritmo de producción de entropía de un sistema, lo cual era, por sí solo, un logro asombroso en un territorio virgen, y esto le valió obtener el Premio Nobel en 1968. Pero no encontró ningún principio universal gibbsiano para una termodinámica del desequilibrio.

Existe una buena razón para ello: casi con toda seguridad se puede afirmar que no existe tal principio. Ilya Prigogine, químico nacido en Rusia que investigaba en Bruselas, creyó encontrar la fórmula mágica en la década de 1940. Prigogine afirmó que el estado de desequilibrio estable más favorable, al menos en aquellos casos en que la desviación del estado de equilibrio es mínima, es el que minimiza el ritmo de producción de entropía. Todavía se puede ver este criterio citado como un hecho, pero, por desgracia, no es universalmente cierto. ¿Significa esto, entonces, que fuera de los estados de equilibrio cualquier cosa es posible? Evidentemente, no. Los procesos de desequilibrio parecen dar pie a elecciones que, si bien no siempre son predecibles de antemano, resultan coherentes y son reproducibles. Y lo más extraordinario es que una gran parte de esas elecciones corresponde a estados que no son ni caóticos ni desordenados, sino que, muy al contrario, gozan de un alto grado de orden.

lago de una montaña y los valles y las montañas que lo rodean, o los planetas que orbitan alrededor del sol. Lo importante es que podamos definir, con suficiente grado de precisión, los componentes relevantes del sistema y la forma en que interactuarán. Otra cuestión es si "energía" es en realidad un término demasiado vago; Gibbs ofrece una definición más precisa en términos de cantidad: "energía libre", que es una parte concreta de la energía total del sistema.

* Por "sistema" entiendo un conjunto de componentes que queramos definir, como las moléculas de agua que están comprimidas en un copo de nieve. Igualmente, podríamos considerar como sistema el



a



b



c

Figura 5.1. Henri Bénard observó que un fluido en convección puede formar celdas en las que circula siguiendo trayectorias ascendentes y descendentes. En la ilustración (a), esas celdas, que pueden visualizarse echando escamas metálicas en el líquido, forman hexágonos perfectos. En las ilustraciones (b) y (c), que son de otro fluido y se han elaborado con un método de visualización distinto, las celdas parecen formar un ovillo.

En 1900, el científico francés Henri Bénard observó un ejemplo clásico de estado de desequilibrio estable ordenado.* Bénard calentó una fina capa de líquido en un plato de cobre en el que se formaron corrientes

* Aunque estos estados se asocian al nombre de Bénard, el primero que los observó, treinta años antes, fue el físico alemán Georg Hermann Quincke.

de convección: a mayor temperatura, el líquido menos denso del fondo sube y desplaza al líquido más denso de la parte superior. Se trata de un sistema en desequilibrio porque el líquido está a diferentes temperaturas en distintas partes: cuando está equilibrado, la temperatura se iguala en todo el líquido y no hay flujo por convección. El sistema se desequilibra a causa del calor y no recupera su equilibrio mientras el calor no desaparezca (puesto que la superficie del líquido, por donde el calor escapa, siempre estará más fría).

Si la fuente de calor es muy leve, sin embargo, no hay convección y el calor se redistribuye por conducción por todo el fluido. Sólo cuando la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo alcanza cierto umbral empiezan a circular las corrientes de convección desde el fondo a la superficie y a la inversa. Bénard comprobó que las corrientes se organizan en celdas hexagonales en las que el fluido asciende por el centro y baja por los bordes (véase figura 5.1a).

Variando las condiciones experimentales pueden observarse otras figuras de convección (véase figura 5.1b, c). D'Arcy Thompson advirtió esta diversidad en las volutas del humo y comentó cuánto se parecen a lo que ocurre con las nubes, "igual que en un cielo moteado o aborregado",⁷ porque, en realidad, las nubes pueden ser esculpidas por corrientes de convección ordenadas de la atmósfera. Pero no pudo decir *por qué* se forman. En 1916, Lord Rayleigh, físico, explicó el estado de convección parecido a un ovillo de la figura 5.1b por medio de la teoría de la mecánica de fluidos; una comprensión teórica mejor que otros modelos de convección surgidos en la década de 1960. Sin embargo, todavía no existe teoría que pueda predecir con fiabilidad qué figura aparecerá en un determinado experimento efectuado de acuerdo a determinadas condiciones: no hay principio gibbsiano para la formación de modelos en desequilibrio.

En realidad, buscar la predicibilidad es inútil porque los modelos de convección de Rayleigh-Bénard (que es el nombre que reciben en la actualidad) pueden diferir incluso en condiciones en apariencia idénticas si sus medios de preparación son distintos. Es decir, si se toman dos rutas experimentales distintas para llegar a la misma meta —por ejemplo, aplicar diferentes temperaturas o, al principio, remover o no remover el material—, los modelos resultantes pueden variar. Estos estados de desequilibrio estables dependen de sus *historias*.

Los modelos de convección de Rayleigh-Bénard son ejemplos de *estructuras disipativas*, esto es, de composiciones organizadas de sistemas de desequilibrio que disipan energía (los modelos de convección se mantienen gracias al aporte continuo de, por ejemplo, calor) y, por lo tanto, generan entropía. En las décadas de 1950 y 1960, Prigogine y sus colaboradores sugirieron que las estructuras disipativas se producen cuando un sistema en desequilibrio alcanza un punto de crisis llamado *bifurcación*. Próximo al equilibrio es muy posible que al sistema no le suceda nada especial: el fluido de un platillo como el que utilizó Bénard, por ejemplo, se limita a ser un conductor de calor aparentemente en reposo. En el punto de bifurcación, sin embargo, el sistema se ve bruscamente impelido a cambiar de estado.

Como el término “bifurcación” sugiere, en general hay dos opciones. En el estado celda-cilindro de Rayleigh-Bénard (véase figura 5.1b), las celdas adyacentes rotan en sentidos opuestos como dos ruedas dentadas, pero, además, cada una de esas ruedas puede girar en dos sentidos –en el sentido de las agujas del reloj o al contrario–, suponiendo que todas las demás ruedas también giran en el sentido opuesto al que lo hacen. Así pues, hay dos posibles estados celda-cilindro equivalentes en todo salvo en el sentido de la rotación. ¿Qué determina una u otra opción? El puro azar o, para ser más precisos, las fluctuaciones, lo que los físicos normalmente llaman *ruido*.

Hay ruido en todas partes. A cualquier temperatura por encima del cero absoluto los átomos se agitan con energía termal. Esto pone en marcha un zumbido de fondo que impregna toda la materia. Ese zumbido *crece* a medida que aumenta la temperatura: las fuerzas del desorden actúan sin descanso. Debido a este aspecto aleatorio de los movimientos atómicos, todos los procesos incurrir en pequeñas variaciones aleatorias o fluctuaciones. Si pudiéramos medir con escrupuloso detalle la presión sobre una pequeña zona de la superficie de un globo, podríamos advertir pequeñas variaciones debidas a las diferencias que de un momento al siguiente se producen en el número de moléculas de gas que chocan contra ella. De hecho, en la actualidad, los científicos miden con gran precisión las magnitudes de presión y temperatura a muy pequeña escala e, invariablemente, observan que las cantidades fluctúan en torno a un valor promedio.

Normalmente, y de acuerdo a su minúscula magnitud, el efecto de las fluctuaciones es despreciable. Pero en un punto de bifurcación, un sistema

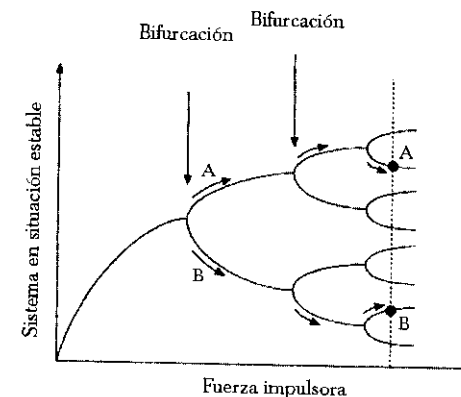


Figura 5.2. Ilya Prigogine predijo que se llega a los estados de desequilibrio estables a través de una cascada de bifurcaciones en cada una de las cuales el sistema debe escoger entre dos alternativas. Puesto que la elección está determinada por fluctuaciones aleatorias, dos sistemas inicialmente equivalentes (en este caso A y B) pueden, llevados al desequilibrio, acabar en diferentes “ramas” en distintos estados estables, porque aunque experimentan la misma fuerza impulsora, su historial de elecciones es distinto.

en desequilibrio está en el filo de la navaja. ¿Seguirá por este camino o por ese otro? El cambio más inapreciable inclinará la balanza y determinará, irrevocablemente, el destino futuro del sistema. Prigogine explicó que “en la proximidad de los puntos de bifurcación, las fluctuaciones desempeñan un papel esencial y determinan qué ‘ramificación’ seguirá el sistema”.⁸ Al incrementar la fuerza impulsora de un proceso de desequilibrio más allá de un punto de bifurcación, se puede pasar a otra situación estable: un modelo distinto al que se llega por medio de una segunda bifurcación. En general, dijo Prigogine, existe una cascada de bifurcaciones a través de la cual un proceso en desequilibrio podría evolucionar a medida que se aleja del estado en equilibrio (véase figura 5.2).

En cada bifurcación, las opciones están bien definidas, pero la elección es arbitraria. Así pues, dos sistemas completamente idénticos en el punto de partida pueden acabar en dos puntos opuestos por mucho que hayan recibido la misma fuerza impulsora, sencillamente, porque toman distintos caminos en cada bifurcación. “El tiempo se bifurca perpetuamente hacia innumerables futuros”, dice Jorge Luis Borges en su relato “El jar-

dín de los senderos que se bifurcan”.⁹ Pero si los personajes del libro escrito por Ts’ui Pên, el protagonista del relato, se pueden aventurar simultáneamente por los dos caminos con los que se encuentran, en la realidad, los sistemas sólo pueden tomar uno de los dos. Y, por supuesto, lo mismo sucede con las personas reales, porque el mundo es como es y no algún otro lugar, a consecuencia de una larga e incontable sucesión de elecciones. De este modo, afirma Prigogine, “la bifurcación introduce la *historia* en la física y la química, un elemento que, antiguamente, parecía reservado a las ciencias que se ocupan de lo biológico, lo social y los fenómenos culturales”.¹⁰

Así pues, lejos del equilibrio, el determinismo de Gibbs da paso a la contingencia histórica. Irónicamente, quizás, es esto lo que obstaculiza el intento de Prigogine de encontrar un principio de minimización para la termodinámica del desequilibrio, porque en *cualquier* sistema estable en desequilibrio lo que importa no es la forma en que las condiciones imperantes influyen sobre los componentes del sistema, sino cómo se han originado esas condiciones. No obstante, hay una sorprendente e importante similitud entre las bifurcaciones en desequilibrio y las transiciones de fase en equilibrio. Una bifurcación es un cambio global repentino a una nueva situación estable. Esto resulta familiar. En realidad, el punto de bifurcación guarda una gran semejanza con un punto crítico, igual que el punto de Curie con un imán.

Cuando un metal se enfría más allá de su punto de Curie, se convierte en un imán.* En el estado no magnético, todas las “agujas magnéticas” de los átomos (spins) están orientadas al azar, mientras que en el estado magnético están alineadas en orden. Por lo tanto, esta transición de fase crítica corresponde al comienzo de un proceso de ordenación. De igual modo, cuando se calienta un platillo de fluido por encima de su umbral de convección, esta bifurcación en desequilibrio ordena el fluido en hileras de células. En ambos casos, los físicos afirman que se ha producido una *ruptura de la simetría*.

¿Cómo que una *ruptura* de la simetría? ¿No está asociada la simetría con el orden y el azar con todo lo contrario? Es posible, pero el azar tiene su propio tipo de simetría. Un sistema en el que todos los componentes se

mueven al azar es, de promedio, más simétrico que otro en el que se mueven al unísono en una misma dirección. En el estado aleatorio, ninguna dirección se distingue de otra. En un estado celda-cilindro en convección, la dirección paralela a los cilindros es claramente diferente a la dirección perpendicular a ellos: los cilindros “señalan” una dirección especial en el espacio. Así que cuando un fluido uniforme se transforma en otro que circula en celdas-cilindro, se pierde, o se “rompe”, alguna simetría. Lo mismo puede decirse de un imán: los spins alineados señalan una dirección concreta en el espacio, cosa que no sucede en otros objetos.

Una bifurcación ofrece dos opciones equivalentes de sistema estable, y lo mismo ocurre con la transición a imán. Pensemos en el modelo de Ising, en el que cada spin puede señalar sólo en uno de dos sentidos: “arriba” y “abajo”. Los spins pueden alinearse en uno solo de esos sentidos, con magnetización semejante pero opuesta (véase la figura 4.2 de la página 111). ¿Y qué hay del punto crítico líquido-gas, que comparamos con el punto de Curie? El fluido puede adoptar bien una configuración gaseosa, bien una configuración líquida por debajo del punto crítico. Además, en una transición de fase crítica, las opciones están, como las del punto de bifurcación, a merced de las fluctuaciones. No hay motivo para que el imán prefiera un sentido de alineamiento a otro, pero un exceso casual de un tipo de spin en alguna parte del sistema puede inclinar la balanza en uno u otro sentido. Así que los sistemas sufren transiciones de fase críticas que llegan a ser hipersensibles a las fluctuaciones. Más adelante, veremos que esto da pie a un comportamiento muy especial y notable en los puntos críticos.

Estas correspondencias no presuponen que, después de todo, exista una mecánica estadística del desequilibrio equivalente a la de los sistemas en equilibrio. No, la verdad es más simple y más profunda. Las dos clases de transformación —las transiciones de fase y las bifurcaciones en desequilibrio— tienen algunos rasgos en común porque ambas son de la misma clase: las dos son modos de comportamiento *colectivo* que surgen de la interacción mutua de muchos componentes individuales. Hay condiciones tanto en el equilibrio como en el más grande desequilibrio para las cuales esas interacciones pueden hacer que una parte del sistema sea sensible, casi hasta lo milagroso, a lo que ocurre en el extremo opuesto. De pronto, toda partícula está en contacto con todas las demás a través de intrincadas tramas de nudos y, de pronto, el sistema adquiere nueva estabilidad.

* Aunque no todos los metales son magnéticos y no todos los spins de los metales magnéticos se alinean en el punto de Curie.

LA FORMA DE LAS CULTURAS

Para desarrollar una física de la sociedad debemos dar un paso audaz que a algunos les parecerá un salto de fe y a otros una ridícula idealización. El lector ya lo habrá adivinado: las partículas van a convertirse en personas. Para que ese paso sea un poco más fácil, voy a poner una piedra intermedia que llenará de *vida* nuestro paisaje antes de enfrascarnos en cosas como el libre albedrío.

Sería difícil defender que, a falta de algo parecido a un cerebro o sistema nervioso, las bacterias poseen voluntad. Y, sin embargo, están vivas. Puesto que están dotadas de una forma de comunicación primitiva, las células bacterianas pueden tener pautas de comportamiento colectivo muy ricas y diversas en los procesos de crecimiento en desequilibrio. El físico japonés Mitsugu Matsushita, de la Universidad de Chuo, descubrió en la década de 1980 que esas pautas se derivan de una especie de física bacteriana. Louis Pasteur dijo una vez que la suerte favorece a la mente preparada, y Matsushita estaba preparado para su incursión en las ciencias biológicas gracias a su formación en la física estadística del creci-

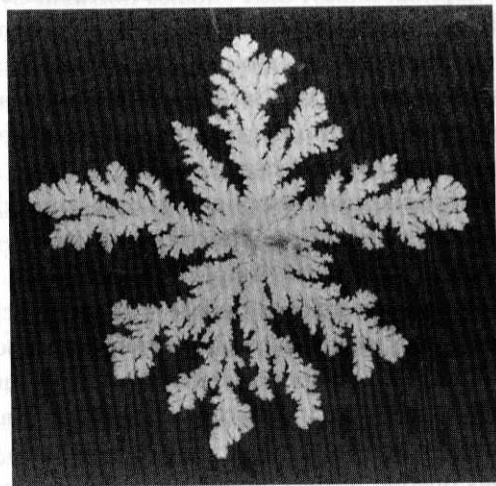


Figura 5.3. Bajo ciertas condiciones, la bacteria *Bacillus subtilis* crece en colonias con una compleja ramificación en *fractal* que se parece mucho a los procesos de crecimiento de sistemas de materia inerte.

miento en desequilibrio. Al observar el complejo proceso de formación de una colonia en crecimiento de la bacteria *Bacillus subtilis* (véase figura 5.3), supo lo que estaba buscando.

Era un *fractal*: una estructura que reitera en escalas sucesivamente más pequeñas la forma que despliega en las más grandes. Matsushita reconoció aquí el tipo de fractal característico de un proceso llamado agregación por difusión limitada o ADL, que se produce, por ejemplo, cuando un metal se acumula en un electrodo con carga negativa bañado en una solución salina: el fenómeno de la electrodeposición. Lo que cautivó a los físicos de principios de la década de 1980 cuando empezaron a estudiar formas fractales como ésta, que se originan en procesos que no son biológicos como la electrodeposición, fue que esos modelos se parecen a las formas “orgánicas” de la naturaleza: por ejemplo, los depósitos minerales de algunas rocas se confunden a veces con helechos fosilizados. Ahora, en el laboratorio de Matsushita, se encontró un auténtico fractal biológico.

La forma en fractal de un depósito de ADL parece caótica, pero no es arbitraria. No hay dos depósitos idénticos, pero todos ellos tienen rasgos en común; por ejemplo, la eficacia con la que las ramas del fractal llenan el espacio del que disponen. No importa cuánto crezca la estructura, siempre habrá *fiordos* de espacio vacío que penetran en la forma ramificada. Existe un número que mide la eficacia de ese “llenar el espacio”, se llama *dimensión fractal*.* Todos los modelos de crecimiento ADL tienen la misma dimensión fractal. Es una señal de identidad que vale para distinguir el crecimiento en estructuras ramificadas del de otras estructuras superficialmente similares.

En 1981, los físicos Tom Witten y Len Sander propusieron un modelo teórico del proceso de ADL motivado por su intento de explicar por qué las partículas de polvo se amontonan en el aire. El modelo sugiere que las partículas siguen una trayectoria aleatoria de tipo browniano (esto

* La dimensión fractal no es un número entero, porque los fractales no llenan del todo el espacio que ocupan. Un bloque de piedra es un objeto de tres dimensiones: llena un volumen de espacio tridimensional concreto. Asimismo, un cuadrado dibujado en el espacio bidimensional que es un trozo de papel, ocupa un área de superficie concreta: es un objeto de dos dimensiones. Y una simple línea es unidimensional. Pero un fractal como el de la Figura 5.3 está entre lo unidimensional y lo bidimensional. Esta forma en particular es en torno a 1,7 dimensional: es decir, tiene una dimensión fractal de 1,7. Eso significa que “llena” más espacio bidimensional del que ocuparía una línea, pero no tanto espacio como, por ejemplo, un disco.

es, en difusión; véase la página 54) y que se pegan en cuanto entran en contacto. Witten y Sander se dieron cuenta de que, a partir de este proceso, se formaban puntas de rama inestables que no pueden evitar otra cosa que quebrarse en dos a la menor oportunidad. En 1984, Matsushita demostró que los racimos que surgen de este modelo de ADL son precisamente aquellos que se forman por electrodeposición en un platillo plano. Las colonias ramificadas de *B. subtilis* de Matsushita no sólo se parecen a los racimos de ADL, sino que tienen la misma dimensión fractal. Esto sugeriría (aunque no demostraba) que, en ambos casos, los procesos de formación compartían los mismos rasgos esenciales, sobre todo la separación constante de las puntas inducida por fluctuaciones aleatorias de la punta del racimo, que avanza.

La ADL es un proceso en desequilibrio y los modelos fractales son una de las causas del crecimiento en desequilibrio. El hecho de que, de forma inmediata e irreversible, las partículas se adhieran entre sí allí donde chocan contra el racimo, no les deja oportunidad para encontrar su configuración equilibrada más estable. El racimo de ADL es un mapa histórico de accidentes. Matsushita y sus compañeros se preguntaron qué podría ocurrir si modificaban la fuerza impulsora que aleja del equilibrio a sus colonias bacterianas fractales. Así que modificaron dos factores que, como suponían, alteraron el proceso de crecimiento de esas colonias. Las colonias fueron cultivadas en una capa de gel transparente llamado agar, impregnado con los nutrientes necesarios para que las células crecieran y se multiplicaran. Cuando la cantidad de agua del gel disminuye y el material se hace más rígido, las células se pegan con más fuerza a la superficie. Así que, variando el índice agar/agua del gel, los investigadores pudieron controlar la movilidad de las células. Y modificando el contenido de los nutrientes, pudieron modificar también la "salud" de la colonia: su capacidad para generar nuevas células.

Al alterar esos dos parámetros, el equipo de Matsushita se percató de que las colonias desarrollaron formas en crecimiento muy distintas a las de la estructura de ADL. Cuando el nivel de los nutrientes era alto, la colonia era densa, gruesa, y las ramas como dedos sólo aparecían en el perímetro, y se parecía a un líquen en una roca. Esta forma se parece a la del modelo de crecimiento teórico diseñado por el matemático M. Eden en 1961 para describir la evolución de los tumores cancerígenos. Tanto las colonias de ADL como los tumores aparecen en superficies de

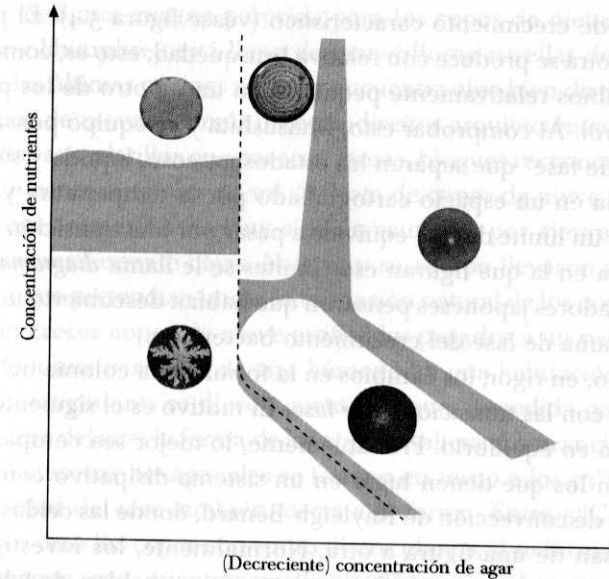


Figura 5.4. Las colonias bacterianas que crecen en una placa de Petri con gel agar forman figuras que dependen de dos factores: la cantidad de nutrientes disponibles y la dureza del gel. Esas figuras pueden organizarse en un *diagrama morfológico* como el que aquí aparece. El paso de una figura a otra puede ser muy brusco. Los límites entre morfologías aparecen en gris, mientras que la línea discontinua indica el paso de las células de la inmovilidad (izquierda) a la movilidad (derecha) a medida que el gel se hace más blando.

agar duras en las que las células no pueden desplazarse. La colonia avanza a medida que genera nuevas células en sus bordes. Sin embargo, si el gel es más blando y las células se pueden mover, aparecen otras formas con ramas delgadas y radiantes cuando tienen pocos nutrientes y formando anillos concéntricos, como en el modelo de Eden, cuando los nutrientes abundan. Si las bacterias son, al mismo tiempo, plenamente móviles y están bien alimentadas, progresan rápidamente en un frente más o menos circular, dejando a su espalda una colonia tan dispersa que apenas resulta visible.

Por lo tanto, el espacio *cartografiado* por la latitud y longitud de la dureza del gel y de la cantidad de nutrientes (los "parámetros de control") está dividido en dos zonas bien definidas, cada una de las cuales con su pro-

pio modelo de crecimiento característico (véase figura 5.4). El paso de una figura a otra se produce con relativa brusquedad, esto es, como resultado de cambios relativamente pequeños en uno u otro de los parámetros de control. Al comprobar esto, Matsushita y su equipo pensaron en los “límites de fase” que separan los estados gaseoso, líquido y sólido de una sustancia en un espacio cartografiado por la temperatura y la presión. Cruzar un límite de fase equivale a pasar por una transición de fase, y a la gráfica en la que figuran esos límites se le llama *diagrama de fase*. Los investigadores japoneses pensaron que habían descubierto una especie de diagrama de fase del crecimiento bacteriano.

Pese a todo, en rigor, los cambios en la forma de la colonia no pueden compararse con las transiciones de fase. El motivo es el siguiente: el sistema no está en equilibrio. Probablemente, lo mejor sea comparar esos cambios con los que tienen lugar en un sistema disipativo como el de los modelos de convección de Rayleigh-Bénard, donde las celdas de convección pasan de una figura a otra. Normalmente, los investigadores que estudian la formación de figuras bacterianas hablan de “diagrama morfológico”, análogo al diagrama de fase, que clasifica las formas de las colonias y las condiciones bajo las cuales ocurren (en este caso, morfología no significa más que “forma”).

Otros tipos de bacterias forman otras figuras distintas y complejas y, además, experimentan cambios bruscos pasando de una a otra, a medida que las condiciones de crecimiento varían. En el próximo capítulo veremos que algunas de esas figuras pueden comprenderse dando por hechas ciertas suposiciones sencillas sobre qué controla el movimiento de las células, de igual modo que el complejo racimo de ADL puede comprenderse a partir del modelo de movimiento de partículas e interacciones desarrollado por Witten y Sander. A partir de las “reglas” sencillas que dictan el comportamiento individual de las células, podemos deducir los modelos globales en que pueden formarse.

FLORES DE HIELO

El concepto de diagrama morfológico para los procesos de crecimiento en desequilibrio tiene su propia historia. En la década de 1930 y mientras trabajaba en la Universidad de Hokkaido, el científico japonés Ukichiro

Nakaya ideó una imagen parecida para los copos de nieve. El libro de Bentley y Humphrey está lleno de maravillosas estrellas de seis puntas, pero en las últimas páginas el lector encuentra algo bien distinto. En ellas hay copos de nieve que más parecen diseños arquitectónicos: columnas rematadas con platillos que parecen mesas, bloques rectangulares y regulares que parecen relojes de sol. Se trata de copos de nieve formados en condiciones atmosféricas muy singulares como, por ejemplo, temperaturas extremadamente bajas. Nakaya y su equipo llevaron a cabo experimentos que pretendían imitar la formación natural de los copos de nieve. Hicieron crecer copos de nieve artificiales pegados a un pelo de conejo sometido a una corriente de aire húmedo en una habitación muy fría.

Los investigadores se dieron cuenta de que, a medida que cambia la temperatura del aire, la forma de los copos se altera al cruzar ciertos umbrales. Las columnas hexagonales se forman en torno a los 25°C bajo cero. La humedad del aire también afecta a la forma. Entre 5°C bajo cero y 22°C bajo cero los copos son como discos planos, si se forman en un aire relativamente seco, mientras que la estrella que a todos nos resulta familiar se forma cuando la humedad del aire es mayor. Así pues, la temperatura y la humedad son los parámetros de control del “espacio morfológico” de los copos de nieve, al igual que la dureza del gel y el nivel de nutrientes lo es para las bacterias.

Aunque no hay dos copos de nieve —ni dos colonias bacterianas— idénticos, se pueden dividir en *clases* de figuras de crecimiento distintas separadas por lo que podríamos llamar transiciones de forma. En otras palabras, una especie de orden subyace a la aparente profusión de las formas: toda figura de crecimiento individual puede ser singularmente bella, pero para un conjunto de condiciones de crecimiento dado se da una inevitabilidad que daría como resultado lo que podríamos llamar su forma platónica. Es en este sentido en el que un experimento con el crecimiento de los copos de nieve es irrepetible: los detalles pueden diferir, pero la forma permanece.

Ahora bien, ¿de dónde proviene la individualidad? De la contingencia del crecimiento en desequilibrio: el brazo de un copo de nieve se ramifica en un punto y no en otro a causa de alguna fluctuación producida durante el proceso de crecimiento, que hace que la *rama* surja en determinada etapa y no en otra. Los copos de nieve experimentan las llamadas inestabilidades de crecimiento, que amplifican florecimientos

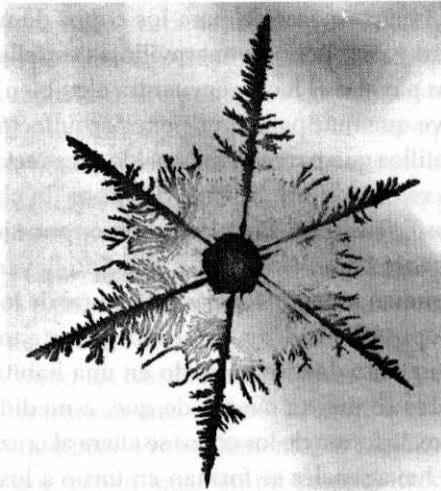


Figura 5.5. Los copos de nieve bacterianos pueden conseguirse dejando que una colonia se desarrolle en una lámina de gel en la que se ha hendido una trama de ranuras hexagonal. Así se orienta la dirección de las nuevas ramificaciones.

pequeños y aleatorios y originan la formación de nuevas ramas. Lo mismo ocurre con el proceso de ADL, que da como resultado figuras fractales y ramificadas de colonias bacterianas. Pero los copos de nieve no se forman tan al azar: su asombrosa belleza reside en la simetría de sus seis puntas, que identificó por vez primera el astrónomo y matemático alemán Johannes Kepler en 1610. Esa simetría hexagonal la impone la disposición regular de las moléculas de agua congelada: un entramado cristalino que apunta a seis direcciones “especiales” en el espacio. Las nuevas ramas de hielo cristalino brotan preferencialmente en esas seis direcciones. En efecto, el crecimiento de los cristales está constreñido por una trama hexagonal subyacente tal que, a escala molecular, el orden geométrico se hace manifiesto con una regularidad que es evidente en la escala mucho mayor del copo de nieve en su totalidad. La interacción de azar y regularidad en la formación del copo de nieve es algo muy sutil cuyos detalles no llegaron a comprenderse hasta la década de 1980.*

* Comento con mayor extensión la historia de la comprensión de este proceso en *The Self-Made Tapestry [El tapiz que se hace a sí mismo]*.

El efecto de una simetría subyacente en lo que de otro modo sería un proceso de formación aleatorio, ha sido demostrada con el crecimiento de colonias de bacterias fractales sobre una capa de gel en la que se ha trazado una trama de ranuras hexagonal. Las ranuras constituyen una guía para el proceso de crecimiento, de tal forma que la colonia resultante parece un copo de nieve (véase figura 5.5).

El crecimiento en desequilibrio y las figuras a que da pie son un área activa de investigación de la física. Pero si bien es cierto que se ha llegado a un alto grado de comprensión del mismo, no existe aún una teoría global comparable a la física estadística, que describe el comportamiento de los estados y de las transiciones de fase de los sistemas en equilibrio. Las estructuras y figuras que aparecen en sistemas en desequilibrio son con frecuencia complejas y bastante sutiles. No obstante, como ya hemos visto, muchos de los instrumentos e ideas desarrollados para la física estadística del equilibrio pueden aplicarse o adaptarse a los sistemas en desequilibrio, cuyo comportamiento en modo alguno es inmune a la predicibilidad y a las regularidades. Y esto, puesto que la mayoría de los procesos que la nueva física social pretende comprender son fenómenos de desequilibrio, no puede menos que ser un mensaje tranquilizador.

VI
LA MARCHA DE LA RAZÓN
AZAR Y NECESIDAD EN LOS MOVIMIENTOS COLECTIVOS

No es ni remotamente comparable la dificultad de explicar un fenómeno a base de una pizca de mecánica y una fuerte dosis de incomprendibilidad a la de intentar hacerlo únicamente por medio de la mecánica.

GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG¹

Una de las condiciones de que en la confluencia de dos avenidas de una gran ciudad el tráfico de hombres y vehículos circule ordenadamente es que entre unos y otros no haya colisiones.

EDWARD A. ROSS (1901)²

Sonrió y dijo que llegaría al extremo de afirmar que, si un artesano quisiera construir una figura mecánica con las características que tenía en mente, podría utilizarla para interpretar una danza que ni él ni ningún otro bailarín consumado de su tiempo podrían imitar.

HEINRICH VON KLEIST (1810)³

Thomas Hobbes era un sabio anciano y venerable cuando, en torno a 1670, Antoni van Leeuwenhoek vio por vez primera una bacteria a través de su microscopio de fabricación casera. Leeuwenhoek, comerciante de paños de Delft, empleó las lentes de campo que utilizaba para examinar los tejidos en su negocio y, poco a poco, se fue sumergiendo en el mundo de los microorganismos. Nada era demasiado peligroso ni

demasiado repugnante para escapar a la posibilidad de examen más allá de la resolución del ojo humano. Entre los especímenes que sometió a su escrutinio estuvieron la pólvora y su propio excremento.

No había teoría ni filosofía natural capaz de prepararle para la multitud de *animalitos* que parecían plagar casi todos los materiales derivados o tocados por algún ser vivo. El agua de las marismas estaba repleta de ellos, parecía un zoo en miniatura. “Y los movimientos de todos esos animales en el agua –escribió en el informe que presentó ante la Royal Society de Londres en 1674– son tan rápidos y tan diversos, hacia abajo, hacia arriba, dando vueltas, que era maravilloso verlos”.⁴ Y allí estaba el comerciante holandés, observando a través de un ojo casi divino la Comunidad de las Bacterias y comprobando cómo se dirigían, ávidamente, a solucionar el asunto que pudieran tener entre manos. ¿Quién habría sido capaz de saber sus propósitos?

Cuando, en la década de 1990, el físico israelí Eshel Ben-Jacob quedó fascinado por las figuras de las colonias bacterianas de Mitsugu Matsushita, esos propósitos fueron la clave para comprender lo que sucedía en las colonias multicelulares. Dado que había contribuido a decodificar el misterio de la forma ramificada de los copos de nieve, Ben-Jacob, al igual que Matsushita antes que él, reconoció en las sutiles andanzas de las bacterias una huella de procesos familiares del mundo inorgánico. Las células vivas se portaban igual que las ciegas e insensibles partículas de gas. ¿Acaso las reglas que gobernaban sus movimientos eran igual de simples?

Ben-Jacob y su equipo emprendieron la investigación de los factores que dictan las pautas de crecimiento de los bacilos bacterianos y no tardaron en descubrir nuevas y maravillosas regiones en ese mapa de formas llamado diagrama morfológico. Algunas colonias se expandían en rizadas ramificaciones (véase figura 6.1a), mientras que otras formaban volutas cuyos brazos en espiral acababan en forma de gotas (véase figura 6.1b). Al observar esas figuras a través del microscopio, Ben-Jacob vio algo que, sin duda, no pudieron ver los ojos de Leeuwenhoek. Las gotas de los extremos también formaban espirales o remolinos. Decenas de miles de largas y delgadas células se agolpaban formando un remolino como el tráfico en una inmensa rotonda. Esas bacterias que formaban remolinos, a las que los investigadores bautizaron con el nombre de “morfotipo de remolino”, eran mutaciones de la voluta original, en la que la tendencia a girar en círculo parecía determinada genéticamente. Si se

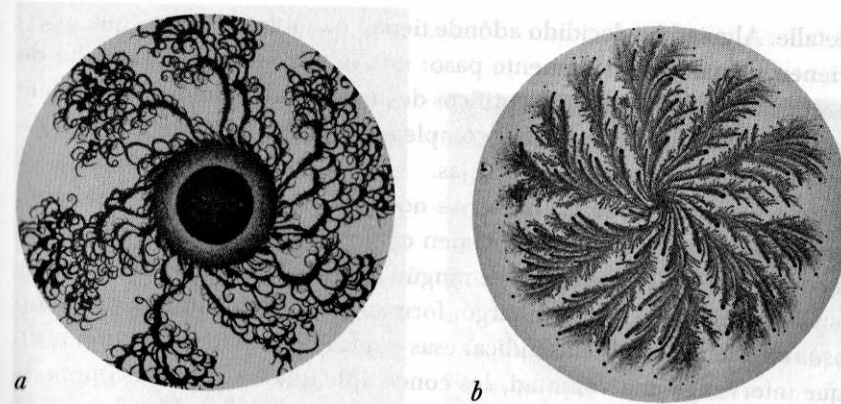


Figura 6.1. (a) El crecimiento “quiral” en una colonia de bacilos bacterianos. (b) El modelo de crecimiento “en torbellino”. En las gotas situadas en los extremos de cada ramificación, las células se mueven en círculo.

extraían unas cuantas células y se las empleaba para *fundar* una nueva colonia, también ellas desarrollaban gotas que, examinadas más de cerca, eran en realidad remolinos.

Este asombroso comportamiento no carecía de precedentes. Algo similar se había dicho en la década de 1940 de los movimientos de una especie de bacteria bautizada con el nombre de *Bacillus circulans*. Lo que más llamó la atención de Ben-Jacob y de su equipo fue que los movimientos celulares fueran coordinados, como si las células se hubieran puesto de acuerdo. Las figuras ramificadas que había observado Matsushita podían interpretarse dando por supuesto que las células seguían una trayectoria aleatoria a través del gel de agar, igual que las partículas de gas cuando ejecutan su errática danza en el espacio. Pero en ambos casos, el crecimiento en forma de bucle y en forma de remolino parecía una especie de movimiento colectivo organizado.

Los humanos nos organizamos para movernos en todo tipo de formas muy elaboradas, pero la cohesión y la precisión de un desfile militar o de la ceremonia inaugural de unos Juegos Olímpicos no tienen ningún misterio. Esas formas son resultado de muchas horas de instrucción y entrenamiento. Se llega a ellas por mutuo consentimiento y su ejecución depende de que cada participante ponga especial cuidado en cada

detalle. Alguien ha decidido adónde tienen que ir las personas que intervienen y cuál será el siguiente paso: una inteligencia dirige qué ha de hacer cada individuo. Los científicos de la sociedad tienden a asumir que todo tipo de pauta conductual compleja como ésta requiere una planificación y una motivación complejas.

Pero los motivos de las bacterias no son complejos, al fin y al cabo, las bacterias no piensan. No pueden conjurarse para decidir qué harán a continuación. Tampoco existe ningún Señor de las Bacterias que dicte sus movimientos. Y sin embargo, forman remolinos con una precisión asombrosa. Si, como ello indica, esas pautas de movimiento surgen sin que intervenga una voluntad, ¿es concebible que las personas *caigan* de vez en cuando en pautas de conducta similares, en pautas complejas pero que no están dirigidas por ningún plan ni intención?

LA COREOGRAFÍA DE LOS ENJAMBRES

Los bacilos no son seres insólitos del mundo microbiano con una peculiar inclinación por las actividades de grupo. El comportamiento colectivo es un fenómeno muy extendido en la naturaleza y la cooperación va en numerosas ocasiones mucho más allá de la natación en círculos. Un Hobbes microbiano no tendría ninguna dificultad en señalar a su Leviatán, a su “Multitud unida en una Persona”, le habría bastado con citar el caso del *Dictyostelium discoideum*, el moho del limo. Este organismo unicelular sigue su propio camino cuando las cosas le van bien—cuando la comida y el agua abundan y el clima es cálido—, pero en cuanto llega la sequía, el hambre o el frío, se acerca a sus congéneres en busca de apoyo.

El moho se arracima en grupos de células, cada una de las cuales busca un centro de población igual que los campesinos famélicos se dirigen a la ciudad cuando arrecia el hambre. En cuanto alcanzan las decenas o las centenas de miles, esos grupos actúan como si fueran un solo organismo multicelular, una “babosa”.* Esa babosa se desplaza como una masa cohesionada. De vez en cuando echa raíces y cambia de forma. Empieza

* En el proceso de agrupamiento se producen algunas de las figuras espontáneas más fantásticas que pueden observarse en la naturaleza. Hablo de ellas en *The Self-Made Tapestry*.

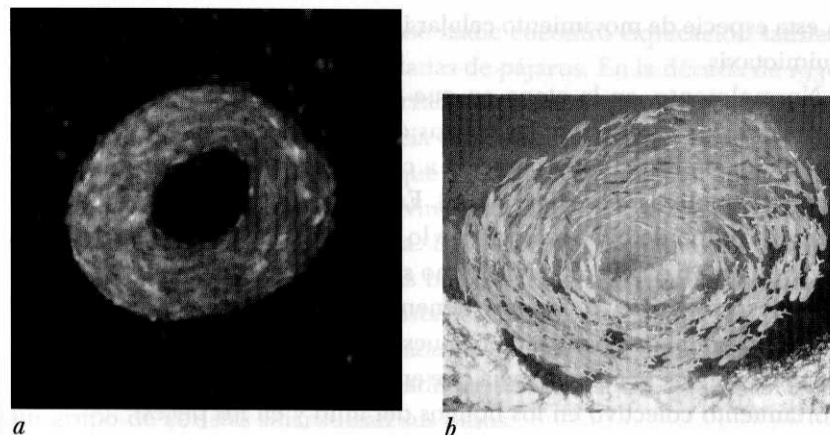


Figura 6.2. (a) Remolino formado por las células del *Dictyostelium discoideum*, un hongo del limo. (b) Algunos peces nadan formando remolinos parecidos.

a parecerse a una planta extraña de tallo estrecho y cabeza gorda y se le llama cuerpo de fruta. Ese cuerpo contiene células que se han convertido en esporas que pueden sobrevivir a cualquier inclemencia prácticamente sin alimento y en espera de mejores tiempos. Es así como Hobbes retrató la “Esencia de la Comunidad”:

Una Persona, de cuyos Actos una gran Multitud, mediante Acuerdos mutuos de quienes la componen, se hace autora, con el fin de que esa Persona pueda emplear, como considere oportuno, la fuerza y los medios de todos para la paz y su común defensa.⁵

¿Cómo llegan a esos “acuerdos mutuos” células que no pueden ver ni oír ni hablar? El *Dictyostelium*, como todos los organismos unicelulares que se comportan de forma colectiva, se comunica mediante una especie de sentido del olfato. Cuando hay dificultades, algunas células exudan una sustancia química que atrae a otras células de forma parecida a cómo los animales superiores emiten feromonas para atraer a sus compañeros sexuales. Ciertas células *Dictyostelium* se convierten en *pacificadoras*, transmiten las ondas que inicia la célula *atractiva* y, a continuación, las células cercanas siguen la senda que conduce al origen de esas ondas.

A esta especie de movimiento celular inducido químicamente se le llama quimiotaxis.

Normalmente, en la etapa en que convergen hacia esas ciudadelas formadas por agregación, las células del *Dictyostelium* se organizan en remolinos de forma muy parecida a como hacen los bacilos del morfotipo de remolino (véase figura 6.2a). Es un movimiento que resulta familiar a otro tipo de biólogos, porque lo adoptan muchos bancos de peces (véase figura 6.2b). Pero los peces no se comunican por quimiotaxis, tienen ojos para verse. Y, además, tienen cerebro, por pequeño que sea, lo que les permite un abanico de respuestas al entorno mucho más amplio. Así pues, ¿es mera coincidencia que encontremos el mismo tipo de comportamiento colectivo en los hongos del limo y en los peces?

Muchas clases de animales se congregan en grupos que se mueven al unísono, a menudo por razones identificables y precisas. Los grupos pueden proteger a los jóvenes vulnerables y, ante la presencia de predadores, el número constituye una buena defensa. Un enjambre de abejas regula la temperatura de una colmena aprovechando el calor de sus cuerpos; las hormigas son más eficaces cuando buscan algo si lo hacen en masa. Pero los biólogos Julia Parrish y Leah Edelstein-Keshet han señalado: "es difícil sostener que todas las agregaciones de animales tienen un propósito funcional [...] La figura y la estructura pueden surgir [...] a través de interacciones no lineales tanto si las unidades están vivas como si no lo están".⁶ En otras palabras, al buscar una explicación *biológica* (es decir, de adaptación) para el conjunto del comportamiento colectivo de las poblaciones animales, se corre el riesgo de invocar una explicación evolutiva contingente de algo que, en realidad, es consecuencia inmediata de la *física* de la situación.

Con independencia de si responde o no a un propósito, queda por explicar *cómo* coordinan los animales el movimiento y su comportamiento. Un ejemplo sorprendente de desplazamiento colectivo del mundo animal puede verse al crepúsculo sobre las copas de los árboles, cuando las bandadas de estorninos describen, de forma casi milagrosa, complicados rizos en formación cerrada. De nuevo, ningún individuo los guía, no siguen a ningún líder. Y sin embargo, todas las aves parecen tomar la misma decisión al mismo tiempo. Con las abejas sucede algo similar. Éste es un terreno abonado para quienes desean creer que la ciencia está pasando por alto algún aspecto profundo y misterioso de la naturaleza.

Hasta finales de la década de 1980 nadie encontró explicación satisfactoria de las maniobras de las bandadas de pájaros. En la década de 1930, un investigador incluso se vio forzado a postular que los pájaros recurrían a una especie de transferencia de ideas. En 1984, Wayne Potts, de la Universidad de Utah, sugirió que las maniobras pueden ser inspiradas por algún individuo cuyos movimientos llegan mediante ondas hasta otros componentes de la bandada. Potts afirmó que había identificado este comportamiento al filmar las bandadas de correlimos que sobrevuelan el estuario de Puget, en la costa del Pacífico estadounidense. Afirmó que cada componente de la bandada ve la onda y sincroniza su maniobra para que coincida con la llegada de otra onda, de igual forma que un grupo de coristas sincronizan sus pasos.

Pero no era una explicación suficientemente convincente, porque requería que cada ave fuera consciente de lo que estaba ocurriendo a una distancia considerable de su posición: las ondas de las que hablaba Potts se movían tan deprisa que cada pájaro no podía estar simplemente reaccionando a lo que hacían sus vecinos más próximos. La teoría *de las coristas* exige de las aves más cerebro del que tienen. Hacía falta algo más, pero no fueron unos biólogos, sino unos físicos quienes encontraron el ingrediente extra.

LOS TÍTERES DE NEWTON

Los científicos suelen quedar atrapados en los tropos de sus campos de investigación. Los zoólogos buscan explicaciones del comportamiento animal en los propios animales; los biólogos moleculares exigen una explicación genética. Por su parte, los físicos están más acostumbrados a pensar en términos de interacciones *entre* cosas, sean esas cosas átomos, electrones, quarks o moléculas de gas. Pero hay algo que está claro: en lo que se refiere a los pájaros, ningún ejemplar puede tener la trayectoria de vuelo de la bandada en un día determinado programada genéticamente.

Craig Reynolds no es exactamente un físico. En 1987 trabajaba en Symbolics, una empresa de ordenadores californiana, y en tanto que técnico de programas informáticos, estaba más familiarizado con la forma de pensar axiomática y basada en reglas de los físicos que con el enfoque fenomenológico de los biólogos. Así que cuando se sentaba a ver

las bandadas de pájaros negros que sobrevolaban el cementerio de su localidad, le daba por preguntarse qué normas seguirían. “Todas las evidencias indican –escribió más tarde– que el desplazamiento de la bandada puede no ser más que el resultado agregado de las acciones de cada animal, que actúa sólo sobre la base de su percepción local del mundo”.⁷ Ésta, le pareció, era la clave: *percepción local*. Es imposible que un pájaro anticipe lo que todos sus compañeros de vuelo van a hacer o los siga, pero puede responder muy rápidamente a lo que sus vecinos más inmediatos hacen.

Así pues, Reynolds ideó un programa informático en el que las partículas estaban obligadas a obedecer tres reglas muy sencillas, cada una de las cuales estaba basada únicamente en la información que recibía de las partículas más cercanas. No era justo llamar “partículas” a unos seres tan receptivos y sensibles, así que Reynolds las llamó *boides*, fusión de los términos “bird”, “pájaro” en inglés, y “droide”, como los robots de las películas de ciencia ficción. Las reglas de desplazamiento eran las siguientes: cada uno de los boides reaccionaría a todos los que se encontraran dentro de lo que podríamos llamar su esfera local; se movería hacia el centro de masa de ese grupo; y evitaría las colisiones con los demás.* Las estimaciones de velocidad y dirección eran normas cohesivas: los boides que estaban próximos se mantenían cohesionados mientras se desplazaban. Pero no hay nada en esta prescripción que determinase el comportamiento global de la bandada, nada que diera pie a que los boides de un grupo influyeran directamente en los movimientos de los boides de otro grupo. No había en esas reglas ninguna tendencia oculta a que los boides formasen una bandada cohesionada.

Y sin embargo, eso era precisamente lo que hacían. Sus desplazamientos, simulados mediante gráficos de ordenador, recordaban asombrosamente al desplazamiento de una bandada real. Luego, Reynolds incluyó otros factores de influencia adicionales como obstáculos permanentes o la tendencia a desplazarse a una posición en particular (como si los pájaros estuvieran buscando un lugar donde anidar o una fuente de alimento). De este modo, pudo reproducir una gran parte de los movimientos de las bandadas reales. Tan convincente resultó su programa, que unos

* El centro de masa es como el centro de equilibrio de un bailarín que, en este caso, estaría situado en algún lugar de la tripa.

productores de Hollywood lo adaptaron para crear efectos especiales como las bandadas de murciélagos en *Batman vuelve* y la manada de ñus en estampida en *El rey león*.

Un boide es una especie de autómeta, una criatura semejante a un robot programada para seguir una serie de reglas que dictan su respuesta a su entorno inmediato. El comportamiento de un autómeta es enteramente determinista: observa lo que le rodea, lleva a cabo una computación mental y aplica el resultado un conjunto de criterios que prescriben su siguiente movimiento.

La idea del autómeta como partícula se remonta a la obra del matemático húngaro John von Neumann (1903-1957), que la formuló en la década de 1930 cuando trabajaba en el incipiente campo de los ordenadores. Le interesaba la posibilidad de construir máquinas pensantes que pudieran reproducir e incrementar su complejidad. El matemático polaco Stanislaw Ulam le sugirió un modelo del proceso sencillo y abordable: un universo como un tablero de ajedrez con un autómeta en cada escaque (o celda). Cada autómeta celular puede existir en uno de varios estados distintos, y que elija uno u otro está determinado por los estados del autómeta que se encuentra en las celdas vecinas. Asimismo, se puede pensar en cada autómeta como en una suerte de celda de memoria que contiene información, de igual modo que cada elemento de la memoria de un ordenador puede existir en uno de dos estados binarios, 1 y 0, como un interruptor que deja pasar la corriente o la interrumpe. Von Neumann y Ulam observaron de qué forma ciertas pautas de información podrían duplicarse en la trama.

Se pueden idear todo tipo de juegos que jugar con los autómetas y cada uno de ellos con distintas reglas que especifiquen de qué forma responde un autómeta a sus vecinos. Pero fue muy difícil investigar el mundo dinámico de los autómetas celulares hasta que se inventaron los ordenadores digitales. A finales de la década de 1960, John Horton Conway, matemático de la Universidad de Cambridge, diseñó una especie de juego de ajedrez con autómetas que, con ánimo provocador, llamó el Juego de la Vida. Era un modelo rudimentario de la forma en que proliferan las células y los organismos. Solos mueren, en comunidad prosperan y se multiplican. Pero si la comunidad crece demasiado, fallecen por falta de alimento y recursos. En el Juego de la Vida, cada cuadro puede estar vivo o muerto. Un cuadro vivo sigue vivo si tiene dos o tres cuadros vivos

a su alrededor, si tiene menos o más, muere. Un cuadro muerto resucita (en realidad hay que pensar en cuadros vacíos que son reocupados por autómatas, o “células”) si tiene tres vecinos vivos exactamente.

El Juego de la Vida de Conway es el prototipo para investigar la vida artificial. La pura diversidad de formas y comportamientos de las células vivas del Juego de la Vida es legendaria; en Internet hay varios grupos que se dedican a explorarlos. Algunos grupos se propagan por el tablero, serpenteando como reptiles o planeando como aves. Unos grupos se comen a otros, algunos son el origen de una hilera de grupos nuevos. Es un universo extraño, lleno de riqueza y de sorpresas que surge de unas pocas reglas sencillas sobre las interacciones locales entre células.

Los boides de Craig Reynolds son autómatas que pueden moverse con energía propia y no están confinados en ningún tablero, pero son autómatas igualmente, atados por unas reglas. Constituyen, posiblemente, el primero de tales juegos de vida artificial y reproducen el tipo de fenómenos complejos que observamos en el mundo real. Forman parte de las estrellas eminentes del catálogo de investigación comúnmente agrupado bajo el término “teoría de la complejidad”, cuyo concepto clave es la *emergencia*. Formar bandadas es para ellos un gesto espontáneo, no programado: las reglas que lo permiten sólo atañen a cada autómata individualmente. Y sin embargo, hay algo en la forma de interactuar de esos individuos que les hace formar grupos y seguir una misma conducta. Las propiedades emergentes demuestran que el todo puede ser más que la suma de sus partes.

En este contexto, la “complejidad” se ha convertido en un término que puede significar lo que queramos que signifique. Con frecuencia, tiene poco que ver con la física. La mayoría de las investigaciones que se llevan a cabo al amparo de este término son una especie de ciencia informática empírica: diseñar juegos para autómatas, ponerse a jugar y ver qué ocurre. Por fascinantes que puedan parecer, al final, una gran parte de esos juegos acaban contra un muro, porque no se asientan en ningún concepto. Lo que se acaba consiguiendo es una descripción, quizás una prescripción, pero no una comprensión teórica más profunda. Como señala E. O. Wilson, biólogo de la Universidad de Harvard, “en sí misma, la recurrencia no puede ser ninguna explicación de todo si no contamos con una idea general de la mecánica del sistema”.⁸

Por eso, el de los boides y todos esos otros maravillosos modelos informáticos o modelos de comportamiento animal colectivo, desde las hormigas en el hormiguero hasta los rebaños en los pastos, se habrían quedado en poco más que en juegos de salón de alta tecnología si los físicos no hubieran empezado a percatarse de que, en realidad, no son más que una forma de física estadística del desequilibrio.

FÍSICA DEL MOVIMIENTO COLECTIVO

Tamás Vicsek no había oído hablar de los boides cuando, a principios de la década de 1990, formó equipo con Eshel Ben-Jacob para investigar por qué los bacilos se mueven en círculos. Vicsek, que al igual que Ben-Jacob se había convertido en un experto en el crecimiento y la forma de sistemas en desequilibrio como los grupos ramificados que se forman por agregación por difusión limitada (véase pp. 132-133), se había dado cuenta de que, cualesquiera que fuesen, las normas que dictaban el movimiento de las bacterias que formaban remolinos tenían que ser muy sencillas.

Pero las bacterias no son como las partículas de gas. Y lo que es más importante, son autopropulsadas. Las bacterias queman nutrientes y, para desplazarse, emplean la energía liberada para hacer girar sus flagelos como si fueran hélices –hilos de proteínas que parecen látigos–. Cuando las partículas de gas chocan, obedecen las leyes de Newton y mantienen (más o menos) el impulso; las bacterias pueden violar flagrantemente esas restricciones, deteniéndose o acelerando a voluntad. Esa autopropulsión es lo que hace de una colonia bacteriana un sistema en desequilibrio: mientras las células queman combustible, se alejan de un estado de equilibrio.

En 1994, Vicsek y uno de sus alumnos, András Czirók, diseñaron un modelo para describir el movimiento bacteriano. Trataron cada célula bacteriana como si fuera una partícula autopropulsada, como cualquiera de las danzarinas partículas de gas de Maxwell, pero con su propia fuente de energía para autopropulsarse y con un *programa* de desplazamiento muy sencillo. Ese programa especificaba únicamente que todas las células mantienen la misma velocidad y que cada una de ellas viaja en la dirección que resulta de promediar la dirección de las que están a poca

distancia de ella. Estas normas son similares pero no idénticas a las que gobernaban los movimientos de los boides de Reynolds. Además, Vicsek y Czirók dieron por supuesto que existía un elemento aleatorio en los movimientos bacterianos: las bacterias no seguirían las reglas al pie de la letra, porque la vida real nunca es tan clara y perfecta. Ese azar es una especie de ruido de fondo, como la estática que caracteriza la mala recepción de una radio. Si el ruido es demasiado grande, impide que oigamos la señal, lo cual en nuestro caso significa que el elemento aleatorio del movimiento celular se vería anulado por la tendencia de las células a controlar sus movimientos.

Los investigadores simularon por ordenador los movimientos de sus autómatas bacterianos y, de inmediato, se percataron de que cuando el nivel de ruido es bajo, las células adoptan un comportamiento colectivo: todas se desplazan en la misma dirección. Recordemos que cada célula tiene instrucciones de seguir únicamente el movimiento de sus vecinas más próximas, que las reglas que se les imponen no garantizan que se muevan al unísono como si fueran una sola. A medida que se incrementaba el ruido, el grado de coordinación disminuía. Llegado cierto nivel crítico de ruido, todo viso de cohesión se desvanecía: cada una de las partículas autopropulsadas se desplazaba a su antojo (véase figura 6.3). En este caso, la velocidad media del grupo descendía a cero, puesto que toda célula que se movía en cierta dirección tenía una contrapartida en otra que se movía en la dirección contraria.

Vicsek y Czirók se acordaron del comportamiento de un imán cuando se altera su temperatura. Cuando la temperatura es baja, todos los spins magnéticos señalan en la misma dirección y los campos magnéticos atómicos se suman para crear una magnetización general. Cuando la temperatura es elevada, las agujas señalan en todas direcciones y los campos magnéticos se anulan entre sí; el imán se desmagnetiza. Entre ambos estados —el magnético y el no magnético— hay una transición de fase a temperatura crítica. Las partículas autopropulsadas experimentaban una transición de fase análoga, pasando de estar alineadas a no estarlo; la velocidad media interpreta el papel de la magnetización y el ruido el de la temperatura. De igual forma que el punto crítico del paso de líquido a gas puede ser *cartografiado* en la transición de fase de un imán, los investigadores pudieron cartografiar su modelo de desplazamiento bacteriano de acuerdo a ese fenómeno.

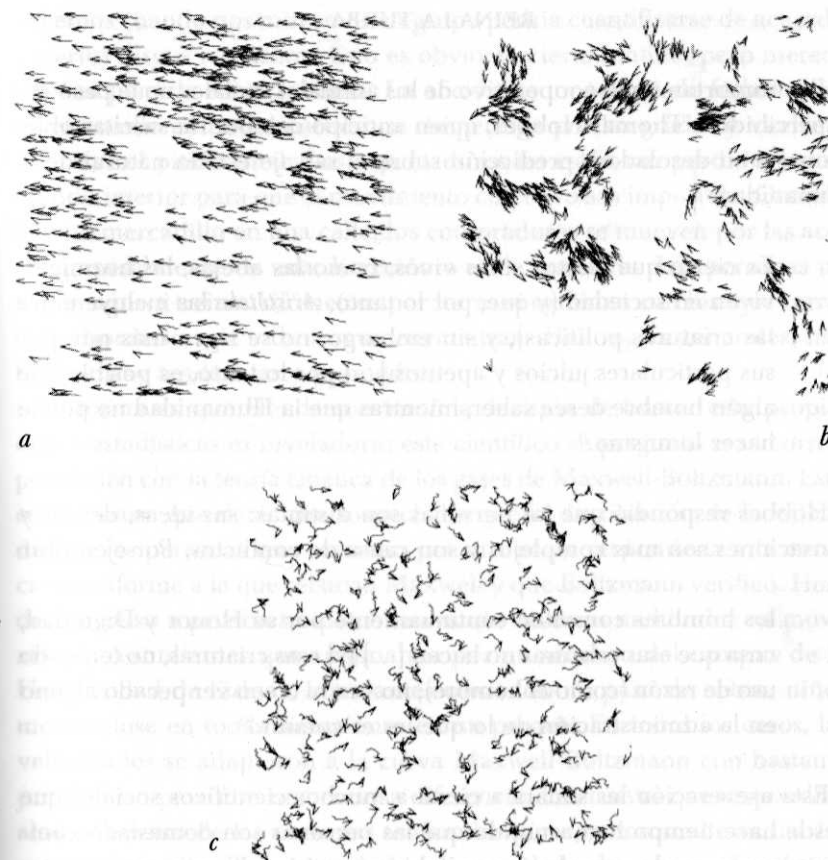


Figura 6.3. Una transición de fase de partículas autopropulsadas. Si el ruido es pequeño, las partículas se alinean (a). Cuando el ruido es mayor, el movimiento las agrupa en grupos pequeños que se mueven al unísono y tienden a desplazarse en remolino (b). Si el ruido excede un valor crítico, los movimientos se vuelven aleatorios (c). La dirección que lleva una partícula aparece aquí señalada en forma de flecha atada a una corta línea que muestra su trayectoria más reciente.

Se trata de algo más que de dibujar una analogía. Pese a algunas diferencias importantes vinculadas al hecho de que el orden de las partículas autopropulsadas es un transición en *desequilibrio*, es posible demostrar formal y matemáticamente, que existe una equivalencia entre los dos procesos. Ambos comparten rasgos “universales”.

REINA LA TURBA

El comportamiento cooperativo de los animales sociales no le pasó desapercibido a Thomas Hobbes, quien anticipó que podría suscitar objeciones a su desoladora predicción sobre el salvaje estado natural de la humanidad:

Es cierto que ciertos seres vivos, como las abejas, las hormigas, viven en sociedad (y que, por lo tanto, *Aristóteles* las incluye entre las criaturas políticas), y sin embargo, no se rigen más que por sus particulares juicios y apetitos [...] por lo tanto, es posible que algún hombre desee saber, mientras que la Humanidad no puede hacer lo mismo.⁹

Hobbes respondió que las personas son distintas: sus ideas, deseos y sensaciones son más complejos y son causa de conflictos. Por ejemplo:

los hombres compiten continuamente por su Honor y Dignidad, cosa que esas criaturas no hacen [...] [y] esas criaturas, no teniendo uso de razón (como el hombre), no ven ni creen ver pecado alguno en la administración de lo que les es común.¹⁰

Esta aseveración les sonará a cierta a muchos científicos sociales que desde hace tiempo han asumido que las personas son demasiado complicadas para ceder a cualquier modelo matemático de comportamiento. Cada uno de nosotros nos movemos llevados por un millar de impulsos fundidos en una mezcla única para cada uno de nosotros. Así que, ¿cuál es el sentido de idealizar la actividad humana?

El objetivo de cualquier modelo físico del tipo de los que he comentado hasta ahora es sacar más de lo que se pone. Yo podría tener la intención de diseñar un modelo de muchedumbre en el que todas las personas siguieran una trayectoria programada y compleja, repleta de paradas súbitas para fijarse en las señales indicadoras o de ralentizaciones para mirar escaparates, pero un modelo así sería muy defectuoso. Obtendría una información muy parecida a la que he introducido.

En 1971, L. F. Henderson, profesor de la Universidad de Sidney, advirtió que, más allá de ese miasma de individualismo, lo que los humanos

hacemos cuando nos movemos en grupo podría cuantificarse de acuerdo a ciertos rasgos *estadísticos*. Esto es obvio en cierto sentido, pero merece la pena ponerlo sobre la mesa. La afición de un equipo de fútbol entra en el estadio antes del partido, se desperdiga por las gradas y vuelve a salir tras el pitido final. Los espectadores no están tan perdidos en su mundo interior para que el movimiento colectivo sea imposible. Cuando hay un mercadillo en una calle, los compradores se mueven por las aceras, generalmente en una dirección o en la contraria. Las personas no viajan a pie a treinta kilómetros por hora, ni caminan con los ojos cerrados, chocando con todo lo que encuentran. Hay reglas generales, hay límites, hay tendencias y promedios.

La forma en que Henderson tomó la decisión de buscar esas propiedades estadísticas es reveladora: este científico se preguntó si se corresponderían con la teoría cinética de los gases de Maxwell-Boltzmann. Esto es lo mismo que decir que sospechaba que la distribución de la velocidad de las personas que caminan por una acera respondería a la curva campaniforme a la que recurrió Maxwell y que Boltzmann verificó. Henderson puso a prueba su idea observando diversas multitudes en movimiento: estudiantes que caminaban por un sendero del campus de la Universidad de Sidney, viandantes cruzando un paso de cebra, niños moviéndose en todas direcciones en un parque. En todos los casos, las velocidades se adaptaron a la curva Maxwell-Boltzmann con bastante precisión... pero con una curiosa diferencia. Las curvas que respondían al movimiento de las personas tenían dos picos, como si al estudiar los gases, Maxwell y Boltzmann hubieran mezclado dos grupos de partículas con velocidades medias ligeramente distintas. Henderson pensó que los dos picos correspondían uno a los varones y otro a las hembras, que, según parece, se mueven igual, pero con diferentes velocidades.

Henderson sospechaba que de las perturbaciones del movimiento de una multitud podrían derivarse los cambios en el estado "global" de la misma:

En un extremo de la calle, la multitud podría verse forzada a amornar el paso, probablemente debido a la necesidad de presentar un ticket en una barrera, y cabía esperar que la gente se aglomerase y tuviera que andar codo con codo y arrastrando los pies. A esta transición se le llamaría transformación de fase: la fase en la

que hay espacio de sobra corresponde a la multitud gaseosa y la fase de aglomeración a la multitud líquida.¹¹

En otras palabras, Henderson previó la transición de fase de las multitudes, que se producía de manera análoga a la licuación de un gas por compresión. Sin embargo, no recogió ninguna observación en ese sentido.

Aunque resultó muy valioso a la hora de establecer la conexión potencial con la física estadística, en el estudio de Henderson no había en realidad nada sorprendente. Cabe esperar que la distribución de velocidades de una multitud responda a una curva más o menos campaniforme —resulta difícil esperar otra cosa—. No todas las curvas campaniformes son matemáticamente idénticas a la curva Maxwell-Boltzmann, pero era poco probable que los datos de Henderson sobre unos cuantos cientos de individuos revelaran las sutiles distinciones que a buen seguro se producían entre ellos. En cualquier caso, ¿no había dicho tiempo atrás Adolphe Quetelet que la curva de error campaniforme era la señal de identidad de la estadística social?

Cuando, a finales de la década de 1980, Dirk Helbing, profesor de la Universidad Georg-August de Gotinga, empezó a pensar en modelos de movimientos de las multitudes, pensó que la descripción “de la cinética de los gases” sería un buen punto de partida. Pero se dio cuenta de que, en realidad, nada decía de las motivaciones de los viandantes: qué intención tenían y cómo respondían a su entorno. Únicamente con la inclusión de esos factores podía un modelo albergar la esperanza de capturar las complejas pautas de movimiento que se desarrollan en las multitudes. Henderson había propuesto que del movimiento de las multitudes podía hablarse como del movimiento de un fluido. Pero en tal caso, se trataba de un fluido con mente propia, un fluido que podía poner en tela de juicio las leyes de Newton parándose en seco o echándose a correr.

Helbing consideró que el movimiento de cualquier individuo estaba condicionado por dos influencias: la interna, u “objetivos e intereses personales”, y la externa, o “percepción de las circunstancias y el entorno”. Con frecuencia ambas entraban en conflicto. Estoy obligado a aminorar el ritmo que llevo habitualmente porque delante de mí hay un grupo que avanza despacio. Quisiera cruzar la calle en diagonal para acercarme a una tienda, pero la gente pasa entre medio. En una calle particularmente atestada, la gente que va detrás de mí impide que me detenga.

Las interacciones con los demás son influencias externas que modifican la conducta. En 1945, la psicóloga Karen Horney identificó tres formas de interactuar de la gente: “moverse hacia los demás”, “alejarse de los demás” y “moverse contra los demás”. Aquí, ese “moverse” tiene que entenderse como metáfora, pero también podría interpretarse en sentido literal. Las personas que caminan con amigos, compañeros o miembros de su grupo tienden a permanecer juntas; en un cóctel y a causa de su magnetismo personal (o fabricado), los famosos atraen a una legión de admiradores y sicofantas. Pero en la mayoría de las multitudes, las personas no se conocen entre sí y, por tanto, no tienen tendencia a permanecer juntas. Por el contrario, intentan guardar distancias con los extraños. Esas interacciones parecen fuerzas de atracción y repulsión. (El “moverse contra” es un caso bastante especial: Karen Horney pensaba en la obstrucción deliberada, motivada por la agresión y el conflicto. Ocurre dentro de ciertas dinámicas, pero es raro que normalmente se produzca.)

El psicólogo social estadounidense Kurt Lewin se percató de que las interacciones de atracción y repulsión que esbozó Karen Horney tenían una aplicación muy amplia. En la década de 1950, Lewin postuló que podría existir una analogía entre las fuerzas electromagnéticas que actúan sobre las partículas con carga eléctrica y las presiones sociales que determinan la conducta de las personas. Según Lewin, podía considerarse que los individuos se “movían” en un campo abstracto de ideas, creencias, hábitos y nociones. Para cada persona, ese campo está condicionado por el comportamiento que ve en otros y que empuja y tira de la persona hacia ciertas predisposiciones.

Esto se parece mucho al equivalente moderno de la visión mecanicista de la humanidad de Hobbes. Motivado por la idea de “fuerzas sociales” de Hobbes, Dirk Helbing y su compañero de la Universidad de Stuttgart, Péter Molnár, desarrollaron un modelo matemático del movimiento de los viandantes basado en la física. Por supuesto, una cosa es especular sobre las “fuerzas” entre las personas y otra muy distinta cuantificarlas en ecuaciones matemáticas como las que se emplean para el electromagnetismo y la gravedad. Pero eso precisamente es lo que hicieron Dirk Helbing y Péter Molnár.

Supusieron que los viandantes simplemente pretenden moverse en una dirección particular y a cierta velocidad. Este impulso se ve atemperado

por diversos factores externos, el más importante de los cuales es el deseo de evitar los choques –en realidad, acercarse demasiado a otros para poner en peligro su “espacio personal”–. Por lo tanto, en el seno de una multitud, las personas se conducen como si entre ellas existiera una fuerza de repulsión que incrementa su fuerza a medida que la distancia entre dos personas disminuye. Las modernas teorías sobre los líquidos aluden a una *suave* repulsión similar entre las partículas, una repulsión que en principio es muy pequeña pero aumenta rápidamente cuando las partículas se aproximan entre sí. Recordemos que la teoría de los fluidos de Van der Waals incluía implícitamente una fuerza de repulsión “dura” que sólo aparecía cuando dos partículas chocaban.

La teoría de Van der Waals también tenía en cuenta las fuerzas de atracción entre las partículas. Cuando querían investigar ciertas situaciones especiales entre las personas, como la cohesión de un grupo, Helbing y Molnár incluían en su modelo fuerzas de atracción entre personas, pero, en caso contrario, sus viandantes compartían la aversión a estar cerca. Esos viandantes no son como los boides ni como las bacterias autopropulsadas de Vicsek porque no poseen ninguna tendencia a unificar sus movimientos ni, por tanto, a formar bandadas cohesionadas ni nada parecido.* En vez de ello, cada individuo –al que, tomando prestado el término de la canción “Diamond Dogs”, de David Bowie, podemos llamar un “peoploid” o *gentoide*– traza su propio camino, sujeto a las restricciones que los demás viandantes le imponen.

En este sentido, el modelo vale para personas egocéntricas sin ninguna cortesía ni gentileza social. Y sin embargo, cuando Dirk Helbing y Péter Molnár pusieron en marcha sus simulaciones por ordenador, se percataron de que ciertas dinámicas de grupo emergían simultáneamente. Y se diría que algunas de esas dinámicas incluso podrían pasar por buen comportamiento. Por ejemplo, los gentoides que caminan en direcciones

* Por supuesto –y como veremos más adelante–, a veces, un colectivo se comporta casi como una manada. Es lo que sucede, por ejemplo, en los estadios de fútbol cuando el público hace “la ola”, que se puso de moda en el Mundial de México de 1986. Los espectadores se ponían de pie y levantaban los brazos y luego volvían a sentarse, en una ola que recorría rápidamente todo el estadio. Helbing, Vicsek y su compañero Illés Farkas han confeccionado un modelo para esas olas y suponen que los espectadores pasan por tres estados: de excitación (al prepararse para la ola que llega), activo (al levantarse) y pasivo (cuando ya han hecho su parte y vuelven a sentarse). El modelo puede consultarse en <http://angel.elte.hu/wave>. Las olas que genera este modelo son prácticamente análogas a ondas coordinadas del tejido cardíaco que hacen que el corazón lata.

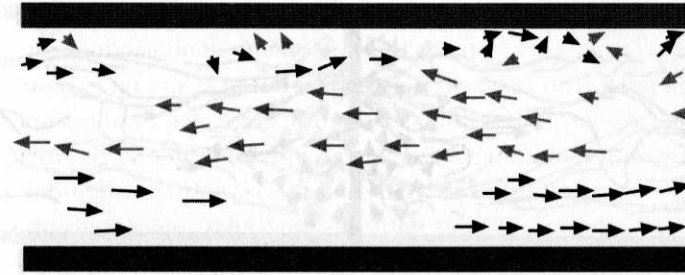


Figura 6.4. Según el modelo de Helbing-Molnár, en una calle estrecha, los viandantes se organizan en dos corrientes opuestas. Cada línea de la ilustración muestra la trayectoria de una partícula *gentoide* a lo largo de varios pasos. Las partículas negras y las grises se mueven en direcciones opuestas. Las simulaciones de este modelo pueden consultarse en la página web <http://www.helbing.org/pedestrians/corridor.html>

opuestas por una calle estrecha tienden a organizarse en corrientes contrapuestas, lo cual reduce la necesidad de maniobras para evitar colisiones (véase figura 6.4). Es algo que ocurre con frecuencia en la vida real. Los obstáculos, como columnas o árboles situados en el centro de una avenida, pueden reforzar esa forma de transitar incluso cuando nada específica por dónde hay que pasar. Las dos líneas se organizan espontáneamente, aunque es cuestión de puro azar en qué dirección va cada cuál.*

Cuando dos corrientes de gentoides tratan de pasar en direcciones opuestas por una puerta, lo hacen por grupos, primero pasa un grupo de un lado y luego un grupo del otro (véase figura 6.5). Los grupos *toman* temporalmente la puerta: un valiente pasa primero en una dirección y, a continuación, otros siguen su estela. En ese momento el otro

* Esto puede no ser del todo cierto en la práctica porque, normalmente, la gente prefiere rodear los obstáculos –y a los demás– por un lado que por otro. Esta preferencia está determinada culturalmente: en Alemania, por ejemplo, lo normal es elegir la derecha. Al parecer, es un hábito adquirido, porque los niños (y los turistas) no suelen tenerlo. El aprendizaje es subconsciente, pero beneficia a todos, porque reduce el riesgo de choques entre dos viandantes que se aproximan de frente. Entre los adultos, no hay duda de que lo que hagan en una calle estrecha o en un pasillo viene también condicionado por los hábitos adquiridos al conducir.

Helbing y Kai Bolay, una de sus colaboradoras, han sido capaces de estimular este proceso de aprendizaje y han observado que si a los viandantes se les permite adaptar su comportamiento para evitar choques, desarrollan cierta preferencia por pasar junto a otro por un lado en particular (pero determinado arbitrariamente).

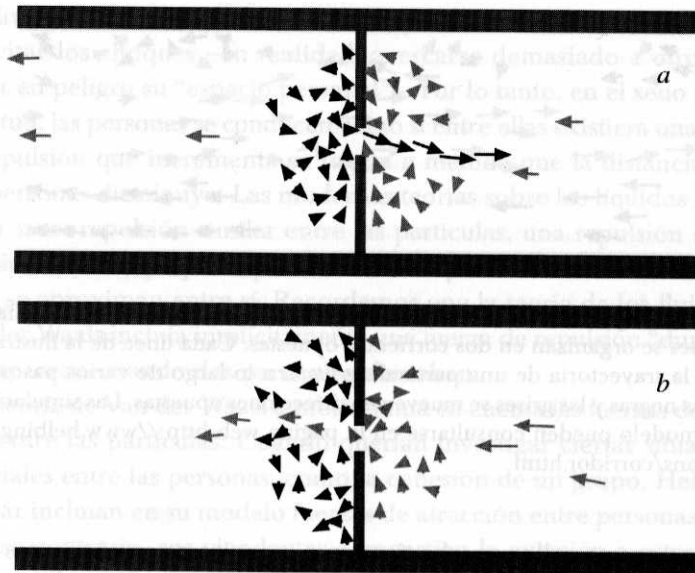


Figura 6.5. Las personas pasan por una puerta en grupos alternos que permiten el paso primero en una dirección (a) y luego en la otra (b). Las flechas indican la dirección del movimiento; su longitud es proporcional a la velocidad de la persona. Las simulaciones pueden verse en <http://www.helbing.org/pedestrians/door.html>

grupo parece retroceder para dejar pasar al primero, pero esta aparente cortesía sólo es el resultado de su deseo de evitar el contacto directo.

Este modelo puede aprovecharse para mejorar las calles peatonales a fin de reducir las incomodidades, la congestión y demás inconveniencias. Dividir un pasillo con columnas puede ser un modo de mejorar la circulación. Para evitar los cuellos de botella que se forman en las puertas se puede pensar que bastaría con hacer la puerta más ancha, pero no es tan sencillo; con una puerta más ancha, simplemente, lo que sucede es que el paso en una y otra dirección se alterna con mayor frecuencia. Mejor solución es poner dos puertas. Incluso aunque no se especifique cuál hay que utilizar según la dirección en que se avance, una multitud se organizará automáticamente en dos corrientes opuestas para pasar cada una por una puerta (véase figura 6.6). Dos puertas son, por tanto, más eficaces que una sola puerta aunque ésta tenga la misma anchura que la suma de las dos.

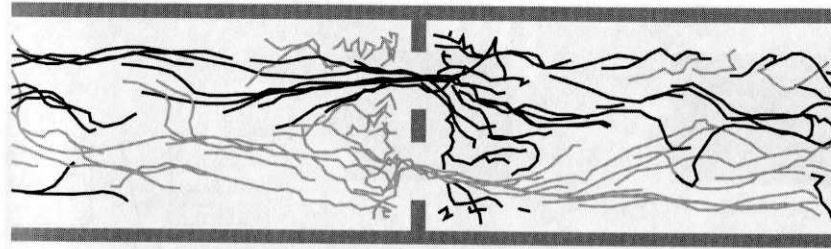


Figura 6.6. Si hay dos puertas, una servirá para las personas procedentes de un lado y la otra para las del otro lado, aunque ni siquiera esté indicado qué puerta corresponde a qué lado. En este caso, la ilustración no refleja instantáneas, como en las figuras 6.4 y 6.5, sino las trayectorias, en negro y en gris, de los caminantes a lo largo de varios pasos consecutivos.

Las intersecciones son especialmente delicadas. En las simulaciones, la circulación por ellas nunca se estabiliza, hasta el punto de que los choques y los atascos se minimicen. Pero con frecuencia se producen soluciones temporales de forma que el tráfico peatonal circula en una dirección o en la otra (véase figura 6.7a). Una buena planificación puede ayudar a que surja la organización del tráfico más eficiente. Un obstáculo en el centro de la intersección, por ejemplo, puede bloquear las rutas que impiden la circulación. Unas barreras oblicuas, por ejemplo, guían al viandante, estabilizando el tráfico en una dirección determinada, especialmente si se complementan con unas señales que le orienten hacia uno de los lados del pasillo o calle estrecha (véase figura 6.7b).

En 1997, Dirk Helbing y Péter Molnár se unieron en Tubinga a Joachim Keltsch, un científico informático, y utilizaron su modelo de circulación de viandantes para deducir cómo evolucionan orgánicamente los senderos en espacios abiertos sobre los que caminan las personas. Cuando cruzamos un prado o un parque, tenemos tendencia a seguir la senda que ya han hollado innumerables pies antes que los nuestros, por mucho que la ruta no sea la más directa. ¿Por qué? Tal vez porque es más fácil caminar sobre el suelo despejado que sobre la hierba. Es posible que oigamos la misma voz autoritaria que en nuestra infancia nos impelía a no apartarnos del camino (por mucho que éste sea el arbitrario testimonio de otros caminantes que pasaron por allí antes que nosotros). En realidad, las razones no importan, lo que cuenta es que es así.

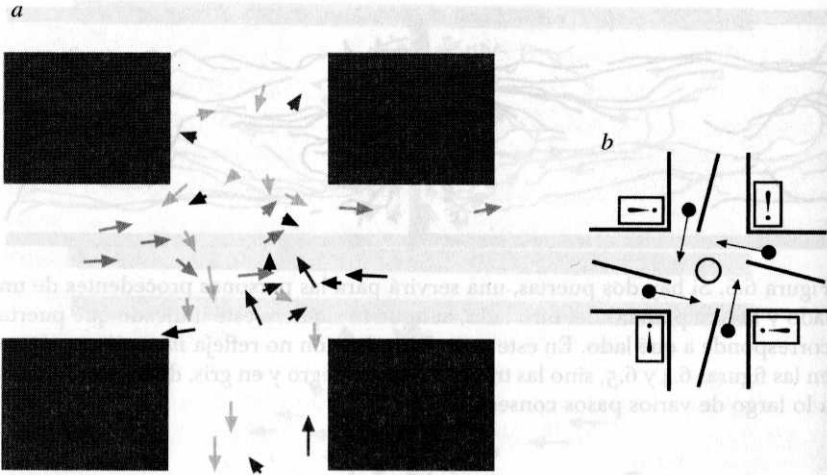


Figura 6.7. En las intersecciones, los desplazamientos de los viandantes suelen consolidarse temporalmente en una forma circulante que reduce las posibilidades de choques y obstrucciones (a). Aquí las flechas tienen distintos sombreados dependiendo de la procedencia: cada persona trata de cruzar la intersección hacia el lado contrario. Puede mejorarse la circulación en las intersecciones por medio de obstáculos y señales (en la ilustración indicadas así: “!”) diseñados para guiar la trayectoria de las personas que pasan por ellas.

Pero, antes de nada, ¿cómo ha llegado a existir ese sendero? Antes de que la gente empezara a cruzarlo, el prado estaba totalmente cubierto de hierba. Sin duda, los primeros pioneros tenían destinos diversos. La red de senderos que Dirk Helbing y su equipo observaron en el campus de la Universidad de Stuttgart reveló diversos puntos de entrada y salida definidos por los diversos edificios universitarios que rodean el césped. Pero los senderos no siguen el camino más corto entre esos puntos (véase figura 6.8).

Los senderos se forman a partir de las huellas de cada uno de los caminantes que cruza el espacio en cuestión. Los investigadores simulon esto en su modelo, asumiendo que cada gentoide que cruza un espacio erosiona un poquito la hierba. Pero la hierba vuelve a crecer a un ritmo constante, así que los senderos que nadie utiliza por algún tiempo, acaban por desaparecer. Cuanto más despejado está un sendero, más tentador es para los caminantes que lo hollan, quienes, según el modelo, se



Figura 6.8. Los senderos que se forman espontáneamente en un espacio abierto de la Universidad de Stuttgart. Advértase la falta de intersecciones en ángulo recto. Ningún sendero representa la ruta más directa entre dos puntos de entrada o salida.

ven atraídos por uno o por otro dependiendo de la distancia a la que se encuentren de él y de su visibilidad.

Helbing y su equipo dejaron suelto a un grupo de gentoide para que cruzara un espacio abierto: todos iban de y se dirigían a algunos destinos de la periferia. Observaron que los senderos que surgían dependían de hasta qué punto los gentoide se sintieran atraídos por los senderos existentes. Al principio, las personas se limitaban a abrir una ruta bastante directa al punto que les interesaba (véase figura 6.9a). Si la atracción era pequeña, las rutas directas persistían y se convertían en senderos muy hollados, pero si la atracción era apreciable, las rutas directas se convertían en otra cosa: una red de senderos que representa una solución intermedia entre el camino más recto y la tendencia a avanzar por los senderos ya existentes (véase figura 6.9b). En este caso, las trayectorias diagonales entre dos esquinas opuestas y las rutas que siguen el *borde* entre esquinas contiguas se convierten en senderos suavemente curvados que apartan a los caminantes de su camino sólo ligeramente. Nadie pasa por

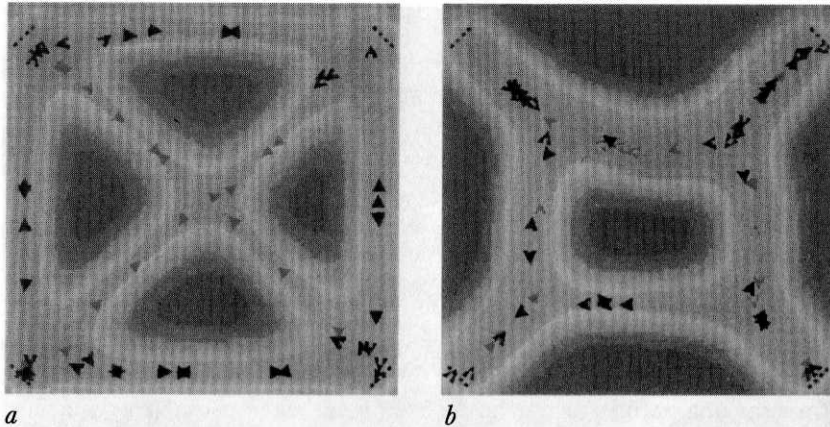


Figura 6.9. El modelo desarrollado por Helbing y sus compañeros simula la forma en que evolucionan los caminos. En las primeras etapas (a), los caminantes siguen rutas bastante directas. Al final (b), se llega a una solución de compromiso entre las rutas “más directas”.

el centro: los senderos se cruzan para dejar una isla central, igual que sucede en la vida real (véase figura 6.8).

Los arquitectos de parques y jardines suelen inclinarse por el pensamiento lineal: trazan caminos en línea recta con intersecciones en ángulo recto. Por el contrario, los caminos que se forman de manera natural –los que, en la jerga del campo, están *auto-organizados*– se curvan y se mezclan con más suavidad. Debido a esta diferencia, los caminos trazados en espacios verdes abiertos se ven con frecuencia ensanchados y subvertidos por nuevos caminos que son hollados donde las personas han seguido sus instintos. En un parque de Stuttgart, Molnár advirtió los fútiles intentos de los funcionarios de parques por cubrir esos caminos y recuperar los originales, los que el arquitecto había proyectado. Sin embargo, sin que mediara rebelión concertada alguna, los caminantes no tardaron en recuperar sus trayectorias preferidas.

Cuán más efectivo habría sido que los arquitectos hubieran anticipado los deseos de los caminantes y trazado los caminos en consonancia. Un modelo como el de Helbing y Molnár les podría ayudar precisamente a eso, dando lugar a rutas naturales y cómodas. Es muy sencillo, afirma Dirk Helbing, adaptar el modelo a, por ejemplo, las limi-

taciones presupuestarias sobre la longitud total de los caminos a fin de lograr la mejor solución intermedia entre economía y eficiencia, o calcular el mejor modo de ampliar los caminos que ya existen. Así, la planificación puede adaptarse a la naturaleza humana.

EL LENGUAJE DEL ESPACIO

En los espacios abiertos, los caminantes tienen la libertad de ignorar los senderos oficiales y decidir colectivamente su propio camino. En una ciudad o dentro de un edificio eso rara vez es posible: no se puede atravesar una pared por mucho que se quiera. ¿Es posible proyectar los espacios urbanos y arquitectónicos de modo que se adapten a las necesidades e impulsos humanos en lugar de hacer todo lo contrario?

El geógrafo Michael Batty y sus compañeros del University College de Londres han recogido un modelo que simula la forma en que los visitantes circulan por la Tate Gallery, un museo de arte (ahora llamado Tate Britain) de la capital británica. Compararon los resultados con su observación de los desplazamientos reales de los visitantes un día concreto de agosto de 1995. Los visitantes tendían a circular entre las salas dedicadas a las colecciones clásicas y británicas, situadas a la izquierda del eje central de la galería, que preferían a las salas de la izquierda, donde se encuentra la colección de arte moderno. ¿Era eso debido a que los visitantes preferían el arte clásico y el nacional al moderno? En absoluto, afirmaron los investigadores. Las simulaciones en las que todas las salas de la galería ejercían una *fuerza de atracción* equivalente daban como resultado la misma asimetría entre la izquierda y la derecha, lo cual supone que la trayectoria parecía dictada por la disposición de las salas: la planta de la parte moderna es más intrincada. En otras palabras, lo que los visitantes ven en la galería depende no sólo de qué tipo de arte prefieren, sino, también, de la disposición de las salas. El diseño de la planta de la Tate Britain influía de forma decisiva en la experiencia de los visitantes de una forma que quienes la habían diseñado no habían previsto.

Bill Hillier, urbanista que, además, trabaja en el University College, cree que existe una especie de lógica –una “sintaxis”– en la forma en que la gente se relaciona con el espacio y *navega* por él. Hillier y su equipo han empleado modelos informáticos para estudiar la forma en que utiliza y

se mueve por un entorno construido en diversas escalas, que van de una sola sala a varias ciudades. Sus hallazgos han servido para proyectar interiores de tiendas y centros comerciales, galerías y museos, edificios comerciales, hospitales, colegios, aeropuertos y estaciones de ferrocarril. Esos modelos pueden aportar un diagnóstico a los problemas que surgen en calles que ya existen y en la disposición de los edificios.

Pero el mayor reto es averiguar las *reglas* –la sintaxis del espacio de Bill Hillier– que rigen las trayectorias de las personas que utilizan esos lugares. Hillier cree que la línea de visión desempeña un papel significativo en este lenguaje visual del espacio. Si ese lenguaje puede en verdad decodificarse, podría servir para programar las motivaciones de los gentoides de Dirk Helbing a fin de permitirles formas todavía más realistas de moverse en el espacio, lo cual facilitaría hacer predicciones aún más acertadas sobre la organización del espacio más satisfactoria para la gente.

Hasta ahora, los sectores peatonales de los nuevos espacios urbanos han sido planificados siguiendo una mezcla de intuición y modernas ideas arquitectónicas que impone una estética arbitraria en lugares en los que las personas tienen que vivir. Bill Hillier y su compañera Julienne Hanson afirman que, si bien en los entornos urbanos tradicionales los peatones siguen distintas pautas de desplazamiento, en las zonas de nueva construcción la utilización del espacio suele ser más aleatoria: los peatones parecen –y probablemente lo estén– confusos, perdidos. Serán pocos los habitantes de alguna ciudad moderna a los que les cueste pensar en lugares así, en lugares en los que el diseño no case con la forma en que, de forma instintiva, nos desplazamos y reaccionamos en los espacios abiertos.

En el barrio londinense de Elephant and Castle, que está cerca de donde yo vivo, hay una zona de bloques de cemento construida en la década de 1950. Cuando se edificó la tenían por un proyecto modélico, un ejemplo brillante de cómo se podía alojar con eficiencia y comodidad a un gran número de personas. Las tiendas y los centros comunitarios se incorporaron a los edificios, había puentes para que los peatones cruzasen las calles a salvo del tráfico que circulaba por debajo. Pero muchas de esas tiendas llevan años cerradas y han demolido los puentes, que constituían una conveniente vía de escape para los atracadores. Por supuesto, la raíz de los problemas de la zona no está únicamente en

un defecto del diseño arquitectónico, pero no hace falta pasar mucho tiempo allí para darse cuenta de que no es un buen diseño para vivir, para que uno se sienta parte de una comunidad.

Es un lamento antiguo y familiar y, en realidad, ya hemos aprendido algunas de las saludables lecciones que nos dejó la arquitectura de posguerra. Sin embargo, Bill Hillier y Julienne Hanson sostienen que esa planificación defectuosa tiene otras consecuencias. El diseño urbano, afirman, es una manifestación política: “Los sueños de orden social del siglo XIX, en el que los beneficios del capitalismo son retenidos con la creación de una clase trabajadora aquiescente, se sueñan en una forma poderosamente espacial”.¹² En otras palabras, las comunidades urbanas fueron rediseñadas en la época victoriana para reproducir y reforzar las jerarquías sociales. Con el desarrollo de modelos matemáticos e informáticos de las pautas espaciales de diversas comunidades, que van desde pueblos muy viejos a ciudades modernas, Bill Hillier y Julienne Hanson han demostrado que la urbanización tendió a aumentar y diversificar las interacciones hasta que, con la Revolución Industrial, se introdujeron nuevas plantillas. Tanto si se hizo de forma consciente como si no, lo cierto es que esas plantillas redujeron los encuentros sociales y fragmentaron las comunidades, desalentando la actividad colectiva y fomentando la pasividad de las personas ante una autoridad impuesta. Los bloques altos, por ejemplo, compactan los espacios habitables al tiempo que reducen la frecuencia de los encuentros que generan una sensación de solidaridad social. “Es un error afirmar que los bloques de pisos no han cumplido sus propósitos –sostienen Hillier y Hanson–. Para su objetivo tácito de reducción de la comunidad, su éxito es extraordinario”.¹³ La solución *light* de crear ciudades-jardín en las que los espacios urbanos se dividen en zonas pequeñas y relativamente aisladas parece más benigna, pero depara el mismo resultado.

Si Bill Hillier y Julienne Hanson tienen razón, los obstáculos a un diseño urbano más natural no los erige la simple ignorancia respecto a la forma en que las personas empleamos el espacio. No obstante, cuanto más capaces seamos de comprender y predecir la forma en que, instintivamente, deseamos movernos por nuestro entorno y cuanto mejor podamos dar forma a los diversos movimientos de personas que esos espacios han de acomodar, mayores probabilidades tendremos de construir lugares en los que las personas se sientan relajadas, cómodas y tratadas con consideración.

SALIDA RÁPIDA

El 28 de noviembre de 1942, el Coconut Grove, un club nocturno de Boston, estaba a rebosar. Los soldados estadounidenses exprimían al máximo su permiso, y el jazz y la cerveza les ayudaban a olvidar durante unas horas la guerra que sacudía el mundo. Y entonces se inició el incendio. Sólo había una salida y todo el mundo corrió hacia ella. Pero los primeros que llegaron a las puertas se dieron cuenta de que abrían hacia dentro. Antes de poder abrirlas, los que iban llegando apretaron con tanta fuerza a los primeros que fue imposible abrir. No había salida. En medio del pánico y del humo, nadie pudo decirles nada a los de atrás, que trataban de avanzar desesperadamente. En el incendio murieron cuatrocientas noventa y dos personas.

El 15 de abril de 1989 en Sheffield, Inglaterra, los aficionados llenaron las calles que rodean el estadio de Hillsborough desesperados por entrar y ocupar sus localidades para ver la semifinal de la Copa Inglesa que enfrentaba al Liverpool y al Nottingham Forest. El paso constante de seguidores a través de los tornos no sirvió para impedir las aglomeraciones, así que, diez minutos antes del comienzo del partido, la policía decidió abrir una puerta de salida. La subsiguiente avalancha en las gradas empujó a los aficionados de la parte delantera contra las vallas que impedían el acceso al terreno de juego, contra las que murieron aplastadas noventa y seis personas.

A primera vista se diría que la predicibilidad se desvanece cuando el pánico sacude una multitud. Las medidas de seguridad que se toman dando por hecho que la gente las va a aprovechar de un modo racional pueden volverse inútiles muy rápidamente cuando tienen que contener una horda aterrorizada. ¿Qué esperanzas hay de anticipar la conducta humana en esas situaciones? Pero irracional no es lo mismo que impredecible. Más bien al contrario. Porque una multitud presa del pánico sólo tiene un objetivo en mente: escapar lo más rápidamente posible. El miedo, sin embargo, no es la única causa de las avalanchas. En algunos conciertos, la precipitación con la que algunos buscan sitio se ha saldado con muertos y heridos graves como, por ejemplo, sucedió en 1979 en Cincinnati, en un concierto de The Who en el que fallecieron once personas.

En 1999, Dirk Helbing viajó a Budapest para trabajar con Tamás Vicsek. Querían usar el modelo para los humanos del primero para

estudiar la formación de los senderos frecuentados por animales, pero Vicsek tenía la sensación de que aún quedaban cosas por aprender de ese modelo acerca de las multitudes. Los investigadores se percataron de que si los desplazamientos de las personas se volvían demasiado erráticos (demasiado *ruidosos*), podría producirse un atasco en un pasillo o corredor estrecho. Visto como problema de la física, éste es un resultado ilógico. Hacer que los movimientos de los gentoides sean más erráticos es como elevar la temperatura de un grupo de partículas, hacer que el frenesí de sus movimientos aumente. Y sin embargo, la consecuencia es que la multitud se “congela”. En otras palabras, la gente *fluida* puede congelarse al *calentarla*, mientras que un fluido normal como el agua se congela al enfriarlo.

Tamás Vicsek advirtió que la aglomeración de una multitud sobreexcitada se asemeja mucho a los efectos del pánico. De modo que él, Dirk Helbing e Illés Farkas, un compañero de Vicsek de la Universidad de Eötvös de Budapest, empezaron a utilizar el modelo de desplazamiento de los caminantes para estudiar lo que ocurre cuando una multitud pierde el control. Según su razonamiento, el pánico y el movimiento normal se diferencian por algo en particular: las personas pierden sus inhibiciones y se tocan. Hasta tal punto es así en realidad, que la presión puede poner en peligro la vida. Se ha constatado que la fuerza de una multitud puede derribar muros y doblar obstáculos de acero. Eso no significa que la natural aversión de las personas al contacto físico desaparezca, sino que ya no domina sus desplazamientos. Cuando las personas se tocan, sus movimientos se restringen. En una multitud densa y compacta, pasar entre los demás o girar sobre uno mismo puede resultar imposible. Hay entre la gente una especie de rozamiento que dificulta el movimiento.

De modo que los investigadores añadieron a sus gentoides la propiedad del rozamiento, como si fueran bolas de billar envueltas en papel de lija. Además, incluyeron otro ingrediente un tanto sombrío. Cuando la presión sobre una persona era demasiado grande, el infortunado individuo era incapaz de moverse o resultaba lesionado. Por supuesto, esto sólo sirve para empeorar las cosas, porque el lesionado se convierte en un obstáculo para el movimiento de los demás. Calculando el nivel de presión que puede producir una lesión, los investigadores esperaban obtener alguna indicación de cómo y cuándo aparecen las víctimas en las multitudes compactas.

Hay ciertos experimentos que sólo deben hacerse por ordenador y encender una hoguera en una habitación abarrotada es uno de ellos.* Helbing y sus compañeros metieron a un grupo de gentoides en una sala que sólo tenía una salida y les dieron un buen motivo para escapar: un fuego que se acercaba desde la pared opuesta. Si los gentoides son capaces de controlar el miedo y de moverse con calma –a menos de un metro y medio por segundo– entonces son capaces de evacuar la sala en orden. Aglomerados en torno a la puerta, se conceden los unos a los otros espacio suficiente para permitir el paso de un flujo continuo de ellos.

Si los gentoides intentan moverse a mayor velocidad, el resultado da escalofríos. Al converger en la puerta, se aprietan los unos contra los otros y el rozamiento les impide moverse. Los gentoides se quedan pegados hombro con hombro, incapaces de pasar a través de la puerta aunque esté abierta. La multitud es presa del pánico y se embotella (véase figura 6.10a).

Ese embotellamiento recuerda a otros: los granos de sal se quedan pegados pese a que ningún grano es mayor que los agujeros del salero. Debido a la fricción mutua, los granos forman arcos por encima de los agujeros que los mantienen unidos bajo su propio peso. En un choque de gentoides, esos arcos pueden llegar a romperse porque todo individuo tiene la facultad de seguir moviéndose, pero su repetida formación y derrumbamiento significa que los gentoides dejan de pasar regularmente por la puerta. En vez de ello, salen esporádicamente, por grupos, con lo cual, la evacuación es muy poco eficiente.

Así, aunque cada uno de ellos está programado para moverse más deprisa, el resultado final es que la habitación se vacía más lentamente. Ese estado de pánico aparece en una transición bastante brusca una vez que los gentoides tratan de moverse a más de un metro y medio por segundo. A velocidades más bajas, el tiempo que se tarda en vaciar la habitación es menor cuanto mayor es la velocidad; a velocidades más altas, ese tiempo aumenta paulatinamente cuanto más deprisa quieren salir los gentoides

* Los investigadores de la Universidad de Filipinas han llevado a cabo tests en el mundo real de modelos de huida en situaciones de pánico: observando cómo nadan unos ratones buscando un lugar seguro a través de una puerta en una cámara inundada. Advirtieron formas de comportamiento similares a las que se habían producido en sus modelos informáticos, muy parecidas a las del modelo desarrollado por Helbing, Farkas y Vicsek. En particular, a causa de la aglomeración ante la puerta, la huida de los ratones podía ser esporádica e ineficaz.

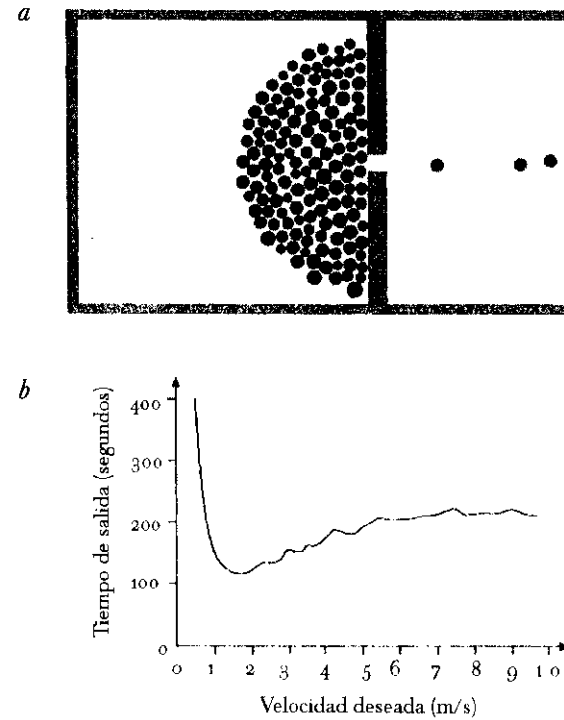


Figura 6.10. Cuando las personas tratan de abandonar demasiado rápido una habitación llena de gente, se empujan entre sí y se atascan en la puerta de entrada. Éste es un estado de pánico (a). El tiempo que toma inicialmente vaciar una habitación llena de gente decrece si las personas se mueven más rápido. Sin embargo, más allá de un cierto umbral de velocidad correspondiente a la aparición de un estado de pánico, el tiempo de vaciado se incrementa a medida que las personas intentan ir más rápido (b). Véase *Pedestrian Simulations* en <http://angel.elte.hu/panic>

(véase figura 6.10b). Cuanto más rápido más lento. Es como si hubiera una especie de transición de fase de desequilibrio entre un estado de pánico y un estado relajado. En cuanto la velocidad deseada supera los cinco metros por segundo –un paso de carrera–, las presiones de la zona atascada se vuelven tan grandes que los gentoides sufren daños.* El número

* La aparición del daño depende del tamaño de la multitud: ocurre a velocidades más bajas si la multitud es mayor.

de lesionados aumenta de forma constante con la velocidad. En tal caso, más rápido significa no sólo más lento sino más peligroso.

Para empezar, muchos clubes nocturnos son oscuros y en cuanto el humo empieza a llenar una sala, se hace imposible divisar algo más allá de un metro. En estas condiciones, la gente ni siquiera sabe en qué dirección correr. Dirk Helbing y sus compañeros se preguntaron qué podría ocurrirles. Es posible que el instinto te impulse a echar a correr a lo loco en busca de una salida, pero si ves que varias personas corren en cierta dirección, puedes deducir que saben algo que tú no sabes. Existe una tendencia natural a seguir a la multitud como las ovejas a su rebaño. Los investigadores dieron por supuesto que la gente buscaría vías de escape con una mezcla de comportamiento individualista (aleatorio) y de rebaño (colectivo).

Cierto espíritu gregario, observaron, es bueno. Abunda en el éxito: cuando alguien encuentra una salida, es probable que otros lo sigan. Es un efecto reforzador: cuantas más personas se desplacen hacia algún lugar, más inclinadas se sentirán otras a seguirlas. Pero un espíritu demasiado gregario anuncia problemas. Casi todo el mundo puede dirigirse a una sola salida y olvidarse de buscar otras aunque sepa que las hay. Dirk Helbing y sus compañeros añadieron el elemento gregario a sus simulaciones, de igual forma que Vicsek permitió el agrupamiento de sus partículas autopropulsadas: los gentoides tienen tendencia a seguir la dirección medio del grupo que los rodea.

A medida que el espíritu gregario se incrementa (cosa que podría ocurrir cuando el pánico aumenta), los gentoides de una habitación con varias salidas invisibles empiezan a salir más eficientemente porque son capaces de capitalizar el hecho de que un individuo haya encontrado una salida. Pero cruzado cierto nivel de gregarismo, el efecto se invierte. Una sola salida se atasca con los individuos que han seguido a la mayoría, al tiempo que otras salidas apenas se usan o ni siquiera las encuentran. El uso más eficaz de las salidas, por lo tanto, ocurre a un nivel óptimo de gregarismo: demasiado o demasiado poco y las salidas se usan mal.

Para los técnicos en seguridad, se trata de resultados reveladores. Con frecuencia, afirma Dirk Helbing, las medidas de seguridad se toman de acuerdo a la suposición de que todas las puertas se utilizan de manera uniforme. Los técnicos toman nota del ritmo al que sale la gente por una puerta y, basándose en él, calculan cuántas puertas hacen falta en

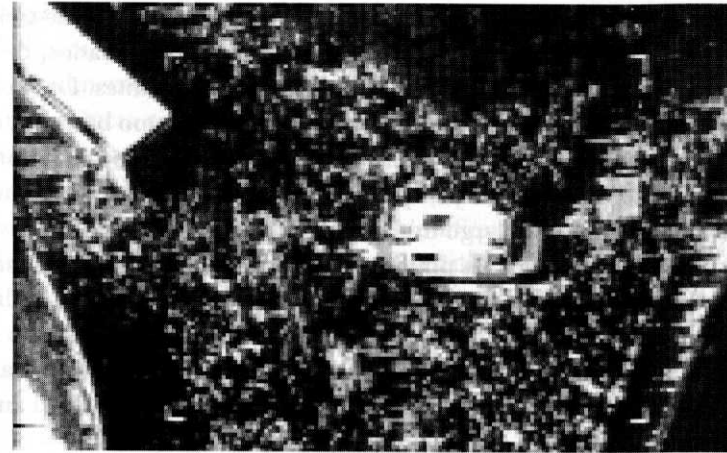


Figura 6.11. Una ambulancia intenta abrirse paso a través de la multitud en el carnaval de Notting Hill, Londres, 2001.

una sala de una determinada capacidad. Se trata a la multitud como si fuera agua que fluye a través un cedazo: por cada salida pasa la misma cantidad de material. Pero si las puertas no se utilizan de manera uniforme a causa del pánico, este cálculo puede subestimar muy seriamente cuántas salidas se necesitan. Una simulación de gentoides presa del pánico podría ser una manera mucho mejor de deducir cuánto tiempo tardará en evacuarse el edificio en cuestión.

Michael Batty ha demostrado de qué forma podrían aprovecharse los modelos de conducta de los viandantes para evitar el tipo de dinámica incontrolada y peligrosa que se advierte en esas simulaciones de pánico. Sus compañeros y él han simulado la distribución y los movimientos de la multitud durante el carnaval londinense de Notting Hill, acontecimiento anual de dos días de duración que congrega hasta a un millón de personas en un pequeño barrio (3 km²) del noroeste de Londres. El carnaval plantea enormes problemas de seguridad: en 2001 se produjeron más de quinientos accidentes, un centenar de los cuales requirió tratamiento hospitalario. Conseguir que una ambulancia maniobre en mitad de una multitud numerosa es una tarea ardua (véase figura 6.11).

El modelo de Michael Batty incorporaba la tendencia de los viandantes a agruparse y formar enjambres, creando movimientos masivos entre

las diversas atracciones de la ruta del carnaval. Había un total de treinta y ocho puntos de entrada a la zona del carnaval muy utilizados, de los cuales, las cinco paradas del metro eran los más importantes. Los investigadores buscaban medidas para controlar a la gente como barreras, cierres de calles y límites de capacidad en cada entrada, que redujeran el riesgo de exceso de afluencia, que tiende a concentrarse en algunos puntos en particular a lo largo de la ruta circular que sigue la procesión del carnaval.* La policía y los políticos londinenses, y un órgano llamado Carnival Review Group gestionado por el ayuntamiento de Londres, están en la actualidad considerando diversas opciones para modificar esa ruta a fin de reducir los riesgos. El modelo de Michael Batty aporta un medio de valorar esas alternativas sin tener que recurrir al festival anual como enorme, aleatorio y singular campo experimental.

Michael Batty y sus compañeros señalan que este tipo de modelos pueden reorientar nuestra forma de gestionar las ciudades. “En el pasado –afirman–, hemos asumido la presunción tácita de que podemos modelar las ciudades como sistemas casi naturales en los que el control viene después del hecho”.¹⁴ Por supuesto, un acontecimiento como el carnaval de Notting Hill está ya muy constreñido por el plan de ruta, los puntos de entrada, etcétera, antes de que se propongan medidas de control adicionales. Y sin embargo, ninguna de esas limitaciones es inevitable: la ruta se puede modificar, los puntos de entrada se pueden clausurar. Con cierta capacidad para predecir el comportamiento de las multitudes, todo el proceso de planificación se hace mucho más maleable: la predicción, dicen los investigadores, se mezcla con la prescripción. Más que imponerse desde arriba, la planificación se entremezcla con su resultado de forma iterativa e interactiva. No hay en esos modelos de movimiento peatonal nada que dicte qué *debería* hacer la gente. Al contrario, el objetivo es averiguar qué *hará* la gente recurriendo a algunas presunciones simples sobre sus motivaciones y teniendo en cuenta las restricciones con las que se puede topa. Éste es el verdadero espíritu de la física moderna de la sociedad.

Aún estamos en los inicios de nuestros intentos por comprender la dinámica del desplazamiento de las personas, pero ya podemos advertir que

* Los resultados de este modelo de simulación pueden verse en <http://www.casa.ucl.ac.uk/research/urbanstudies/index.html>

la aparente complejidad de la conducta humana no anula nuestra capacidad para, cuando menos, comprender y predecir algunos de sus aspectos. Igualmente importante es la demostración de que los cambios bruscos de la conducta colectiva no necesariamente requieren cambios concertados de la intención de todos los miembros del grupo. Los cambios colectivos pueden, por el contrario, emerger espontáneamente aun cuando la predisposición de cada individuo se modifique sólo poco a poco.

También hay riesgos potenciales. Parrish y Edelman-Kreshet advierten de los riesgos de los modelos físicos de las dinámicas de grupo de los animales:

muchos conjuntos de reglas pueden conducir a un comportamiento colectivo parecido al que se produce en la realidad, de modo que los resultados, aunque visualmente atractivos, pueden tener poco valor informativo: no siempre es posible deducir el comportamiento individual de las propiedades que puedan surgir.¹⁵

En otras palabras, que se consiga lo que parece el comportamiento colectivo adecuado no quiere decir que hayamos dado con las reglas correctas, lo cual, a su vez, significa que no necesariamente se obtendría la misma predicción en otras circunstancias. El modelo de dinámica peatonal que habla de “fuerza social” no parece lo suficientemente versátil para adaptarse a situaciones distintas de las que fue originalmente diseñado, pero merece la pena recordar que esos modelos de comportamiento colectivo pueden no proporcionar explicaciones únicas de un fenómeno determinado ni necesariamente se adaptan a todas las situaciones. No son más que un principio.

LOS LÍMITES DE LA CIUDAD

Había una vez tres lomas llamadas Tothill, Penton Hill y White Mound o Tower Hill. Los senderos serpenteaban entre ellas. Los senderos se convirtieron en caminos y carreteras y entre ellos surgieron asentamientos, y al lugar lo llamaron Londres. O eso dicen algunas leyendas, que probablemente tengan mucho de fantasía. Sea como quiera, las viviendas se multiplicaron y los caminos crecieron hasta que las aldeas se convir-

tieron primero en pueblos y luego en ciudades y luego en grandes ciudades. No todas ellas crecieron tan orgánicamente como Londres, por supuesto, con su denso entramado de calles como una conejera que pidiera ser habitada por rufianes dickensianos. Sería fascinante saber si los modelos peatonales unos pueden decir algo acerca de la evolución de la geografía urbana, pero es una pregunta cuya respuesta todavía no se ha investigado.

No obstante, los modelos de crecimiento urbano han surgido de la física. En el siglo XIX, un grupo de sociólogos conocidos como *the boosters*, “los impulsores”, argumentó que las ciudades ejercen una fuerza de atracción sobre la gente y el comercio que es enteramente análoga a la atracción gravitatoria. Los impulsores imaginaron una ciencia del crecimiento urbano tan mecánica y determinista como las leyes de Newton, que describen los cuerpos que giran en campos gravitatorios. Sin embargo, las modernas teorías inspiradas en la física reconocen el carácter “orgánico” y complejo de la expansión urbana y siguen el ejemplo de los estudios de procesos de crecimiento en desequilibrio del tipo de los que hemos mencionado en el capítulo anterior, como las colonias de bacterias.

¿Y por qué no? Al fin y al cabo, la ciudad moderna está viva. Por eso es tan emocionante, tan aterradora, tan proclive a tragarse a sus habitantes. Londres, Tokio, Delhi y Los Ángeles palpitan, gruñen y suspiran y extienden sus muchos tentáculos. “Tanto si pensamos en Londres como en un joven recién levantado y aseado –escribe Peter Ackroyd, el biógrafo de la ciudad–, como si lamentamos que se haya convertido en un gigante deforme, hemos de considerarla como una forma humana con sus propias leyes de vida y crecimiento”.¹⁶

Ver Londres como forma humana requiere la imaginación de un novelista. De lo contrario, no es más que una masa amorfa que se extiende sobre el Támesis. Pero sus “leyes de crecimiento” existen, de eso no hay duda, y, al parecer, nadie puede controlarlas. Preocupada por la grotesca superpoblación dentro y alrededor de las murallas de la ciudad, Isabel I prohibió “todo tipo de vivienda o comercio dentro de un radio de tres millas de cualquiera de las puertas de dicha ciudad de Londres”.¹⁷ Esto potenció la expansión de las afueras, un proceso de agregación que a partir de entonces hizo estallar en mil pedazos las murallas de piedra. A la reina, lo mismo le habría dado poner puertas al campo.

En 1787, Henry Kett comparó la expansión de Londres con una epidemia:

Las mansiones surgen a diario sobre las marismas de Lambeth, los caminos de Kensington y las colinas de Hampstead [...] Una hilera de edificaciones une tan estrechamente el campo con la ciudad que ya nada separa Cheapside de St George’s Fields. La idea chocó hasta tal extremo a un niño que vivía en Clapham, que hizo la siguiente observación: “Si siguen edificando a ese ritmo, no tardaremos en estar puerta con puerta de Londres”.¹⁸

En la actualidad, todas esas localidades se han convertido en barrios de Londres y hay personas que los consideran muy atractivos por hallarse cerca del centro.

El alcalde de toda gran ciudad podría contar un cuento similar. Así que, mientras que las consecuencias de la expansión urbanística no son quizá tan sombrías como fueron en la Inglaterra isabelina, todavía son motivo de preocupación tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo. Obligados a hacer frente al espectacular aumento de la contaminación, del ruido, del tráfico, a la falta de espacios abiertos y a las tensiones que conlleva la superpoblación, muchos ciudadanos estadounidenses identifican la expansión urbanística como su inquietud local más importante. Contener la expansión urbanística se ha convertido en un tema candente de la agenda política. Donald Chen, director de Smart Growth America, organización que busca mejorar las condiciones urbanísticas, sostiene que la expansión de las ciudades “está minando el entorno, la economía y el tejido social de Estados Unidos”.¹⁹

Si los responsables de la planificación urbanística quieren mitigar la expansión, primero tienen que comprender sus causas. Pero como Chen señala, “las teorías que explican la expansión son tan numerosas como políticamente controvertidas”.²⁰ Por ejemplo, la acusación de que el gasto federal en infraestructuras y las subvenciones para el suministro de agua y energía eléctrica fomentan la expansión queda de alguna forma entredicho por el hecho de que el descenso de las subvenciones en los últimos años no ha redundado en un descenso del crecimiento urbano en Estados Unidos. Las amebas siguen creciendo.

Ya en la década de 1930, Lewis Mumford se percató de lo informes y orgánicas que parecían las grandes ciudades:

Volar en círculo sobre Londres, Berlín, Nueva York o Chicago, o ver las ciudades esquemáticamente en un plano. ¿Qué forma tiene la ciudad y cómo se define? A medida que el ojo se extiende hacia la brumosa periferia, salvo las de la naturaleza –los meandros de un río, las orillas de un lago–, uno no encuentra formas definidas sino una masa informe, aquí abultada por edificaciones que sobresalen, allí rota por un parche de vegetación o por las formas geométricas de un depósito de gas o de una hilera de almacenes de mercancías. El crecimiento de una ciudad es ameboide: no consigue dividir sus cromosomas sociales, pero formando nuevas células, la gran ciudad continúa su crecimiento abriéndose paso a través de sus bordes y aceptando su expansión y su informidad como un inevitable producto secundario de su inmensidad física.²¹

La similitud con la expansión de una colonia microbiana es algo más que una expresiva metáfora. En los años noventa, Michael Batty reconoció en los torpes e irregulares perfiles de las ciudades cierta semejanza con las formas de los grupos de partículas formados por agregación por difusión limitada (ADL; véase el capítulo anterior), como los observados por Mitsugu Matsushita en el crecimiento bacteriano.

Era una imagen desafiante. Los urbanistas se esfuerzan por ver las *regularidades* de la forma urbana, lo que es muy natural, porque es por ellas precisamente por lo que han apostado ellos y sus predecesores. La estructura reticular de las ciudades estadounidenses –esquema urbanístico que desarrolló en primer lugar la Roma imperial– es lo primero que se advierte en un plano urbano o al mirar Manhattan desde una azotea. Pero los límites de la ciudad son cualquier cosa menos organizados y formales al meterse en las extensiones vacías del mapa. Vistas como grupos por ADL, las ciudades no guardan ninguna relación con una planificación racional y empiezan a parecerse a seres verdaderamente orgánicos, con vida propia, a “una cristalización del caos”, según la memorable expresión de Lewis Mumford.²²

Para describir el crecimiento de las ciudades, Michael Batty y su colega Paul Longley adaptaron una teoría del crecimiento por ADL llamada

“modelo de descomposición dieléctrica” (MDD). Mientras los grupos formados por ADL crecen por acumulación de partículas en sus bordes, el MDD representa un proceso en el cual las puntas se internan en el medio que las rodea, lo cual es, probablemente, una descripción más realista del desarrollo urbanístico. Batty y Longley adaptaron el modelo para ajustar la densidad de los grupos si las ramas eran, para entendernos, gruesas o delgadas. Observaron que podía reproducir, de forma aproximada, la manera en que una ciudad se extiende cuando está limitada por obstáculos naturales como ríos y costas (véase figura 6.12). En general, a medida que crece, una ciudad se vuelve cada vez más densa y ocupa cada vez más espacio disponible: su dimensión fractal (véase página 134) aumenta. Michael Batty y Paul Longley calcularon que entre 1820 y 1962 la dimensión fractal de Londres pasó de 1,322 a 1,791.

En la universalidad de estos modelos de crecimiento fractal podemos advertir un eco de unas palabras que Herbert Spencer publicó en 1876:

Cuando decimos que los agregados sociales y los agregados orgánicos comparten la característica del crecimiento, no excluimos

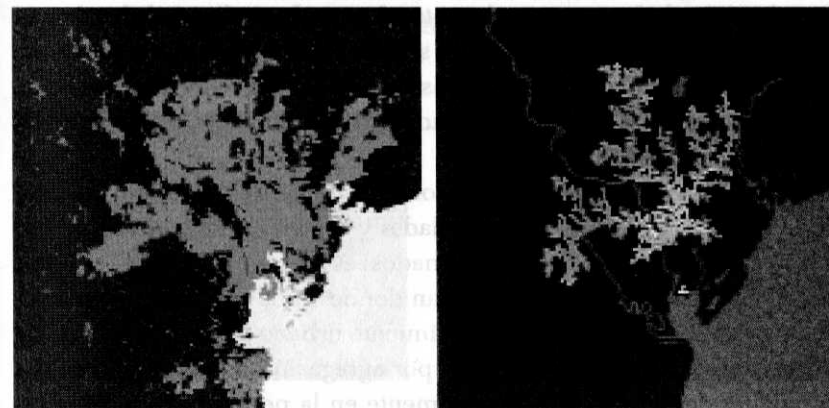


Figura 6.12. Un modelo de crecimiento fractal desarrollado por Michael Batty y Paul Longley puede ofrecer una imitación razonable de la forma de la ciudad galesa de Cardiff, que crece entre varios ríos y el mar. (a) es la ciudad real, (b) la simulación por ordenador del crecimiento basándose en el modelo.

enteramente a la comunidad de los agregados inorgánicos: algunos de ellos, como los cristales, crecen de una manera visible.²³

Pero la triste verdad es que los grupos tipo ADL no se parecen mucho a las ciudades reales. Para empezar, los primeros consisten en una masa continua, densa en el centro y progresivamente más difusa hacia el exterior. Las ciudades reales son más toscas, tienden a crecer vinculándose a localidades cercanas a las que luego engullen, que es lo que Londres hizo con Kensington, Clapham y Hampstead. Además, la presencia de la ciudad fomenta la formación de comunidades satélite: los suburbios, cuyos residentes disfrutaban de la proximidad de la urbe sin vivir en ella. Las empresas ubicadas en los suburbios se alimentan de la actividad comercial de sus habitantes y de los habitantes de la gran ciudad.

Esta imagen, más compleja, del crecimiento urbano ha sido simulada en un modelo de crecimiento en desequilibrio desarrollado por Hernán Makse, Shlomo Havlin y Gene Stanley en la Universidad de Boston en 1995. A Makse, la forma irregular de las ciudades le recordaba la forma de los fluidos al filtrarse en una roca porosa. Algunos modelos simples de este fenómeno (que es importante para la prospección petrolífera) tratan el progreso del fluido por la intrincada red de poros como un proceso aleatorio, de forma que cada tentáculo es independiente de los demás. Pero Makse se dio cuenta de que, si daba por supuesto que una zona del fluido *siente* el efecto de las demás a una distancia relativamente larga, la descripción es mucho más ajustada. En la jerga física se dice que las zonas están correlacionadas.

Makse y sus compañeros aplicaron el modelo de “filtración correlacionada” al crecimiento de las ciudades y razonaron que los grupos de desarrollo también están correlacionados: es más probable que las zonas residenciales y las comerciales surjan donde ya hay zonas residenciales y comerciales. Consideraron el crecimiento urbano como un proceso del mismo tipo que la ADL: se produce por agregación de nuevas partículas (“unidades de desarrollo”), normalmente en la periferia. Pero mientras en la ADL las partículas se agregan de forma aleatoria, en la filtración correlacionada van donde ya hay otras partículas. Asimismo, el modelo permite que aparezcan nuevos centros de desarrollo que no están físicamente conectados con el grupo principal (al tiempo que sienten su influencia por medio de correlaciones).

Las formas resultantes dependen de lo fuertes que sean esas correlaciones. Dentro de cierto ámbito de fuerza de correlación, los grupos en crecimiento empiezan a parecerse a las ciudades reales (véase figura 6.12). Una forma de establecer una comparación más precisa, cuantitativa, es considerar cuántas localidades pequeñas hay alrededor de la gran ciudad (en el modelo, las ciudades se corresponden con grupos de partículas conectadas que están hacia el exterior). Hay más localidades pequeñas que ciudades y los datos para Londres y para Berlín muestran que existe una relación matemática precisa entre el tamaño de una ciudad y el número total de localidades de ese tamaño. Esta relación (que es, en realidad, la *distribución de probabilidades* de los tamaños de una ciudad; (véase página 56) es reproducida por el modelo con gran precisión.

Lo más sorprendente de esta relación es que es la misma para el Berlín de 1920 que para el Berlín de 1945, e incluso para el Londres de 1981, por mucho que estas dos ciudades sean de distinto tamaño y, sin duda, han sufrido regulaciones urbanísticas muy distintas. Ésta parece ser la *forma* inevitable de las grandes ciudades, que el modelo de filtración correlacionada puede reproducir y que no cambia fundamentalmente cuando la ciudad crece. La planificación no parece tener efecto alguno en esta ley de crecimiento: considerada en estos términos, la *forma* de Londres en la década de 1980 no guarda ninguna relación con la política del Cin-

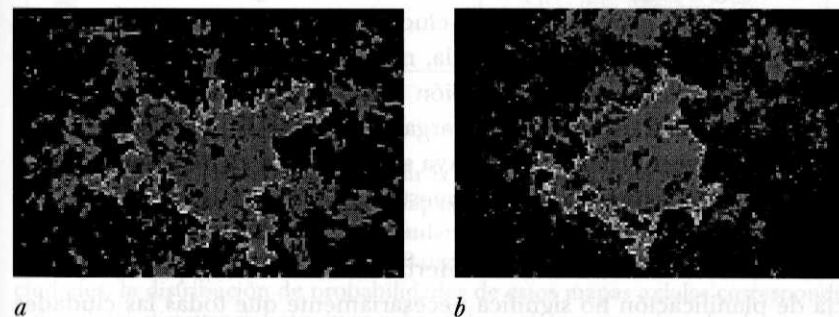


Figura 6.13. La forma de una ciudad como Berlín (a), que aquí aparece tal como era en 1945, es remedada por los grupos de partículas desarrollados en un modelo de “filtración correlacionada” (b). Los rasgos de detalle son muy distintos, pero las dos estructuras tienen una apariencia similar. En realidad, comparten propiedades matemáticas precisas en términos de distribución de “partículas”.

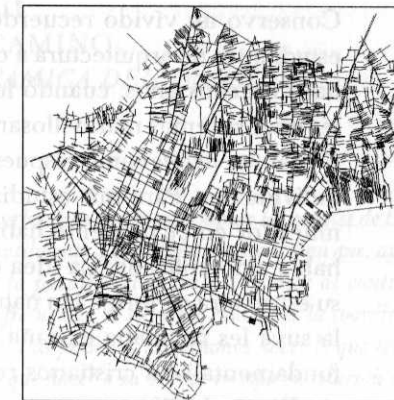
turón Verde aplicada en los años sesenta, en un intento por contener su expansión dentro de franjas de zonas verdes protegidas. “Podría decirse –sostiene Gene Stanley– que los legisladores hacen lo que quieren, pero que la gente vive donde le da la gana”.²⁴ Este proceso colectivo crea sus propias leyes físicas para la configuración y la forma.

Pero la planificación no siempre es invisible en la estructura global de una ciudad. Rui Carvalho y Alan Penn, del University College de Londres, afirman que una manera ligeramente distinta de medir la forma de una ciudad revela una división en dos clases, lo cual muestra la influencia de distintos regímenes de planificación. Emplean un plan de planificación introducido por Bill Hillier y Julienne Hanson en el que los espacios abiertos del entorno urbano están representados por líneas rectas (axiales) que se prolongan hasta cruzarse con otro espacio abierto. Esto crea un llamado plano axial (véase figura 6.14). Rui Carvalho y Alan Penn observaron las distribuciones de probabilidad de las longitudes de las líneas axiales de treinta y seis ciudades de catorce países distintos y se dieron cuenta de que veintiocho de ellas encajaban en dos “curvas maestras” distintas, es decir, daba la impresión de que hay dos tipos de estructura urbanística. Uno de ellos corresponde a las estructuras relativamente “abiertas”, con muchas líneas –a este tipo pertenecen ciudades como Bangkok, Eindhoven, Seattle y Barcelona–. El otro grupo tiene una estructura más densa dominada por líneas más cortas –a él pertenecen Londres, Hong Kong, Atenas y Dhaka–. Los investigadores creen que el crecimiento del primer grupo de ciudades ha sido gobernado por una planificación “global” a gran escala, mientras que el segundo grupo ha sido guiado sólo por la planificación “local”, de modo que hay menos rasgos “de escala urbana” como largas avenidas. Un puñado de ciudades como Nueva Orleans y La Haya se quedan en algún lugar intermedio entre los dos tipos, lo cual demuestra una combinación de influencia local y global en su planificación.

El economista estadounidense Herbert Simon señala que una ausencia de planificación no significa necesariamente que todas las ciudades estén mal *diseñadas*. Por el contrario, con frecuencia están (o cuando menos estuvieron) notablemente bien configuradas para el transporte de mercancías, para un reparto proporcionado entre zonas residenciales, comerciales y fabriles, y para que dentro de una pequeña área se desarrollase una gran actividad:



Tokio



Bangkok



Atenas



Las Vegas

Figura 6.14. Otra forma de representar la estructura espacial subyacente de las ciudades es representarlas como “mapas axiales” en los que las líneas rectas que designan espacios abiertos se extienden hasta cruzar otra línea. Aquí podemos ver las distintas estructuras de Tokio, Bangkok, Atenas y Las Vegas. Para muchas ciudades, la distribución de probabilidades de estos mapas axiales corresponde a dos clases distintas de estructura urbana, lo cual corresponde a dos formas de planificación diferentes. Hay ciudades que no encajan en ninguno de los dos tipos.

Conservo un vívido recuerdo del asombro y perplejidad de los estudiantes de arquitectura a quienes enseñé economía urbanística hace muchos años, cuando les señalé que las ciudades medievales eran sistemas maravillosamente configurados que en su mayoría habían *nacido* como respuesta a miríadas de decisiones humanas individuales. Para mis estudiantes, estructura significaba un planificador en cuya mente había sido concebida y por cuya mano había sido aplicada. La idea de que una ciudad pudiera adquirir su estructura de forma tan natural como un copo de nieve adquiere la suya les resultaba extraña. Reaccionaron a ella como muchos fundamentalistas cristianos responden a Darwin: ino hay diseño sin Diseñador!²⁵

Tristemente, las leyes que dictan el crecimiento de la ciudad hacen que, en la actualidad, muchas urbes alcancen proporciones que pocos podrían percibir como “maravillosas”. Que ese proceso queda fuera del alcance de los urbanistas puede parecer una conclusión pesimista para quienes se preocupan por la expansión urbana.

Y es posible que tengamos que ser pesimistas; pero tal vez no haya por qué serlo. Quizá lo mejor sea centrar nuestra atención no en ponerles límites, sino en conseguir que las ciudades sean lugares más atractivos para vivir. Buenos servicios, buen transporte público, vehículos con baja emisión de gases contaminantes, espacios verdes protegidos, diversidad de tiendas, arquitectura más atractiva, todo parece perfectamente factible si hay voluntad, y todo parece más sugerente que los grandes planes para imponer fútiles diseños de lugares que, como un viajero dijo de Londres en el siglo XIX, “no parecen tener ni principio ni fin”.

VII EN EL CAMINO *LA INEXORABLE DINÁMICA DEL TRÁFICO*

Un urbanista puede contemplar las señales de tráfico útilmente. Las señales nos recuerdan que, aunque la planificación suele asociarse al control, con frecuencia el elemento crucial es la coordinación. Las personas necesitamos hacer lo que tenemos que hacer a su debido tiempo en relación con lo que los demás están haciendo.

THOMAS SCHELLING (1978)¹

Uno de los objetivos principales de la investigación teórica en cualquier ámbito de conocimiento es encontrar el punto de vista desde el que el tema aparece en su mayor simplicidad.

J. WILLARD GIBBS²

*Abajo en Gehenna o arriba en el Trono,
Viaja más aprisa quien viaja solo.*

RUDYARD KIPLING (1890)³

*¿*Qué le parecería pasar una semana laborable al año sentado en una caja poco mayor que un cajón sin nada que hacer, sin poder levantarse, ni estirarse, ni dormir, leer o ver la televisión? Bueno, si usted vive en Washington DC, Boston o Denver es posible que ya lo esté haciendo. Y en Los Ángeles tiene muchas probabilidades de estarlo haciendo una semana y media.

Estoy hablando del tiempo que se pierde en los atascos. A medida que las ciudades se extienden y la distancia al trabajo es mayor, a medida que el transporte público está cada vez más deteriorado e ir en bicicleta

se convierte en una actividad con riesgo de muerte, pasar un buen rato sentado en el coche ha ido convirtiéndose en parte intrínseca de la vida en la urbe. En las ciudades estadounidenses, el tiempo que empleamos en esta actividad mayormente solitaria y estresante se ha triplicado en las dos últimas décadas. Todos los años, los habitantes de Los Ángeles pierden cincuenta y seis horas en los atascos, es decir, semana y media de trabajo. Y no hay duda de que vamos a peor. Los londinenses no se cansan de decirse (normalmente, cuando están atrapados en un atasco) que hoy en día la velocidad media en toda la ciudad es tan baja como hace cien años, cuando el caballo de potencia significaba exactamente eso. Recientemente, la ciudad ha introducido tasas por congestión en un intento desesperado por mejorar el tráfico en el colapsado centro.

Durante los periodos vacacionales, en Europa no es raro que algunos atascos tengan más de cien kilómetros de largo. Los costes implícitos causados por los atascos son espectaculares y, sin duda, nos darían qué pensar si reflexionásemos un momento sobre el precio de un vehículo o de un depósito lleno de gasolina. El coste económico de todo el tiempo desperdiciado se calcula en unos sesenta mil millones de libras esterlinas al año en Alemania, y eso sin considerar el impacto medioambiental. El precio de los retrasos y de la gasolina empleada en, digamos, Houston (donde la gasolina está barata), alcanza ochocientos cincuenta dólares (quinientas libras) por persona al año.

Las emisiones de los vehículos son una de las mayores fuentes de contaminación. En un país muy urbanizado como Alemania, el sesenta por ciento del monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno, gases tóxicos, que se lanzan a la atmósfera, provienen del tráfico rodado. La contaminación de los vehículos de carretera es la causa más probable del reciente aumento del asma infantil en las ciudades. Es muy probable que el efecto invernadero causado por las emisiones de dióxido de carbono de los coches esté contribuyendo a la reducción de los casquetes polares. Los motores que siguen rugiendo ociosamente en los atascos acentúan estos problemas sin redundar en nada útil. En Seattle, coches inmóviles o que apenas se mueven consumen más de trescientos cincuenta litros de gasolina por persona y año.

Una opción es construir más carreteras, pero esto sólo sirve para atraer más tráfico, lo cual nos devuelve al punto de partida. "Construir más carreteras para solucionar el tráfico -afirma Richard Moe, presidente de la Fun-

dación Nacional para la Conservación Histórica, de Estados Unidos- equivale a tratar de curar la obesidad aflojándose el cinturón".⁴ La solución ideal es fomentar el uso del transporte público, la bicicleta y el caminar. Todas esas cosas son posibles, pero va a ser difícil desbancar nuestra adicción al motor de combustión interna, que, en realidad, parece aumentar tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo. Si reducir el volumen del tráfico es una tarea de enormes proporciones, ¿no podríamos al menos dirigirla con mayor eficacia? En resumen, nunca hemos tenido mayor necesidad de comprender cómo fluye el tráfico y por qué algunas veces ni siquiera fluye.

Pese al empleo de ordenadores para optimizar el diseño de las medidas de control del tráfico y de las calles, toda ciudad tiene lugares, puntos negros, en los que los responsables de gestionar el tráfico y los ingenieros de caminos no han hecho las cosas bien. Es posible que se enfrenten a una tarea imposible, que intenten que infraestructuras que tienen varias décadas sirvan para el volumen de tráfico del siglo XXI. Y qué bien conocemos todos la perversidad de la circulación: la forma en que, por ejemplo, se forman "atacos fantasma" en una autopista sin ningún motivo aparente.

La física estadística nos puede ayudar a entender cómo funciona el tráfico y por qué hay atascos. En todo el mundo hay investigadores que diseñan modelos conceptuales derivados de la física de los gases y los fluidos que pueden predecir cuándo y dónde ocurren las congestiones y qué forma tendrán. Se ha descubierto que el tráfico tiene sus propias y peculiares leyes del movimiento, que con frecuencia resultan sorprendentes y en ocasiones exasperantes. La física del tráfico no resolverá nuestros problemas de transporte, pero puede contribuir a que tomemos medidas de seguridad más adecuadas, a que mejoremos el diseño de las autopistas y a que preveamos mejor las caravanas. Gracias a ella, el control del tráfico será menos una actividad empírica y más una ciencia exacta. Y cuanto antes mejor, porque en la planificación de los transportes, el *laissez faire* ha dejado de ser una opción.

SEGUIR LA PISTA

Circular por redes de carreteras atestadas es como jugar en la bolsa: no paras de tomar decisiones basándote en una información incom-

pleta. Los informes de tráfico de las emisoras locales y de los planificadores de ruta sólo ofrecen una imagen limitada y no siempre con la prontitud necesaria. Pero en la ciudad alemana de Duisburgo ocurre ya lo que podemos esperar que ocurra en muchas partes del mundo en los años venideros. En Internet se puede consultar un mapa que muestra instantáneamente la situación del tráfico en ese momento y que se actualiza continuamente.

El tráfico se puede medir llenando las carreteras de controladores que registran el paso de los vehículos. Un solo controlador, por ejemplo, un chip de inducción, un cable sensible a la presión colocado a través de la calzada, puede registrar el número de vehículos que pasan por minuto. Sin embargo, la medida más útil de control del tráfico no tiene que ver con las cifras, sino con la densidad. Diez coches podrían pasar por un chip de inducción en un minuto formando una lenta caravana o muy espaciados y a gran velocidad. En el primer caso la densidad del tráfico es alta, en el segundo, baja. Para deducir la densidad, hay que saber no sólo el flujo del tráfico en vehículos por minuto, sino su velocidad. Y para medir la velocidad hacen falta dos chips de inducción, situados muy cerca el uno del otro, en un punto de control.

En principio, la densidad del tráfico en una ciudad puede evaluarse en su totalidad llenando todas las carreteras con pares de chips de inducción. Pero ésa es una medida muy poco práctica. En Duisburgo miden el tráfico sólo en un puñado de puntos clave, la mayoría de las calles no tienen sistemas de control. Lo que ocurre en los tramos sin controlar lo deduce un programa informático, un modelo de partículas en movimiento parecido al que vimos en el capítulo anterior. Los datos reales se usan para que las simulaciones sean verosímiles, los cálculos se comprueban continuamente para asegurarse de que ofrecen valores de densidad del tráfico ajustados. Con estas medidas se da por supuesto que los valores del ordenador no pueden estar demasiado alejados de la realidad.

El modelo lo desarrolló a principios de los años noventa Michael Schreckenberg, físico de la Universidad de Duisburgo, en colaboración con Kai Nagel, que por aquel entonces trabajaba en la Universidad de Colonia. Nagel había intervenido en un proyecto de gestión del tráfico similar en varias ciudades estadounidenses como Dallas.*

ONDAS Y PARTÍCULAS

El modelo Nagel-Schreckenberg (NaSch) no ha sido en modo alguno el primer intento de usar la física para entender el tráfico. James Lighthill (1924-1998), uno de los mayores expertos en física de fluidos de todo el siglo XX, propuso en los años cincuenta que el tráfico de una carretera se comporta como el líquido que fluye por un tubo. Desde la Universidad de Manchester y en colaboración con Gerald Whitham, desarrolló esa intuición y llegó a elaborar una teoría improvisada del tráfico.

De acuerdo al modelo Lighthill-Whitham, al igual que la teoría del movimiento de los fluidos ignora las andanzas de las moléculas a escala individual, el comportamiento de cada conductor está totalmente sumergido bajo el tráfico a escala más general. Resulta irónico, porque el propio Lighthill no ajustaba precisamente al promedio en lo que se refiere a sus hábitos de conducción. Continuamente le multaban por exceso de velocidad, si bien explicó ante el tribunal que en tanto que responsable de la cátedra lucasiana de Matemáticas de Cambridge (la misma que ocupó Newton) era plenamente consciente tanto de las leyes de la mecánica como de sus deberes sociales y sabía que no podía malgastar energía. En consecuencia, relató a los desventurados jueces, se sentía obligado a no pisar el freno cuando iba cuesta abajo. Y al parecer, en alguna ocasión esta línea de defensa le deparó cierto éxito.

Quizá la monótona procesión de vehículos de una autopista, semejante a una caravana de escarabajos, pudiera ponernos menos nerviosos por la aparente ingenuidad psicológica que supone elaborar una física del tráfico rodado opuesta a una física de la circulación peatonal. Pero detrás de cada volante se sienta una persona al mando de una máquina, lo cual puede bastar para que la conducta humana adopte extrañas formas. Si los peatones tienen sus cosas, los conductores también, y, además, ¿no serán mucho menos predecibles, ya que tienen que lidiar con todo tipo de circunstancias, desde su propio cansancio a las peleas de los niños, desde la influencia de los narcóticos a los vaivenes hormonales?

No obstante, aún es posible considerar el problema en términos de promedios y fluctuaciones con respecto a esos promedios. La mayoría de los conductores se las arregla para conducir con sensatez y es pre-

* Véase <http://www.traffic.uni-duisburg.de/OLSIM/> y <http://www.transims.tsasa.lanl.gov/>

decible, sin lanzarse a súbitas variaciones de velocidad ni chocar con todo el que se interpone en su camino. La mayor parte de las desviaciones del promedio carecen de importancia: algunos conducen a veinte kilómetros por hora menos que el límite permitido, otros a veinte kilómetros por hora más. Pocos hacen el trayecto entre Birmingham y Southampton en tercera (aunque me han dicho que mi abuelo lo intentó varias veces).

Varios investigadores han intentado mejorar los trabajos de James Lighthill teniendo en cuenta las respuestas de conductores reales. Un grupo de la General Motors de Warren, Michigan, diseñó en la década de 1950 uno de los primeros ejemplos de los llamados “modelos de seguimiento de automóviles”. Ese modelo, más que considerar el tráfico como un fluido casi continuo, trataba a los vehículos como objetos discretos y presuponia que cada conductor modificaba su velocidad respondiendo a lo que hacía el vehículo que llevaba delante. El conductor aceleraba o frenaba (desaceleraba) dependiendo de dos factores: la distancia con el coche que llevaba delante y la velocidad relativa de ambos vehículos. (Los conductores tienden a frenar con mayor brusquedad si viajan a ciento cincuenta kilómetros por hora que si viajan a cincuenta kilómetros por hora). En 1974, Rainer Wiedemann, de la Universidad de Karlsruhe, fue un poco más allá y elaboró un modelo en el que cada conductor estaba impulsado por un conjunto de reglas “psicológicas”. Pero cuanto más complejo es el modelo, más difícil resulta saber qué resultados representan aspectos “fundamentales” del tráfico y cuáles son consecuencia de las normas elegidas.

El modelo que Kai Nagel desarrolló en colaboración con Schreckenberg tiene sin duda la virtud de la simplicidad. Es, básicamente, una especie de autómatas celular. La carretera queda dividida en una serie de células, cada una de las cuales puede estar vacía u ocupada por un vehículo. Los vehículos se mueven de célula en célula a golpes, como las fichas de un parchís, de modo que el tráfico evoluciona en una sucesión de imágenes congeladas. Como en el modelo para caminantes de Dirk Helbing, cada conductor quiere alcanzar cierta velocidad preferida. En una carretera despejada, todos los coches acelerarán hasta alcanzar esa velocidad. Además, los conductores quieren evitar los choques, lo cual les lleva a mantener una distancia de seguridad con el automóvil que llevan delante que aumenta a medida que la velocidad de los dos

vehículos es más elevada. El tercer ingrediente del modelo es un elemento aleatorio o *de ruido*. Ningún conductor calcula las aceleraciones y desaceleraciones a la perfección —en particular, podría tender a sobrecompensar frenando más de lo necesario si ve en la distancia un vehículo que circula más lento—. Además, hay distracciones que también causan fluctuaciones de la velocidad: sin duda, todos hemos frenado en algún momento cuando algo nos ha llamado la atención.

Éstas eran las normas de la carretera, pero, ¿cómo circulaban los vehículos? Nagel y Schreckenberg se dieron cuenta de que hay dos tipos distintos de tráfico, que se distinguen por cómo varía el ritmo de paso a medida que la densidad del tráfico se incrementa. El ritmo de paso mide cuántos vehículos pasan por cierto punto en una hora (o en un minuto, o en el intervalo de tiempo elegido). La densidad del tráfico es el número de vehículos por kilómetro (o milla o la medida elegida) de calzada. A medida que el tráfico se hace más denso y hay luz suficiente para que cada conductor haga lo que le plazca, el ritmo de paso aumenta cuando la densidad aumenta: hay más coches por cada kilómetro de carretera sin que necesiten aminorar la marcha, así que cada hora pasan más vehículos por un punto de control determinado. Pero cuando la densidad es “crítica”, esta pauta (“tráfico fluido”) se interrumpe. Los vehículos empiezan a reaccionar ante la presencia de los demás reduciendo la velocidad y, a continuación, el aumento del número de vehículos debido a una mayor densidad del tráfico es compensado por una disminución decreciente de los mismos porque van más despacio. En el punto de densidad crítica, el ritmo de paso empieza de pronto a decrecer en lugar de a incrementarse cuando la densidad del tráfico aumenta (véase figura 7.1). Los responsables de tráfico dirán: se ha pasado de un tráfico fluido a un tráfico congestionado.

RIESGO Y CONTINGENCIA

En una versión de este modelo en la que Kai Nagel y su colega Maya Paczuski trabajaron en 1995, todos los conductores mantienen rígidamente su velocidad preferida siempre que quieren, imitando la clase de artilugio que tienen algunos vehículos que les permite llevar una velocidad de crucero. En este escenario, la transición de tráfico fluido a trá-

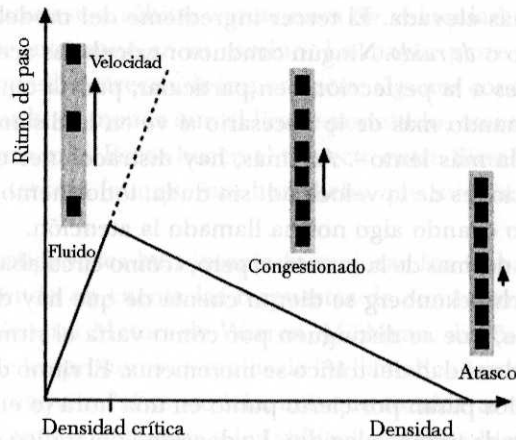


Figura 7.1. El paso del tráfico fluido al tráfico congestionado puede observarse en un gráfico que recoge en una variable el ritmo de paso y en otra la densidad del tráfico. Por encima de cierta densidad (crítica), el ritmo de paso empieza a decrecer cuando la densidad se incrementa, porque los coches se ven obligados a ir más despacio. Pero hay una alternativa, un estado metaestable "libre" por encima de la densidad crítica (indicada por la línea de puntos).

fico congestionado se puede retrasar: en lugar de que la transición ocurra cuando se llega a la densidad crítica, el tráfico continúa fluyendo con libertad, incrementando su ritmo de paso a medida que la densidad se incrementa (la línea de puntos de la figura 7.1). Es como si los conductores hubieran decidido colectivamente correr el riesgo de mantener la velocidad cuando la densidad del tráfico aumenta.

En este modelo, de control de cruce, la densidad crítica representa un punto de bifurcación en el que hay dos opciones. Una de ellas es la apuesta segura: todos aminoran la marcha. La otra es la apuesta arriesgada: todos la mantienen. Mientras nadie pierda los nervios ni la concentración, este tráfico denso y rápido puede sobrevivir sin colisiones. Pero se trata de un estado peligroso y precario. Si alguien frena, el coche que va detrás tiene que frenar también, y el que está detrás de éste... y, de pronto, ese estado de ritmo de paso rápido se viene abajo y el tráfico se congestiona. Por supuesto, los conductores de la simulación no saben que al mantener la velocidad corren un gran riesgo —igual que las molé-

culas no saben si están en estado líquido o gaseoso—. La cuestión es, sencillamente, que ese estado de movimiento veloz es un estado colectivo factible, incluso por encima de la densidad crítica.

Pero es un estado tan frágil que se derrumba a la más ligera provocación. Cualquier fluctuación aleatoria lo convierte, en un Gran Kaboom, en un estado congestionado. En otras palabras, no es un estado estable. Los físicos conocen hasta el más mínimo detalle de esos estados: los llaman estados *metaestables*, lo cual significa, literalmente, "próximos a la estabilidad". Metaestable no es lo mismo que inestable, el estado de movimiento rápido que persiste por encima de la densidad de tráfico crítica que se mantiene siempre y cuanto nadie meta la pata. Los gases, los líquidos y los sólidos también pueden ser metaestables. Pueden existir en condiciones en las que otro estado sería en realidad más estable. Un líquido se puede enfriar por debajo de su punto de congelación sin que se ponga rígido; es decir, puede atravesar su transición de fase como si en ese punto no ocurriera nada inusual. De un líquido así se dice que está sobreenfriado.

Un líquido metaestable sobrevive porque la congelación tiene que empezar en algún sitio. El agua no se congela en todas partes a la vez, empieza por unos cuantos cristales diminutos que a continuación crecen de manera estable a través del líquido. Lo normal es que esos cristales seminales sean germinados por las irregularidades del líquido, como partículas de polvo o rozaduras en las paredes del recipiente. En esos lugares, a las moléculas de agua les resulta ligeramente más fácil unirse en una configuración parecida al hielo. Si el agua se mantiene escrupulosamente libre de impurezas y otros lugares de la nucleación del hielo, la única forma de que empiece a congelarse es que, por azar, algunas moléculas empiecen a congregarse y a configurarse en forma de hielo. Es decir, una fluctuación aleatoria debe impulsar la transición.

En principio, esto es posible en el momento en que la temperatura del agua desciende más allá del punto de congelación. Pero en la práctica puede no ocurrir durante mucho tiempo, aunque la posibilidad de que lo haga muy rápido aumenta cuanto más caiga la temperatura por debajo del punto de congelación. Hasta ahora, el récord de temperatura de un agua sobreenfriada está en los 39°C bajo cero. Por debajo de esa temperatura es prácticamente imposible evitar que el agua se congele.

Podríamos pensar en el fenómeno de la nucleación como en algo parecido a los cánticos de una hinchada de fútbol. A veces se tiene la impresión de que una multitud que grita de forma incoherente es metaestable con respecto a otra que cante al unísono. Pero los cantos tienen que empezar en algún sitio, porque no todos los espectadores empiezan a cantar al mismo tiempo. Muchos pequeños grupos de aficionados pueden empezar a cantar una canción a la que ponen fin en cuanto comprueban que sus vecinos no les siguen. Sin embargo, en cuanto el cántico se extiende a un grupo de cierto tamaño crítico, parece cobrar vida propia y enseguida el estadio entero canta como una sola voz.

Incidentalmente, la congelación de los océanos impulsada por un fragmento de hielo-g en *Cuna de gato* de Kurt Vonnegut (cf. capítulo IV) presupone que el agua líquida sea relativamente metaestable a esta forma de hielo imaginaria, que, si se da el caso, el agua se congelaría formando "hielo caliente". De acuerdo a esta imagen, los océanos sólo están esperando la congelación, salvo que una semilla de hielo-nieve se forma con demasiada dificultad confiando únicamente en fluctuaciones de hielo aleatorias. Sólo cuando se añade una semilla preexistente es posible la transformación. A finales de los años sesenta, un grupo de científicos rusos creyó que había descubierto una nueva forma "gomosa" de agua que era más estable que el agua líquida en condiciones normales de temperatura y presión. Algunos creyeron que la llamada poliagua podría en verdad llegar a congelar los océanos si llegaba a entrar en contacto con ellos. Por fortuna, la poliagua no es más que un fragmento de unos cuantos errores de la investigación científica.

Llegados a este punto, debo hacer una puntualización ligeramente técnica acerca de la metaestabilidad que es importante para lo que sigue. Con anterioridad he distinguido entre transiciones de fase de primer orden y transiciones de fase críticas. Congelación, ebullición, etcétera, son transiciones de fase de primer orden. La aparición del magnetismo a la temperatura de Curie y el enfriamiento de un fluido por debajo de su temperatura crítica de forma que se separe en líquido y gas son transiciones críticas. Resulta que sólo las transiciones de primer orden pueden apoyar estados metaestables que, temporalmente, *ignoran* la transición. Por otro lado, las transiciones de fase críticas no pueden evitarse, porque en un punto crítico ocurre algo especial que garantiza que no se pase por alto.

El paso de tráfico fluido a tráfico congestionado en el modelo NaSch es, por lo tanto, una especie de transición de fase de primer orden. La existencia del ramal metaestable de "tráfico fluido" tiene otras consecuencias. Supongamos que la densidad del tráfico se incrementa gradualmente en una calle cuando la hora punta se aproxima. La densidad crítica de la congestión puede excederse sin que en realidad haya congestión, así que el tráfico persiste en un estado fluido metaestable. Pero antes de que pase mucho tiempo, una fluctuación causada por algún conductor nervioso hace que llegue la congestión. El tráfico fluido cae hasta casi cero y la densidad del tráfico aumenta.

A continuación, el tráfico disminuye cuando pasa la hora punta y la densidad empieza a caer. Pero el tráfico no puede hacer la transición hasta la fluidez hasta que la densidad cae por debajo de la densidad crítica, porque hasta que se llega a ese punto, el tráfico fluido siempre es más estable (véase figura 7.2).

En otras palabras, la metaestabilidad tiene dirección única. Podemos conseguir un tráfico fluido aumentando la densidad del tráfico desde valores bajos, pero no decreciéndola desde valores altos. Del mismo modo,

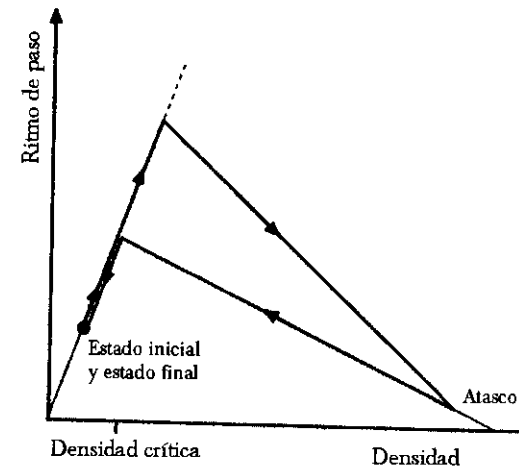


Figura 7.2. Si el tráfico persiste en el régimen metaestable, una fluctuación aleatoria puede congestionarlo en cualquier momento. Cuando ya no hay tantos vehículos, no se recupera la fluidez hasta que se llega a la densidad crítica. Así pues, incrementar la densidad del tráfico tiene distintas consecuencias a aminorarla: se produce un "rizo" en el desarrollo del tráfico que puede ocurrir sólo en una dirección.

se puede obtener agua sobreenfriada enfriando el líquido, pero no calentando el hielo hasta aproximarse al punto de congelación.

Por lo tanto, el estado del tráfico no sólo depende de su densidad sino de su *historia*, es decir, de si previamente era más denso o menos denso. Cuando la densidad del tráfico aumenta y luego cae, el ritmo de paso sigue un rizo como el de la figura 7.2, que sólo puede atravesarse en una dirección. Los físicos llaman a este comportamiento de una sola dirección *histeresis*.

El modelo NaSch da una pista de cómo pueden formarse los atascos sin ninguna causa aparente. Supongamos que, por algún motivo, mientras una columna de tráfico se mueve en el estado de tráfico fluido metaestable, un conductor decide frenar de repente. Es posible que haya una causa genuina: un perro sale corriendo delante del coche, o tal vez ese conductor aminore la marcha instintivamente para coger su teléfono móvil, que está sonando. Estas circunstancias pueden idealizarse en una simulación programando un vehículo de forma que, de pronto, su velocidad pase de la del tráfico de los vehículos que le rodean a algún valor más bajo antes de acelerar otra vez para recuperar la misma velocidad de los demás. Es la más breve de las alteraciones, pero observemos lo que sucede con el tráfico (véase figura 7.3).

Aquí, cada línea de puntos se eleva bruscamente desde abajo a la izquierda hasta arriba a la derecha describiendo los cambios de posición de un automóvil con el paso del tiempo. Una línea recta e inclinada corresponde a un coche que se mueve a velocidad constante. Un coche frena arriba a la izquierda y rápidamente reanuda su ascensión, pero los coches que le siguen —las líneas de la derecha— responden aminorando su velocidad para evitar la colisión. La oleada de ondas en que se interrumpen las líneas corresponden a una oleada de vehículos que, de pronto, ha aminorado la velocidad. Como podemos ver, hay muchos coches afectados, incluidos los que entran en el tramo de carretera mucho después de que el coche que ha frenado haya desaparecido de escena. Cuando más gruesa la red de líneas negras, más denso el atasco.

Y hay más. Si el atasco se hubiera quedado en el punto donde se inició, las ondas de perturbación habrían descrito en el diagrama una línea horizontal. En vez de ello, la onda baja a medida que pasa el tiempo, indicando que el atasco *se mueve* a contracorriente —en dirección opuesta a la del tráfico—. En otras palabras, un atasco que empieza en un sitio

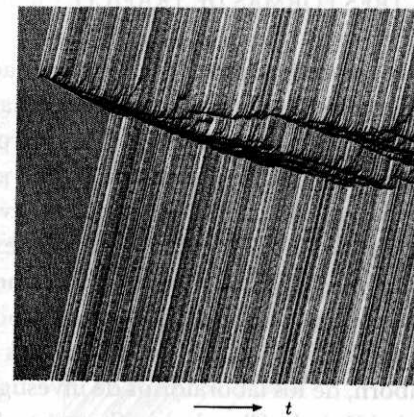


Figura 7.3. Atascos causados por una sencilla fluctuación del tráfico metaestable. La figura muestra de qué forma la distancia x de una autopista varía con el tiempo t en una simulación por ordenador. Una línea recta de puntos que se eleva inclinándose a la derecha describe a un vehículo a velocidad constante. Todos los vehículos que entran en ese tramo de autopista (a distancia cero, a lo largo del borde inferior del diagrama) empiezan una nueva línea. Las bandas oscuras que van de izquierda a derecha corresponden a los atascos. Muestran de qué modo el avance continuo de un vehículo se ve interrumpido, creando una onda en su “línea temporal”. Una sola perturbación arriba a la izquierda, causada por la frenada repentina de un vehículo, motiva varios puntos de congestión a medida que pasa el tiempo.

puede desplazarse espontáneamente a otro sitio en una corriente de tráfico. Y la perturbación inicial se separa en varias ramas, de modo que un coche que llegue después (hacia la derecha del diagrama) a ese tramo de carretera, no encontrará un atasco, sino una sucesión de ellos. Esos atascos no muestran ninguna señal de terminarse, en todo caso, proliferan a medida que pasa el tiempo. Así pues, una única, pequeña y breve fluctuación crea varias ondas de desagradables embotellamientos.

Muy posiblemente, al lector estas circunstancias le parecerán muy verosímiles, y lo cierto es que se dan todos los días en el tráfico real. Pero el modelo NaSch no es el ideal para describirlas. Resulta demasiado simple y excesivamente sensible a las pequeñas perturbaciones. Antes de considerar formas más precisas de modelar el tráfico, sin embargo, veamos qué nos dicen las observaciones del mundo real.

TRES FORMAS DE TRÁFICO

En 1965, un equipo de investigadores de la Universidad del Estado de Ohio siguieron a varios automóviles mediante fotografías aéreas hechas mientras se movían a lo largo de una autopista. Observaron precisamente el tipo de "atasco sin causa" al que el modelo de NaSch puede dar lugar, moviéndose a contracorriente en una onda persistente (véase figura 7.4). Este tipo de atasco es una consecuencia de la reacción exagerada de los conductores, que frenan más de lo que en realidad es necesario.

La imagen general descrita por Nagel y Schreckenberg recibió más apoyo sustancial en 1996, año en que los investigadores alemanes Boris Kerner y Hubert Rehborn, de los laboratorios de investigación de Daimler-Benz (en la actualidad DaimlerChrysler) en Stuttgart, efectuaron observaciones detalladas del flujo del tráfico por un tramo de la autopista A5-Sur, que une la ciudad alemana de Giessen con la suiza de Basilea. Es una carretera particularmente frecuentada cuando pasa a la altura de Frankfurt, y en el tramo en cuestión se pusieron chips de inducción para medir la velocidad de los vehículos. Kerner y Rehborn observaron precisamente el comportamiento previsto por el modelo de NaSch. El ritmo de paso aumentaba a medida que la densidad del tráfico crecía hasta un punto en el que el tráfico fluido podía, de pronto, convertirse en atasco. Los datos extraídos de la experiencia dieron lugar a un diagrama parecido al del modelo (véase figura 7.5).

¿Qué supone exactamente este gráfico para un conductor? En la figura 7.5 una serie puntos aparecen numerados secuencialmente. Esos puntos representan medidas consecutivas del tráfico cada tres minutos en una localización precisa de la autopista. En el momento que corresponde al punto 1 el tráfico avanza con fluidez, pero a una densidad mayor que la densidad crítica de alrededor de veinte vehículos por kilómetro. A continuación, la velocidad empieza a disminuir, de modo que el ritmo de paso sale de la ramificación metaestable (puntos 2 y 3). Luego, de pronto, se produce un atasco y los vehículos quedan casi inmóviles. Las cosas se quedan como están durante los siguientes minutos —puntos 4, 5 y 6— antes de que el tráfico empiece a moverse gradualmente otra vez y el ritmo de paso vuelva a ser parecido al original. Adviértase que vuelve a haber tráfico fluido en un punto cercano a la densidad crítica (punto 12). En otras palabras, el tráfico sale del atasco más gradualmente y a

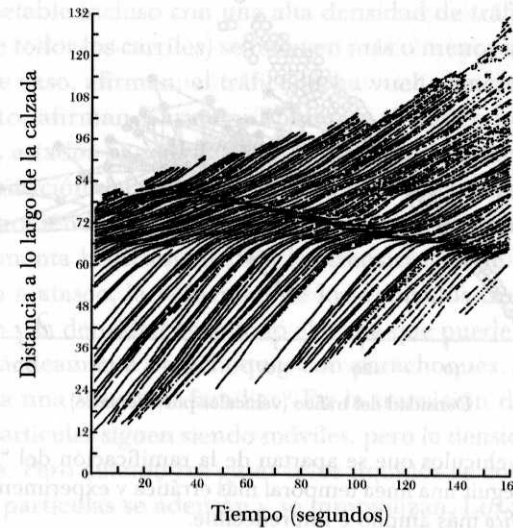


Figura 7.4. Atasco espontáneo con datos de tráfico reales. Es el mismo tipo de gráfico de la Figura 7.3. Cada línea representa la evolución de un vehículo a lo largo del tiempo. La fractura que baja en horizontal de izquierda a derecha es un atasco *en movimiento*.

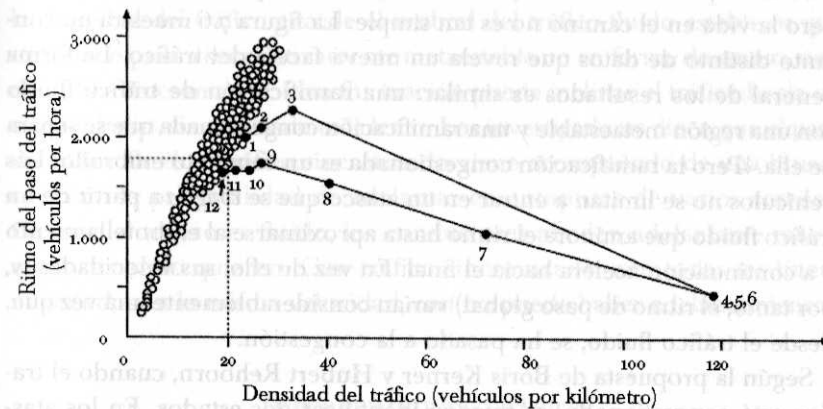


Figura 7.5. Datos de tráfico real recogidos en una autopista alemana en 1996. Los puntos numerados representan el promedio de un minuto concreto sobre una secuencia de tráfico de doce minutos en un solo punto de la autopista.

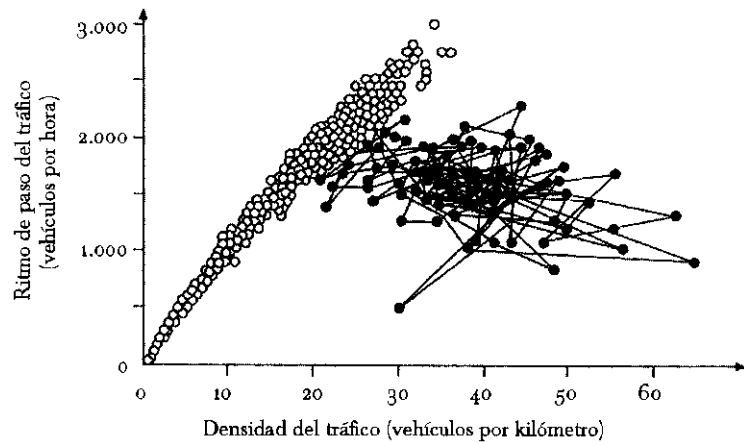


Figura 7.6. Los vehículos que se apartan de la ramificación del “tráfico fluido” pueden a veces seguir una línea temporal más errática y experimentar un abanico de *estados del tráfico* más amplio e impredecible.

menor densidad de la que entra: es el efecto de la histéresis. Una vez más, la historia es de dirección única: nunca se ha observado que la secuencia temporal que lleva del punto 1 al 12 ocurra en orden inverso.

Se diría que todo lo anterior son buenas noticias para el modelo NaSch, pero la vida en el camino no es tan simple. La figura 7.6 muestra un conjunto distinto de datos que revela una nueva faceta del tráfico. La forma general de los resultados es similar: una ramificación de tráfico fluido con una región metaestable y una ramificación congestionada que se separa de ella. ¡Pero la ramificación congestionada es un completo embrollo! Los vehículos no se limitan a entrar en un atasco que se *congela* a partir de un tráfico fluido que aminora el ritmo hasta aproximarse al embotellamiento y a continuación acelera hacia el final. En vez de ello, sus velocidades (y, por tanto, el ritmo de paso global) varían considerablemente una vez que, desde el tráfico fluido, se ha pasado a la congestión.

Según la propuesta de Boris Kerner y Hubert Rehborn, cuando el tráfico está congestionado, se pueden identificar dos estados. En los atascos el movimiento es mínimo, el tráfico muy denso y el ritmo de paso descende hasta aproximarse a cero. Esto corresponde a la extremidad derecha de la ramificación “congestionada”: puntos 4, 5 y 6 de la figura

7.5. Pero el tráfico congestionado puede seguir moviéndose a un ritmo de paso respetable incluso con una alta densidad de tráfico, si todos los vehículos (de todos los carriles) se mueven más o menos a la misma velocidad. En ese caso, afirman, el tráfico se ha vuelto sincronizado.

Por lo tanto, afirman Kerner y Rehborn, el tráfico no pasa por dos sino por tres estados básicos: tráfico fluido, tráfico sincronizado y atascos. En la transición del tráfico fluido al tráfico sincronizado, los vehículos siguen moviéndose y el ritmo de paso se mantiene alto, pero la densidad aumenta bruscamente. En las transiciones de tráfico fluido o sincronizado a atasco, la velocidad de los vehículos desciende rápidamente a cero y la densidad es todo lo elevada que puede ser estando los vehículos prácticamente parachoques con parachoques.

¿No resulta una situación familiar? En la transición de fase de gas a líquido, las partículas siguen siendo móviles, pero la densidad salta a valores más altos. Pero cuando los gases o los líquidos se congelan, solidificándose, las partículas se adensan y se inmovilizan. Los tres estados del tráfico se parecen extraordinariamente a esos tres estados de la materia. Además, Kerner y Rehborn afirman que la transición de tráfico fluido a atasco raramente ocurre directamente. El tráfico sincronizado aparece normalmente en un estado intermedio, de igual modo que la materia que pasa de gas a sólido tiene, normalmente, que atravesar el estado líquido.

Por lo tanto, afirman los investigadores, lo que en realidad ocurre cuando la densidad del tráfico excede el umbral del tráfico fluido estable es que ese estado pasa a ser relativamente metaestable no en forma de atasco, sino de tráfico sincronizado. Una fluctuación puede inclinar el tráfico hacia un estado denso, sincronizado más lento. Los investigadores dicen que el paso de tráfico fluido a tráfico sincronizado viene acompañado de una brusca caída en la probabilidad de adelantar en autopistas de varios carriles. Cuando el tráfico es fluido, los conductores pueden adelantarse más o menos cuando quieren. Con tráfico sincronizado, con todas las líneas moviéndose a la misma velocidad, casi no puede haber adelantamientos.

INTERRUMPIR EL TRÁFICO

De qué modo el tráfico fluido da paso al tráfico sincronizado sigue siendo motivo de debate. Boris Kerner y Hubert Rehborn están con-

vencidos de que el tráfico sincronizado es un estado fundamental del tráfico de igual modo que el líquido es un estado fundamental de la materia. Otros, como Dirk Helbing, sospechan que su aparición puede depender de circunstancias externas, de perturbaciones en el estado de tráfico fluido. Es decir: el estado sincronizado no se congela espontáneamente, a partir de la nada, algo tiene que impulsar el proceso, algo como una curva, una cuesta, un cuello de botella, una entrada o una salida. Esas perturbaciones actuarían como las partículas de polvo que inician la nucleación de un sólido a partir de un líquido superenfriado o, lo que se adecúa mejor al caso, un líquido a partir de un gas superenfriado.

Kerner y Rehborn coinciden en que, normalmente, el fluido sincronizado no parece impulsado por *impurezas* de la carretera como los puntos de entrada y de salida donde los vehículos entran y salen (en los estudios del tráfico se les llama “vías de acceso” y “vías de salida”). Sugieren que cuando el flujo sincronizado aparece espontáneamente no es más que un estado fugaz que, en general, sólo dura media hora o menos. En algunos modelos, el tráfico sincronizado es metaestable y apto para congelarse en atasco si aparece alguna perturbación. Pero Michael Schreckenberg y sus compañeros de Duisburgo sostienen que, en la realidad, el tráfico sincronizado es bastante robusto y que se deriva de un factor que muchos modelos no tienen en cuenta: el deseo de los conductores de que la conducción sea cómoda y llevadera.

La mayoría de los modelos sólo tienen en cuenta dos cosas de los conductores: que su objetivo es alcanzar cierta velocidad preferida y que evitan choques aminorando la marcha. En principio, esto podría suponer un viaje lleno de trompicones: los conductores aceleran siempre que pueden y frenan cuando ven otro vehículo en la distancia. Schreckenberg y sus compañeros argumentan que, en realidad, pocas personas conducen así; en vez de ello prefieren evitar aceleraciones o desaceleraciones bruscas. Cuando añadimos esta regla al modelo de automatismo celular, emerge el tráfico sincronizado como estado fundamental y estable que persiste incluso cuando un atasco lo atraviesa a contracorriente.

Esta especie de refinamiento promete mejorar la capacidad de predicción de los modelos de tráfico, pero, además, nos muestra algo más profundo: esas formas de tráfico colectivo constituyen un aspecto irreductible del tráfico. Elaborar modelos más complejos en lo psicológico puede alterar las condiciones precisas bajo las cuales aparecen los distintos estados,

pero no alterará el hecho de que el tráfico, como la materia atómica, parece tener estados fundamentales. Pero ¿son de verdad sólo tres esos estados? Pues sí y no. Parece que todo vehículo se encuentra en todo momento o bien en tráfico ligero y no correlacionado, o en tráfico denso y en tráfico sincronizado, o denso y casi paralizado en los atascos. Pero Dirk Helbing y sus colaboradores han observado que, con el paso del tiempo, esos estados pueden mezclarse y permutarse.

En 1998, y en colaboración con Martin Treiber, Dirk Helbing desarrolló en Stuttgart un nuevo modelo que tiene rasgos en común con el autómatas celular de Nagel y Schreckenberg y los modelos de tráfico fluido concebidos originalmente por James Lighthill y Gerald Whitham. Treiber y Helbing dejaron de considerar los vehículos de forma individual y trataron el tráfico como si fuera un fluido, un fluido muy peculiar. En la teoría tradicional del movimiento de fluidos, llamada hidrodinámica, cada pequeña “parcela” de fluido afecta a los que la rodean como si fuera una red viscosa: ejerce una fuerza de fricción que ralentiza el movimiento del fluido circundante. En el modelo de Dirk Helbing y Martin Treiber, las interacciones entre partículas de “tráfico fluido” son más complejas y captan el mismo tipo de respuestas que las partículas del modelo de NaSch. Una vez más, se supone que los conductores aceleran y frenan cuando reaccionan a lo que ocurre más adelante, con el fin de alcanzar una velocidad en particular y de evitar colisiones. Es un fluido con voluntad propia; en realidad, con múltiples voluntades.

A densidades más bajas, este modelo genera tráfico fluido. Cuando la densidad aumenta, el tráfico fluido se hace metaestable y las pequeñas fluctuaciones pueden ser absorbidas y dispersadas, pero las mayores darán pie a atascos localizados que se propagarán en dirección contraria al tráfico. Si la densidad aumenta todavía más, los atascos pueden evolucionar en cascada, como los que hemos visto en la figura 7.3 (página 197): ondas de tráfico congestionado separadas por tráfico fluido. Cualquiera que se haya sentado a un volante recordará este movimiento parado-avance. E incluso con densidades de tráfico mayores, el tráfico se congestiona de manera uniforme y se forma un atasco que avanza más lentamente.

Helbing, Treiber y Ansgar Hennecke estudiaron cómo se comportaba el tráfico fluido en presencia de alguna irregularidad como una vía de acceso. Introdujeron una onda de congestión localizada en el tráfico de

la vía de acceso y observaron lo que ocurría cuando la onda, que avanzaba en dirección contraria al tráfico, alcanzaba la vía de acceso. Para el tráfico lento, la congestión simplemente desaparecía. Con tráfico más denso, daba pie a todo tipo de conductas: ondas de atascos localizadas separadas por tráfico fluido, ondas de congestión casi sin interrupciones (“tráfico congestionado con oscilaciones”), congestión localizada en la vía de acceso, tráfico congestionado a partir de la vía de acceso, etcétera.

Los investigadores ilustraron este comportamiento tan diverso en una especie de diagrama de fase que muestra las condiciones en las que se forma cada estado (véase figura 7.7). Esto puede considerarse análogo al “diagrama morfológico” esbozado para las figuras de crecimiento bacteriano (página 135), al fin y al cabo, al igual que el crecimiento de las bacterias, el tráfico es un proceso en desequilibrio. El paso de un estado a otro se produce de repente, en cuanto los “parámetros de control” –el tráfico en la calzada principal y la afluencia de tráfico por la vía de acceso– son alterados en el modelo. Al parecer, el tráfico está a merced de una serie de transiciones de fase en desequilibrio.*

¿TAMBIÉN HABRÁ ATASCOS EL DÍA DE MAÑANA?

¿Captan esos diversos modelos el comportamiento del tráfico real o son poco más que bonitos juegos de ordenador? Sólo si el modelo imita la realidad eficazmente se puede confiar en que proporcione previsiones ajustadas. Con eso en mente, Helbing, Treiber y Hennecke han comparado sus predicciones con los datos del tráfico real tomados en varias autopistas alemanas y holandesas en las que se pusieron chips de inducción. Les alentó comprobar que todos los estados de tráfico previstos por su modelo podían identificarse en la realidad. Y lo que es más, observaron que introduciendo en su modelo los rasgos básicos del tráfico real (como el ratio de los coches o de los camiones), podían predecir con asombrosa precisión cuál sería su desarrollo con el paso de las horas,

* El equipo dirigido por Dirk Helbing ha demostrado que, en términos generales, el mismo “diagrama de fase” de estados del tráfico surge en un modelo basado en partículas en el que cada vehículo está modelado de forma individual. Así pues, esos estados no parecen demasiado dependientes de los detalles del modelo.

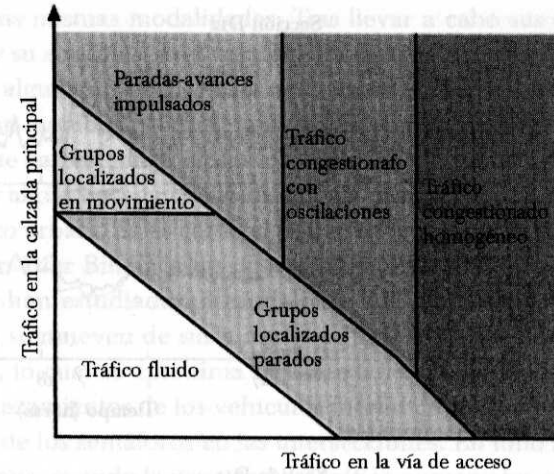


Figura 7.7. Los estados del modelo de tráfico “fluido” desarrollado por Dirk Helbing y sus colaboradores. El tráfico congestionado homogéneo es un atasco que crece constantemente en longitud. En el tráfico congestionado con oscilaciones, el atasco también se prolonga en el tiempo, pero avanza en ondas, de manera que, de forma individual, los vehículos de la zona atascada se paran y avanzan a intervalos. Los grupos localizados en movimiento son nudos de tráfico denso que se mueven constantemente en dirección contraria a la del tráfico. El estado paradas-avances impulsados es un estado similar en el que tales embotellamientos dan pie a un grupo más denso y pequeño que se mueve en la misma dirección del tráfico provocando un nuevo nudo que *asciende* a contracorriente. Los grupos localizados parados son embotellamientos que se quedan fijados en un punto de la carretera, y los vehículos entran y salen de ellos.

incluso cuando la pauta general no era ni previsible ni regular en modo alguno (véase figura 7.8).

Esto les permitió comprender que los resultados de este tipo de modelo no dependen –al menos no con demasiada precisión– de los datos que se introduzcan. Dando por sentado que los conductores comparten ciertas características generales –acelerar hasta una velocidad preferida en una carretera despejada, frenar para mantener una velocidad que depende de la distancia con el vehículo precedente y dar respuestas imperfectas, lo cual induce, probablemente, a una reacción exagerada–, no importa exactamente cómo reacciona cada uno con detalles tales como el tiempo de reacción, la forma de la carretera o el número de carriles. En todo caso,

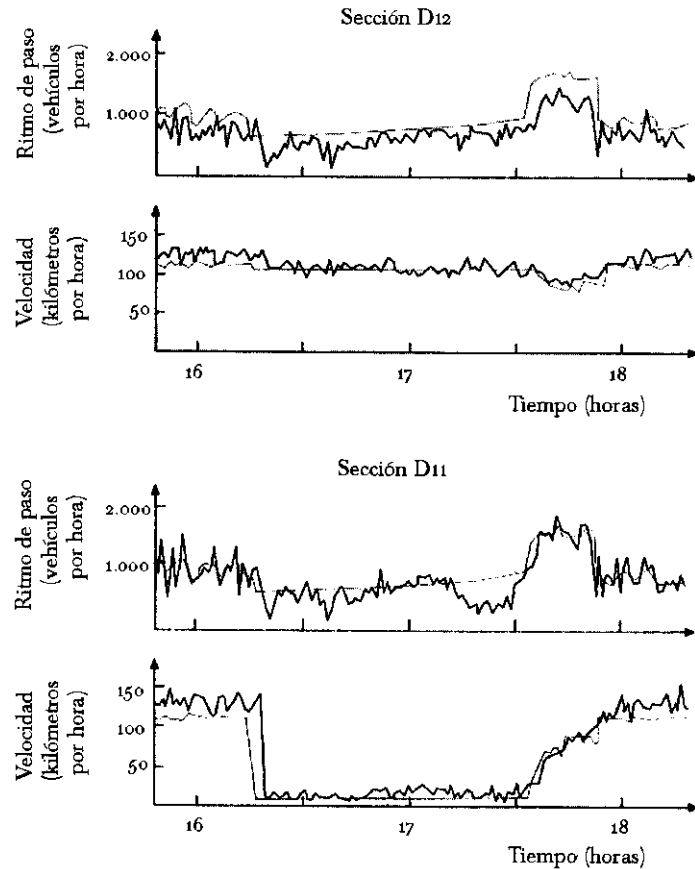


Figura 7.8. El modelo de tráfico de Helbing y sus colaboradores puede predecir cómo evolucionarán diversos estados del tráfico con el paso de las horas. El modelo alimenta la densidad del tráfico y la velocidad medidas en algún punto a contracorriente y desde este punto calcula la velocidad y la densidad probables en varios puntos que se encuentran a lo largo de la carretera. Aquí muestro el tráfico (velocidad y densidad) en dos puntos distintos de la autopista A5-Sur situados cerca de Frankfurt, pasadas dos horas y media. La congestión la causaba el cierre de un carril en algún punto situado a lo largo de ese tramo. La línea negra representa los datos reales medidos por los chips de inducción; la línea gris muestra las predicciones del modelo para esos lugares. El modelo prescinde de muchos detalles, pero predice correctamente rasgos básicos del tráfico como el tiempo y el lugar de los atascos y el momento en que desaparecen.

surgirán las mismas modalidades. Tras llevar a cabo sus observaciones, Helbing y su equipo se han convencido de que la mayoría de los atascos los causa alguna anomalía: cuellos de botella, vías de acceso, cuestas o tal vez una maniobra aberrante de algún conductor. En los más de cien atascos que han estudiado, todos menos cuatro (como mucho) fueron causados por algún tipo de cuello de botella pasajero.

El tráfico urbano no es como el tráfico en carretera: está dominado por los cruces. Ofer Biham y sus compañeros de la Universidad Hebrea de Jerusalén han estudiado un modelo de autómatas celulares en el que los vehículos se mueven de sur a norte y de oeste a este sobre una retícula cuadrada, lo cual se aproxima bastante a las ciudades estadounidenses. Los desplazamientos de los vehículos fueron cronometrados para imitar la acción de los semáforos en las intersecciones. En tono alarmante averiguaron que, cuando la densidad del tráfico aumentaba, se producía una brusca transición de fase de tráfico fluido a atasco estacionario —es decir, los vehículos se quedan totalmente parados.

La física del tráfico ya está demostrando su valor. El Sistema de Simulación y de Transporte de Kai Nagel, basado en su modelo autómatas celulares y desarrollado en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, Nuevo México, se ha utilizado para planificar la red de carreteras de Dallas. Sabiendo las consecuencias probables de las intersecciones, cruces y estrechamientos de la calzada, los encargados de planificar las carreteras podrían situarlos en los lugares más adecuados. Schreckenberg tiene planes para ampliar su propio sistema de Duisburgo y abarcar toda la red de carreteras de la zona norte del Rin-Westfalia, con previsiones del tráfico cada hora.

Elaborar modelos sobre el tráfico en autopistas también puede contribuir a mejorar las normas de tráfico. Cierto modelo desarrollado por Dirk Helbing en colaboración con Bernardo Huberman, de los laboratorios de investigación Xerox de Palo Alto, California, demuestra que una combinación de automóviles y camiones en las calzadas con muchos carriles puede dar pie a lo que llaman “tráfico coherente”, en el cual todos los vehículos se mueven a la misma velocidad sin cambiar de carril. Recuerda, aunque no es lo mismo, al tráfico sincronizado. El tráfico coherente es un estado sólido, firme, muy estable frente a las fluctuaciones, y aunque no prevé que los conductores alcancen su velocidad preferida, es muy eficiente: la elevada densidad del tráfico y las velocidades moderadas pue-

den significar que el ritmo de paso casi alcanza su tope. Asimismo, el tráfico coherente es un estado seguro, porque reduce las dos causas principales de accidentes: diferencias de velocidad y cambios de carril. Así pues, merece la pena buscar formas de fomentar el cambio al tráfico coherente cuando el tráfico se hace muy pesado, imponiendo, por ejemplo, la velocidad apropiada y restricciones a los cambios de carril.

Dirk Helbing y Bernardo Huberman afirman también que su modelo revela que las normas de carril de los Estados Unidos, que permiten a los conductores viajar a cualquier velocidad por cualquier carril, pueden mejorar la eficiencia de las carreteras frente a las normas europeas, que regulan los carriles de más lento a más rápido. Como la mayoría de los camiones se quedan en el carril más lento, los conductores tienden a evitarlo incluso cuando no hay camiones, lo cual reduce la capacidad de la autopista en torno a un veinticinco por ciento. Por otra parte, Martin Treiber y Dirk Helbing han demostrado que los atascos y los retrasos reales en una autopista alemana podrían haberse evitado introduciendo límites de velocidad que modifiquen su respuesta a los cambios en la densidad del tráfico. Un límite impuesto sólo durante la hora punta podría evitar los atascos y reducir los promedios de tiempo de trayecto para todos los vehículos.

Una de las causas principales de los atascos cuando el tráfico es denso son las fluctuaciones. Los conductores pierden concentración, se acercan demasiado al vehículo delantero y, a continuación, frenan bruscamente. Si pudieran reducirse perturbaciones aleatorias como ésa, los atascos mermarían enormemente. Una forma es reducir las normas de tráfico que tienen el efecto de forzar a los conductores a prestar más atención en áreas con mayor riesgo potencial de atascos –por la presencia de, por ejemplo, cuellos de botella–. Otra posibilidad es aplicar medidas de control del tráfico en vías de acceso y adaptarse a los cambios en la densidad del tráfico.

Una opción con mayores perspectivas es la de sustituir al conductor humano por otro que nunca se fatigue ni cometa errores de cálculo. En casi ningún modelo de tráfico hay choques, puesto que las normas están diseñadas explícitamente para evitarlos. Los “conductores virtuales” no necesitan que se les garantice ninguna respuesta particularmente sofisticada ni capacidad alguna para evitar chocar con otros vehículos; en realidad, necesitan saber poco más que la distancia que les separa del

vehículo que llevan delante y con cuánta velocidad se están aproximando a él. Con esta información, los coches podrían, aparentemente, ser conducidos con seguridad por pilotos automáticos, ¡por verdaderos robots!

Esa posibilidad ya está siendo explotada por algunos fabricantes de automóviles que están desarrollando sistemas de “conducción asistida” que emplean radares y otros sensores para detectar lo que sucede alrededor del coche y responder en consecuencia. Uno de los objetivos principales es evitar los choques y los atropellos de peatones o ciclistas facilitando la frenada automática o la maniobra, pero con una respuesta más rápida que la que cualquier humano puede dar. Una vez que esos sistemas se instalan en los vehículos, podrían ayudar también con tareas más corrientes como el cambio de carril y el control de la velocidad de cruce.

Como hemos visto, las fluctuaciones que causan los atascos pueden derivarse de la reacción exagerada de los conductores al tráfico denso. Esto podría solucionarse con los sistemas de conducción asistida. Las simulaciones del tráfico de Martin Treiber y Dirk Helbing han demostrado que algunos atascos con alta densidad del tráfico podrían solucionarse si tan sólo el veinte por ciento de los vehículos estuviera equipado con sistemas de conducción automatizada que le permitiera responder de forma óptima a los cambios del tráfico.

Pensemos en vincular esos pilotos automáticos a los sistemas de navegación por satélite, a los mapas digitales de carretera y a un informe del tráfico actualizado y fiel a los datos reales y tendremos una receta para dirigirnos de un punto A a un punto B con seguridad y sin tener que coger el volante. Las organizaciones de automovilistas, que suelen apostar por una mayor “libertad para el conductor”, tendrán que aceptar que, a veces, es esa misma libertad la que convierte las carreteras en un infierno. Los conductores robóticos no sólo pueden ser más hábiles, considerados y respetuosos de la ley, sino también estar mejor informados y ser más previsores: en pocas palabras, estar en una situación mucho mejor para utilizar las carreteras más sabiamente.

VIII
RITMOS EN EL MERCADO
LA OCULTA Y TEMBLOROSA MANO DE LA ECONOMÍA

No hay nada que la filosofía requiera ilustrar más que el comercio.

SAMUEL JOHNSON¹

Si se pusiera a todos los economistas uno detrás de otro formando una cadena, no llegarían a una conclusión.

GEORGE BERNARD SHAW²

Nadie debería ser rico salvo aquellos que lo comprenden.

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE³

Cuando el escocés Adam Smith (1723-1790) inventó la economía política como campo de la filosofía, no tenía hombros de gigantes del pasado en los que apoyarse. Antes de él, nadie se preguntó jamás cómo se sostiene una economía de mercado, porque el comercio era un asunto mundano y no merecía la consideración de la filosofía. Pero el *Leviatán* de Hobbes era una de las lecturas de cabecera de Adam Smith, porque su programa para construir una Comunidad estable no podía permitirse el lujo de prescindir de cuestiones como la gestión del comercio o la distribución de la tierra. (Pese a ello, a Hobbes se le criticó por no prestar demasiada atención a la economía como la base real del poder. En *Oceana* (1656), James Harrington, rival de Hobbes, sostenía que las revueltas de la guerra civil habían surgido en gran parte a raíz de los cambios en la propiedad de la tierra que se produjeron a principios del siglo XVII.)

Y sin embargo, el mundo en el que Adam Smith escribió *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones* (1776) era muy distinto al mundo que Hobbes conoció una década después. Había un nuevo orden social y su soberano era Mammón. Para Hobbes, riqueza y producción significaban tierra y agricultura; para Adam Smith significaban industria. Para Hobbes el comercio era un activo del soberano y la verdadera medida de la riqueza de una nación era el oro, reunido por el medio que fuese: el saqueo, la conquista, el matrimonio dinástico. Por su parte, Smith sabía que la forja de la riqueza mercantil habían convertido al comercio en el factor determinante del tesoro de una nación.

Smith no tenía una visión de la naturaleza humana más amable que la de Hobbes. Los hombres, afirmó, son básicamente codiciosos, les mueve lo que pueden conseguir. Por ese motivo encontró en el modelo político de Hobbes los cimientos de una teoría del funcionamiento del mercado. De igual modo que los individuos de Hobbes quieren acumular poder (en primer lugar, comprándose a sus congéneres), los comerciantes de Adam Smith quieren amasar riqueza.

Para Hobbes, el ansia de poder sólo se puede refrenar rindiendo toda autoridad a un monarca supremo; la alternativa es una vida incómoda, brutal y corta. Pero nadie pone las reglas del mercado: era una disputa generalizada para todos. Ahí estaba el quid de la intrincada cuestión que Adam Smith pretendió explicar. Cómo, en una sociedad dominada por la codicia y carente de medios centralizados para regular el mercado, el común de la gente consigue arreglárselas para conseguir bienes a precios que no suponen su ruina. Si no hay autoridad todopoderosa, ¿qué impide a los comerciantes poner a sus artículos el precio que les plazca?

La respuesta es: la competencia. Los comerciantes que inflan sus precios perderán a sus clientes, que optarán por otros que ofrecen precios asequibles, y, por lo tanto, tendrán que cerrar su negocio. La presión de la competencia en una economía de libre mercado, sostenía Smith, debería garantizar que los bienes siempre se vendan a su verdadero valor o “precio natural”, una medida honrada de la calidad y cantidad de los materiales y del trabajo que se emplearon en fabricarlos. Todo aquel que ponga precios superiores a este valor se verá superado por sus competidores. Para Adam Smith, este mercado autorregulado garantiza que los ciudadanos reciban cuanto necesitan. No hay necesidad de una auto-

ridad central que designe a determinadas personas para determinados trabajos a fin de garantizar que exista un número adecuado de sastres, zapateros, panaderos, lecheros, etcétera. Siempre que hay demanda, puede haber beneficio y, por tanto, alguien que quiera obtenerlo.

El tratado de Smith constituye el primer análisis real de las obras de la nueva economía de mercado en la Ilustración y se apoya en una idea que no sólo domina toda la teoría económica del mercado actual, sino que resuena profundamente en la ciencia física que he descrito en los capítulos anteriores. No sólo existen leyes de mercado, sino que esas leyes *emergen* del tira y afloja del comercio, de la interacción de una miríada de agentes. No vienen impuestas desde fuera. Dos fuerzas opuestas –el interés y la competencia– bastan para generar un estado autorregulado estable, una especie de equilibrio. Ésta es la “mano invisible”, en palabras de Smith, que mantiene el orden del mercado. Como señala el economista Robert Heilbroner, “uno puede apelar a la dirección de una junta de planificación [...] pero no hay apelación, ni dispensa, frente a las presiones anónimas de los mecanismos del mercado”.⁴ Según la idea de Adam Smith, del egoísmo puede surgir el “bien” (lo cual significa un mercado global y justo). El mensaje de *La riqueza de las naciones* es el del *laissez faire*: dejar solo al mercado que él se cuidará de sí mismo. Es precisamente lo contrario de la camisa de fuerza dictatorial que Hobbes propuso para dominar el deseo de poder de la humanidad, y un mensaje de bienvenida a los capitalistas de la era industrial, que querían expandir sus imperios sin interferencia de los gobiernos.

En el mundo de Adam Smith estaban las semillas del nuestro, pero no era el mismo. Sus capitalistas eran poca cosa: tenderos, comerciantes e industriales a pequeña escala. En la década de 1770, una *fábrica* de una docena de trabajadores era una gran empresa. Las regulaciones gremiales, que habían gobernado la práctica económica desde la Edad Media, se disolvían, y para sustituirlas se habían introducido unas pocas normas y leyes externas. No había organizaciones sindicales ni grandes corporaciones –y mucho menos multinacionales–. El mercado estaba extraordinariamente fragmentado, algunos dirían que estaba *atomizado*. Pero incluso de acuerdo a sus propios términos, la teoría económica de Smith era demasiado simple para comprender la historia. No era más que un principio al que todavía le faltaba el tipo de certidumbre que la física newtoniana había dado a la física.

En cualquier caso, sí es posible darse cuenta de que esa primitiva teoría económica traiciona su aspiración implícita de ser una ciencia de la misma estatura. Los intelectuales de la Ilustración sospechaban desde hacía tiempo que eso era posible. “Nada –afirmó Daniel Defoe en 1706– obedece al Devenir de la Naturaleza con mayor exactitud que el Comercio, cuyas Causas y Consecuencias se siguen tan directamente como el Día y la Noche”.⁵ Adam Smith nunca escribió sobre las fuerzas del mercado como tales, pero el concepto de fuerzas causativas análogo a la gravedad de Newton resulta evidente en su obra maestra. Su coetáneo Josiah Tucker, deán de Gloucester, fue más explícito: “Puede decirse que la Circulación del Comercio procede del Impulso de dos Principios de Acción sobre la Sociedad distintos y análogos a las Fuerzas Centrípetas y Centrifugas del Sistema Planetario”.⁶ A principios del siglo XIX, la idea de que la economía, como la física, estaba gobernada por leyes fundamentales e inmutables, había arraigado. Y, en general podría decirse que no ha perdido vigor desde entonces.

La mano oculta de Smith se convirtió en parte del acervo de saberes del mundo empresarial y, para muchos, era una fuerza que la sociedad ocultaba a causa de su peligro.

En 1860, Ralph Waldo Emerson dijo:

La riqueza conlleva sus propios mecanismos de control y equilibrio. La base de la economía política es la no intervención. La única norma segura se encuentra en la autorregulación de la demanda y el suministro. No legisles. Interfiere y estallarás los cimientos gravando lujos.⁷

Los principios económicos de Adam Smith habían empezado a cobrar el aura de leyes del mercado físicas e inmutables y parecían prometer la atractiva posibilidad de una economía estable y tranquila. Si el mercado se quejaba era porque alguien le había metido el dedo en el ojo. Emerson también dijo:

Las leyes de la naturaleza se manifiestan a través del comercio, igual que una pila manifiesta los efectos de la electricidad. El nivel del mar no se mantiene con mayor seguridad que en la sociedad el equilibrio de valores mediante la oferta y la demanda; y el arti-

ficio, o legislación, se castiga a sí mismo con reacciones, beneficios exagerados y bancarrotas. Las leyes sublimes rigen independientemente de que se trate de átomos o de galaxias.⁸

El problema es que nadie, ni siquiera ahora, ha descubierto cuáles son esas leyes. Pese a la elegancia de las palabras de Emerson, es evidente que las consideraciones sobre la oferta y la demanda no bastan para explicar la conducta a veces salvaje del mercado. Los modelos económicos se han visto engrosados, refinados, adornados o decorados con barrocas guirnaldas. En la actualidad, algunos de esos modelos rivalizan en complejidad matemática con los que han elaborado los físicos. Y sin embargo, todavía carecen de sus principios “newtonianos”, de leyes fundamentales sobre las que todo el mundo esté de acuerdo.

Esto no se debe a la incompetencia de los economistas. Por el contrario, las mentes económicas más refinadas igualan a las de cualquier ciencia natural. Pero ello significa que los modelos económicos persisten en la inconsistencia, en el sentido de que fracasan repetidamente a la hora de hacer predicciones ajustadas, que es algo de lo que los modelos científicos son rutinariamente capaces. Y no son sólo los científicos los que señalan esto; dentro de la comunidad económica son muchos los que lo admiten. Como afirma John Kay, de la London Business School, “Los analistas económicos [...] suelen decir más o menos lo mismo al mismo tiempo, el grado de coincidencia es asombroso. [Pero] lo que dicen casi siempre está equivocado”.⁹ Y siempre ha sido así. Una semana antes del gran *crack* de octubre de 1929 –el mayor de la historia–, Irving Fisher, de la Universidad de Yale, quizás el economista más distinguido de su tiempo, afirmó que la economía estadounidense había llegado a una “meseta elevada y permanente”.¹⁰ Tres años más tarde, la renta nacional había caído más de un cincuenta por ciento. Ni un solo economista, ni uno solo, había visto venir el desastre.

En la pasada década, los físicos estadísticos han empezado a sugerir que los economistas podrían querer reflexionar acerca de algunas de las suposiciones básicas sobre las que han construido sus modelos. Importando ideas de la física, dicen los físicos, los economistas pueden empezar a extraer sentido del comportamiento errático e impredecible de los mercados mundiales. Este empeño ha acuñado su propio neologismo: *econofísica*. ¿Cómo han reaccionado los economistas a este cerco de su

territorio? Algunos creen haber topado con el ensordecedor silencio de la indiferencia, interrumpido tan sólo por algunos estallidos de irritación. Entretanto, hay economistas que consideran que el aparente aislamiento de los econofísicos es voluntario. Señalan que la economía siempre ha sido una disciplina ecléctica y católica, poco atenta a las filiaciones profesionales. Lo que importa, dicen, no son las credenciales académicas, sino si las nuevas ideas son *útiles*. Se preguntan hasta qué punto la contribución de la física les puede ser verdaderamente útil.

Es cierto que los físicos no siempre han hecho su tarea más fácil. Como grupo, no son precisamente famosos por su tacto y humildad a la hora de señalar las carencias, tal y como ellos las perciben, de otras áreas del saber humano. Y las cosas que interesan a los físicos no siempre interesan a los economistas. Además, los físicos están acostumbrados a sistemas cuyas leyes fundamentales se mantienen invariables en todo tiempo y lugar. Casi no existen dudas de que las leyes económicas no son así, lo cual es una de las razones de que la economía sea más difícil que la física pura. (El economista Paul Krugman se consuela con la siguiente idea: "Por fortuna, no es tan difícil como la sociología".)¹¹ Y sin embargo, parece inevitable que, con el tiempo, esas tensiones se rebajen, los malentendidos se resuelvan y cada bando salga de su trinchera para negociar pactos y treguas. Varios economistas importantes ya escuchan con respeto –y cautela– lo que los físicos tienen que decir. Y la mayoría de los econofísicos están demasiado impacientes por inmiscuirse en la discusión, porque se cuestione su temblorosa adscripción a los principios y conceptos de la economía, por encontrar un terreno común.

El primer instinto de los físicos no siempre es compartido por los economistas: aprender de la experimentación. Ante todo, desean saber qué fenómenos fundamentales de la economía habría que explicar. Pero, en realidad, en economía existe un único experimento frente al que contrastar la teoría, un experimento ingente y en proceso. ¿Qué ocurre en el mercado real?

LA LEY DE HIERRO

El modelo de mercado de Smith era puramente descriptivo. Pero en el siglo XIX, la confianza en la ciencia y, concretamente, en una des-

cripción mecanicista del mundo era tan extraordinaria que parecía posible que su abrazo lo abarcara todo. Por eso los economistas apostaron por el rigor de las matemáticas. Jeremy Bentham (1748-1832) fue uno de los primeros en proponer que los altibajos del comercio y la producción podían cuantificarse en términos puramente matemáticos. Su filosofía utilitarista, a la que llamó "el cálculo hedonista", se basaba en una visión más amable de la sociedad que la de Hobbes o Adam Smith y proponía que el objetivo del hombre no debía ser maximizar el poder ni el beneficio, sino el "placer", si bien es cierto que mediante una especie de frío cálculo de los pros y los contras.

A partir de esta imagen del hombre como "máquina de placer", en 1881, el economista irlandés Francis Edgeworth (1845-1926) llevó el enfoque matemático a una de sus primeras cumbres. Pese a lo exótico que ahora nos parece su título, su obra *Mathematical Psychics [Psicología matemática]* fue un intento de desarrollar una historia precisa de la conducta política, social y económica repleta de abstrusos cálculos diferenciales y con una buena dosis de análisis estadísticos. Edgeworth fue el precursor de un maremágnum de teorías que, apartándose todavía más de todo contacto con el mundo real, trataron de subsumir el comportamiento humano bajo resmas de complejos cálculos. Según Paul Krugman, es una tradición que sigue viva y goza de buena salud en la economía moderna: "Es una afirmación cínica pero cierta decir que en el mundo académico las teorías que más probabilidades tienen de atraer seguidores devotos son aquellas que permiten a un joven listo pero no muy original demostrar su sapiencia".¹²

Pero las teorías económicas *científicas* más influyentes del siglo XIX, al menos desde un punto de vista político, se las debemos a un judío alemán inmoderado que casi toda su vida sufrió el azote de la pobreza: Karl Marx (1818-1883).

Desde el punto de vista de Adam Smith, el trabajo no era más que otro producto dentro del mercado. El trabajador era un comerciante que comerciaba con su tiempo y su sudor. Esta mercantilización del trabajo fue producto de la Revolución Industrial, de la que surgió una clase de hombres y de mujeres que, al contrario que los artesanos de la Edad Media, no eran mucho más que muchos pares de manos. Estas manos estaban preparadas para manejar maquinaria, palear carbón o efectuar el número cada vez mayor de trabajos no especializados que exi-

gía la división del trabajo en un sistema fabril. A cambio, estos trabajadores “proletarios” recibían un salario.

Adam Smith sostenía que los salarios alcanzaban su valor “justo”, igual que cualquier otro producto del mercado: el trabajador más barato se hacía con el mercado. Esto significaba que el valor “verdadero” o “fundamental” del trabajo fuera un salario de subsistencia –un trabajador no podía permitirse trabajar por menos, mientras que aquellos que pedían más, no eran contratados–. Así pues, el economista David Ricardo (1772-1823) señaló a principios del siglo XIX que el capitalista industrial siempre podría contratar mano de obra por no más de lo que costaba mantenerla con vida: ésta es la macabra Ley de Hierro de los Salarios de David Ricardo. Y normalmente, los patrones se limitaban a hacer eso. En realidad, a veces el proletariado ni siquiera tenía garantizada su subsistencia.*

Marx consideró las perspectivas de futuro del sistema capitalista. Sus conclusiones auguraban esperanza para los trabajadores oprimidos y dificultades para sus patrones. El capitalismo, afirmaba Marx, está condenado a agotarse y a ser derrotado por la revolución proletaria. No se trataba tan sólo de ilusiones ni del resultado deseado de ningún imperativo moral. Marx creía que podía demostrar sus vaticinios con rigor científico. El enfoque de Marx parecía el epitome de la deducción de la realidad a partir de un modelo científico: idealizó, simplificó, descartó irrelevancias. Su paisaje económico describía una sociedad de dos capas constituida tan sólo por trabajadores (que venden su trabajo a cambio de un salario) y propietarios industriales capitalistas (que compran trabajo y venden productos).

Los capitalistas buscan el beneficio. Pero como Smith había señalado, los beneficios siempre se ven erosionados: porque los salarios suben y porque hay competencia, que siempre tira de los precios hacia abajo, hacia su coste de producción. La única forma de que una empresa pueda mantener los beneficios es con la expansión. Lo cual, afirmaba Marx, supone

* Adam Smith señaló que los salarios de subsistencia no son iguales tan sólo al coste de mantener vivo a un trabajador: “en la mayoría de las ocasiones han de ser algo superiores, de otro modo le resultaría imposible mantener una familia y esa especie de trabajadores no podría sobrevivir más que una generación”. Smith no refrendaba la miseria absoluta que llevan implícitas sus palabras, pero ésa era la realidad de su mundo, un mundo en el que “la mitad de los niños nacidos [...] mueren antes de la edad adulta” (A. Smith *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, versión abreviada, L. Dickey (ed.), Indianapolis, Hackett Publishing Co., 1993, p. 33.) Sin embargo, el mundo de la era industrial no era tan implacable: los salarios reales se duplicaron durante la época victoriana.

una búsqueda constante de mano de obra adicional. Este incremento en la demanda de mano de obra permite que los trabajadores pidan una subida de salarios, lo cual vuelve a recortar el margen de beneficio de los capitalistas. Marx daba por hecho que, para escapar a este ciclo, los propietarios de las fábricas harían lo que vio que hacían a su alrededor: introducir maquinaria para ahorrarse trabajadores. Así pues, el modelo económico de Marx acepta el cambio tecnológico. Esto se ha convertido en un elemento crucial de la teoría económica moderna, lo cual está bien, porque las nuevas tecnologías continúan cambiando la demanda de trabajadores del mercado a un ritmo al menos igual que en tiempos de Marx.

Y ahí está la trampa. En una jornada laboral (que a mediados del siglo XVI podía llegar a las dieciséis horas), los trabajadores pueden producir bienes por más valor que el de un salario de subsistencia. Esta “plusvalía” en trabajo es donde los capitalistas obtienen sus beneficios. Las máquinas, sin embargo, no ofrecen plusvalía –en un mercado competitivo, los industriales tendrán que comprarla por un precio igual al de los bienes que puede producir–. Por lo tanto, la mecanización deja sin empleo a los trabajadores y, al mismo tiempo, no salva los beneficios de los capitalistas.

El resultado es la recesión económica: los salarios son bajos y el desempleo crece. A mediados del siglo XVI era ya evidente que el mercado era proclive a las recesiones, como la que causó la célebre Burbuja de los Mares del Sur en 1720, pero se las desestimaba en tanto que consecuencia de algún factor externo que perturbaba “el curso normal de la economía”. Se creía que, abandonado a su suerte, el mercado adquiriría un equilibrio natural, a la manera sugerida por Smith. Por el contrario, Marx daba por hecho que las recesiones son parte inevitable del funcionamiento del mercado.

Son, no obstante, pasajeras. Cuando los salarios bajan, el margen de beneficio vuelve a crecer y para los capitalistas es más viable volver a contratar a nuevos trabajadores y ampliar su negocio. La economía se revitaliza. Así pues, la recesión lleva implícita su propia cura. Por la misma razón, un *boom* económico es autolimitador, porque dispara los sueldos y reduce el beneficio. Se trata una vez más de un mercado autorregulado. Pero no es el mercado estable y equilibrado de Adam Smith, sino que está acosado por ciclos de crecimiento y recesión.

Un físico o un ingeniero se darán cuenta de inmediato de que Marx había identificado un mecanismo de *retroalimentación negativa*: proceso

en el cual un cambio modera su propia causa. En general, la retroalimentación negativa abunda en la estabilidad, puesto que devuelve al sistema a un estado estable del que las fluctuaciones lo apartan. En realidad, un científico objetará con razón que, en realidad, el esquema de Marx no asegura, como él suponía, los ciclos crecimiento-recesión. Esto ocurrirá sólo si la retroalimentación negativa compensa el cambio por exceso, haciendo que el péndulo oscile en la dirección opuesta. En la formulación de Marx no hay nada que haga esto inevitable.

Ahora bien, la visión económica de Marx contenía el concepto crucial de un mercado potencialmente inestable y con tendencia a oscilar entre el *boom* y la recesión. Y en la teoría marxista, estas fluctuaciones son un elemento intrínseco e irreductible del sistema, no algo impuesto desde fuera. ¿Por qué razón, sin embargo, debería un mercado fluctuante estar destinado al desastre y no a una perpetua fluctuación? En esto uno no puede evitar la impresión de que los presupuestos políticos de Marx condicionaron su pensamiento analítico. Cada recesión, afirmaba, será peor que la anterior, porque en cada una de ellas irán a la bancarrota empresas cada vez mayores. Al final, la pobreza causada por la escasez de producción, el desempleo y los salarios bajos durante una profunda recesión impulsarán una revolución proletaria. “Por tanto, lo que la burguesía produce en última instancia –dijo Marx– es a sus propios enterradores”.¹³

Llegada la revolución, la propiedad privada cesará y los medios de producción pasarán a control comunal. *El manifiesto comunista*, que Marx escribió junto con Friedrich Engels, quería acelerar este final con una llamada a las armas: “Que las clases gobernantes tiemblen ante la revolución comunista. Los proletarios no tienen nada que perder salvo sus cadenas. Tienen un mundo que ganar”.¹⁴ En realidad, el proletariado tenía más que perder que lo que tenía por ganar, como pronto descubrió en Francia, Austria y Alemania, donde los intentos de revolución de 1848 sufrieron una violenta represión. En Rusia, obviamente, la historia fue distinta.

¿PUEDE EL MERCADO SER ESTABLE?

Aunque su prognosis histórica no sea acertada, la verdad es que Marx le encontró el pulso a la economía capitalista. Un pulso que parece tartamudear. Las marcadas fluctuaciones del mercado parecen una burla de

todos esos economistas que tratan de construir modelos sobre el funcionamiento del comercio y la actividad económica. Esos saltos caóticos entre el florecimiento y la recesión revelan, más que ninguna otra medida, la disparidad entre la teoría y la práctica económicas. Una gran parte de la teoría desarrollada desde Marx puede ser rotundamente calificada de intento fútil de domar lo indomable.

Nada es más indicativo de la desesperación derivada de esto que la insistencia en hablar de “ciclo económico”. A los físicos tanta insistencia casi les resulta ofensiva. Repasemos las fluctuaciones de la economía estadounidense en el siglo pasado, según los cambios del porcentaje anual de la producción nacional per cápita. Recurrir a esta magnitud (más que a las cifras absolutas) como medida del “tamaño” o “salud” de la economía tiene la ventaja de que elimina los efectos de la inflación y de la expansión empresarial, que dan pie a una tendencia global alcista de la producción. En una economía estable, el cambio relativo se mantendría en cero. En la realidad, fluctúa hasta un veinte por ciento (véase figura 8.1a).

Cuando los economistas hablan de ciclo económico, se refieren al hecho de que las épocas de máximo florecimiento –los picos del gráfico– se ven seguidas de recesiones, o valles.* Pero en realidad, un ciclo es algo que ocurre repetidas veces con el mismo intervalo, esto es, periódicamente, como el cambio de las estaciones o el balanceo de un péndulo. En la figura 8.1a hay muchos picos seguidos de muchos valles, pero ¿puede alguien percibir algún ritmo constante en ese gráfico? El gráfico parece reflejar las interferencias de una señal de radio recogidas por un osciloscopio. En otras palabras, parece el gráfico de un ruido. Y en realidad es peor que eso. Los datos que recoge ese gráfico son anuales, es decir, sólo aparece un punto por año. La figura 8.1b registra la tasa de crecimiento trimestral del producto nacional bruto real de Estados Unidos, una medida similar del tamaño de la economía estadounidense. Ahora los puntos que reflejan los datos se han recogido cada tres meses y comprobamos que, a escala más pequeña, el azar se mantiene. ¿Ciclos económicos? ¿Dónde?

* En cierto grado, la palabra “ciclo” se emplea simplemente para indicar que todo el sistema económico se ve afectado de la misma forma: el crecimiento o decrecimiento se aplica transversalmente a distintos sectores económicos, aunque entre ellos no haya relación directa. Lo cual, sin embargo, no impide que la elección de esta palabra sea menos engañosa.

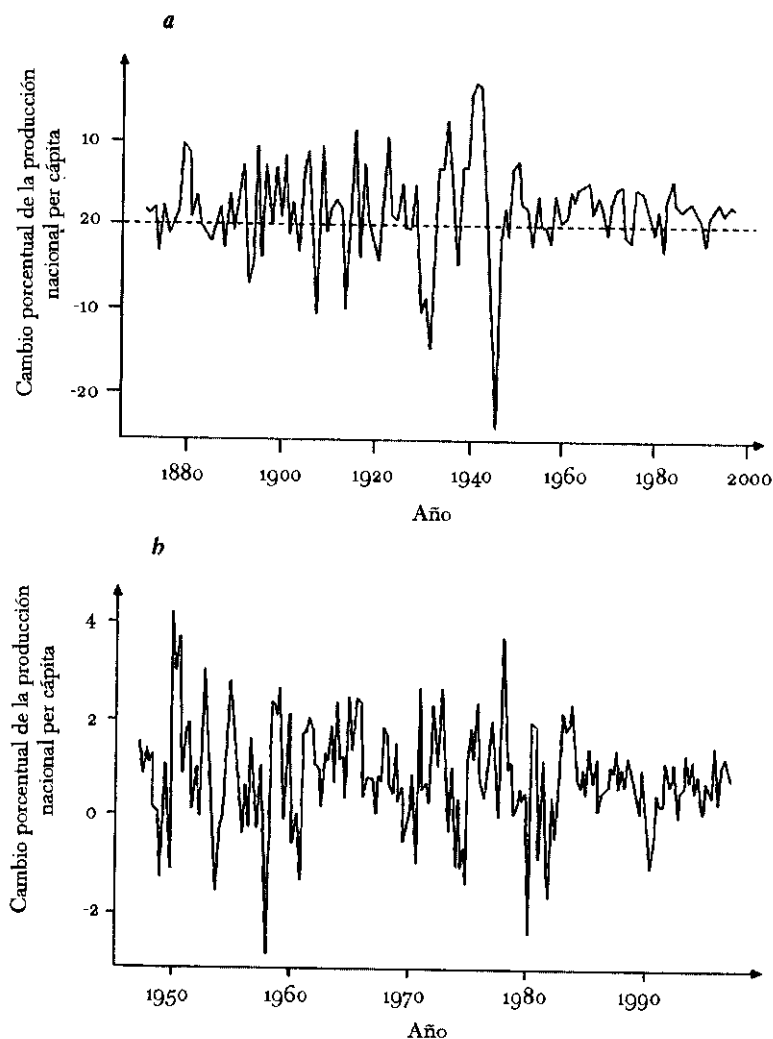


Figura 8.1. (a) La producción nacional per cápita de Estados Unidos puede fluctuar anualmente hasta un veinte por ciento, de forma que parece totalmente impredecible. (Adviértase la diferencia entre las fluctuaciones antes, durante y después de la Segunda Guerra Mundial, lo cual demuestra que los acontecimientos externos pueden tener un enorme impacto en la economía.) (b) La tasa de crecimiento trimestral del producto nacional bruto real de Estados Unidos muestra cómo fluctúan las cifras económicas en una escala de tiempo menor.

Y sin embargo, el ciclo económico es parte del dogma económico estándar. El término traiciona un deseo de imponer orden en el caos. Algunos economistas han asegurado que perciben periodicidad –regularidad– en la recurrencia del florecimiento y la recesión. Pero al hacerlo, esperaban ser capaces de prever cuándo ocurriría el siguiente *crack* y, por tanto, evitar la clase de catástrofe que arruinó tantas inversiones y acabó con tantas vidas en 1929. El austriaco Joseph Schumpeter afirmó en los años cuarenta que existían al menos tres ciclos económicos: uno a corto plazo, otro de siete u once años y otro con un periodo de alrededor de cincuenta años. El aparente azar de las fluctuaciones era, dijo, resultado de las interacciones extemporáneas que ocurrían fuera de esos tres ciclos. La Gran Depresión la causó la coincidencia en la parte baja de los tres ciclos.*

Hay que aplaudir, que no alabar, la ingenuidad de los economistas a la hora de querer ver un comportamiento cíclico en los paroxismos del mercado. En la década de 1930, por ejemplo, un contable estadounidense retirado llamado Ralph Elliot afirmó que los mercados crecen o menguan de acuerdo a unos tramos de ocho fases que consisten en cinco ondas “de avance” y tres ondas “de retroceso”.** Era una norma, decía, que podía discernirse en varios marcos temporales, desde las fluctuaciones diarias a superciclos que duran más de doscientos años. Por lo tanto, las ondas de Elliot dividen cada ciclo en etapas cuya estructura recuerda la famosa secuencia de Fibonacci, en la cual cada número es la suma de los dos anteriores: un ciclo puede dividirse en dos partes (declinante o “correctiva” y progresiva o “impulsiva”, las fases bajista y alcista de la economía), compuestas respectivamente de tres y cinco ondas, lo cual da la secuencia: 1, 1, 2, 3, 5, 8... Las subdivisiones a pequeña escala de estas ondas dan números más altos en la secuencia de Fibonacci. Con esta pieza de numerología, construida de manera ostensible a partir de la teoría de los mercados alcistas y bajistas de Charles Dow, analista de Wall Street, algunos especuladores juegan todavía hoy con la

* Para Paul Krugman, el estudio en dos volúmenes *Ciclos económicos*, de Schumpeter, es “ampuloso, casi sin sentido” (Krugman, p. 26.) En realidad, comenta que todos los intentos por refrendar en la realidad la teoría de los ciclos económicos han llevado a muchos economistas a escribir sus peores obras. Evidentemente, la cuestión de los ciclos les deja tan perplejos como inquietos.

** Elliot tenía un buen motivo para intentar comprender las fluctuaciones del mercado, porque había perdido su empleo y buena parte de sus ahorros a consecuencia del *crack* de Wall Street.

secuencia de Fibonacci y la “proporción áurea” que la serie encierra, llevados por una fe casi mística en los significados secretos.

Schumpeter enumeró toda una serie de ciclos económicos supuestamente periódicos: los ciclos de Kitchin, ciclos de Juglar, ciclos de Kuznets y Kondratieff. Los últimos son particularmente notorios. El ruso Nikolái Kondratieff afirmó en 1926 que las economías capitalistas pasan por ciclos de crecimiento y recesión que duran entre cincuenta y sesenta años. Que esto se identificara o no (eso esperaba el economista ruso) con un defecto fatídico del sistema capitalista, no protegió a Kondratieff del régimen estalinista cuando sostuvo la *reaccionaria* idea de que había que devolver a los campesinos las tierras que el Partido les había expropiado. Kondratieff fue desterrado al gulag, donde, llevado por la locura, murió en 1938. Algunos economistas insisten en que las ondas de Kondratieff aparecen en la historia a largo plazo de los mercados occidentales: afirman que identifican una con la Revolución Industrial, desde 1787 hasta 1842, otra con el periodo “burgués” desde 1843 hasta 1897, una tercera con la expansión de la energía eléctrica y la fabricación de automóviles en la primera mitad del siglo XX, y una cuarta que iría desde la posguerra hasta el presente. Pero, sencillamente, no contamos todavía con un periodo histórico lo bastante largo para identificar ciclos tan a largo plazo con ninguna convicción estadística. Con esas escalas temporales, hay que sospechar que un modelo cíclico es más una forma de sistematizar la historia que un modo de entender la economía.

La verdad es que las depresiones y las crestas de la economía se niegan rotundamente a plegarse a ninguna predicción, lo cual hace que los intentos de elaborar teorías cíclicas de la economía se parezcan cada vez más a los elaborados planes de Ptolomeo para predecir el movimiento de los planetas sin renunciar a la idea de un universo geométrico (sólo que, por lo menos, en el movimiento de los planetas *hay* cierto ritmo subyacente). Irving Fisher admitió en 1925 que los ciclos económicos podrían ser inherentemente impredecibles, una idea que pareció olvidar cuatro años más tarde.

Tras no poder domar esas descuidadas irregularidades con ideas de periodicidad, los economistas intentaron desterrarlas de la teoría económica convencional. Aunque el pionero análisis de Marx de los ciclos de florecimiento y recesión situaba las causas de las fluctuaciones en los mecanismos internos del sistema económico (es decir, la *suya* era, según

la jerga, una teoría *endógena*), el objetivo pronto pasó a ser la búsqueda de los factores externos que motivan los paroxismos de un mercado potencialmente estable. Esto es cierto de la teoría económica convencional de hoy en día, porque, al parecer, para muchos la idea de un mercado inherentemente inestable es tan incómoda que ni siquiera se atreven a contemplarla.

Schumpeter, por ejemplo, propuso que los ciclos de cincuenta años de Kondratieff estaban asociados a episodios de grandes avances tecnológicos que transforman los medios de producción y, por tanto, alteran el sistema económico que alimentan. La idea de la tecnología como una perturbación externa al sistema económico resurge en la actualidad en una de las teorías económicas más ortodoxas, de la cual hablaremos en el capítulo IX. Entretanto, en la década de 1870, el economista británico Stanley Jevons intentó explicar que los ciclos económicos son una consecuencia del ciclo solar —idea que, aunque equivocada, no es tan exótica como pueda parecer—. Las manchas solares aumentan en número cada once años, lo cual es un síntoma de los cambios periódicos de la radiación solar. Jevon sugirió que esos cambios afectan a las cosechas y, por lo tanto, al precio del grano, cuyos cambios dan pie a las correspondientes variaciones en el resto del mercado.

A veces, los economistas atribuyen a las fuerzas del mercado una extraordinaria influencia estabilizadora. Hablan en términos de equilibrio de los mercados: un estado estable en el que todos los indicadores se encuentran en un nivel equilibrado e ideal. La oferta se ajusta para satisfacer la demanda, de forma que los mercados siempre “se aclaran”: no hay pérdidas y los artículos se distribuyen de forma que la sociedad obtenga el mayor beneficio.* Este estado, llamado “óptimo de Pareto” en honor al sociólogo y economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923), permitiría que el sistema capitalista discurriera con eficacia y suavidad de no ser por la perturbadora influencia de factores exógenos y de la intromisión de los gobiernos. Sin embargo, incluso cuando no se producen tales

* En 1958, M. F. M. Osborne, posiblemente el primer econofísico, puso en tela de juicio la ley de la oferta y la demanda de Adam Smith, que proporcionan la “mano oculta” que, supuestamente, es la responsable de ese equilibrio. Osborne cuestionó la suposición fundamental de que los precios dependían directamente de la demanda del consumidor. Es una cuestión que hoy en día todavía se debate, aunque empíricamente hay evidencias de que los precios bajan cuando la demanda sube, según creía Adam Smith.

perturbaciones, conseguir el óptimo de Pareto en los modelos de economía convencional exige ciertos presupuestos que guardan poca relación con el mundo real.

En un *tour de force* matemático, el economista francés Léon Walras (1834-1910) formalizó el concepto de equilibrio de mercado y su obra dio pie a una “teoría general del equilibrio” que dominó el pensamiento económico durante la mayor parte del siglo XX. El problema es que esa teoría se basa en suposiciones sobre el funcionamiento de las relaciones comerciales y la conducta de los comerciantes que son patentemente absurdas; y cuando se prescinde de esas suposiciones la teoría se viene abajo. Pero la fe en un Santo Grial del equilibrio sigue siendo endémica en la práctica económica y ha engendrado la firme creencia, particularmente entre los asesores económicos de los recientes gobiernos estadounidenses, de que la desregulación –liberar el mercado de cualquier carga y obstáculo– es el mejor modo de mantener la salud de la economía y de permitir el crecimiento y la creación de riqueza.

Un economista eminente que recogió el testigo de Marx a la hora de argumentar que las fluctuaciones son intrínsecas al sistema económico fue John Maynard Keynes (1883-1946). En la década de 1930, Keynes intentó explicar la recurrencia de las crisis y los *booms* de la economía analizando el flujo de renta. Keynes señaló que el vigor de una economía se caracterizaba no por la cantidad de riqueza, sino por la cantidad de dinero que cambiaba de manos. Incluso en una economía deprimida puede haber una pequeña proporción de personas fabulosamente ricas que conviven coexistiendo con una masa de trabajadores que apenas tienen para vivir y una alta tasa de paro. Pero en esa situación, los ricos tienden a conservar su dinero en lugar de invertirlo. Mientras el capital siga circulando, una economía puede ser muy floreciente: las empresas amplían su negocio cuando hay capital de inversión al que recurrir y los niveles de empleo y los salarios se mantienen; lo cual, a su vez, estimula el ahorro, la inversión y el crecimiento.

Keynes sugirió que si las personas *congelan* parte de su renta acumulándola en lugar de invirtiéndola, el capital es expulsado del ciclo hasta que, finalmente, se acerca en espiral a la depresión. Según el paisaje dibujado por Keynes, las empresas deben pedir préstamos y ampliarse constantemente a fin de que el capital circule y, así, mantener la salud de la economía –lo cual, a su vez, significa que la producción y el consumo

también se incrementan–. Desde este punto de vista, la estabilidad de la economía depende de su dinamismo: como la Reina de Corazones de *Alicia en el país de las maravillas*, debe mantenerse en movimiento a fin de seguir en el mismo sitio.*

TRAYECTORIAS ALEATORIAS

Irving Fisher no fue el primero en sospechar la presencia del caos en el “ciclo económico”. En 1900, un francés llamado Louis Bachelier propuso que las fluctuaciones en el precio de las acciones, y por consiguiente la estructura subyacente de la economía de mercado, son efectivamente aleatorias. El nombre de Bachelier no suele aparecer en los manuales de economía porque no era economista. Era físico. Preparó su doctorado en la École Normale Supérieure bajo la supervisión del eminente físico y matemático Henri Poincaré, cuya obra proporcionó las bases de la moderna teoría del caos. La tesis de Bachelier era de lo más singular: se titulaba *Théorie de la spéculation* y desarrollaba un modelo económico basado en las ideas de la física. A sus coetáneos les pareció demasiado extraño y, por lo demás, luego Bachelier no causó ningún impacto ni en la ciencia ni en la economía.

Y, sin embargo, lo que consiguió con aquella tesis fue notable. Para elaborar una descripción matemática de las fluctuaciones aleatorias, tuvo que idear lo que acabó siendo una teoría del problema de la trayectoria aleatoria –cinco años antes de que Einstein empezara a granjearse la fama con su propio tratamiento de la cuestión en su célebre estudio sobre el movimiento browniano (véase página 54)–. La dirección del movimiento de una partícula que sigue una trayectoria aleatoria fluctúa de forma impredecible; Bachelier dio por supuesto que los precios hacen lo mismo. Las fluctuaciones son una especie de ruido. En el capítulo II vimos de qué forma ese ruido, “como de estática de radio”, debido a los movimientos erráticos de las partículas, lo impregna todo, así como que su

* Las metáforas hidráulicas a propósito del flujo de la teoría macroeconómica keynesiana no pasaron desapercibidas a algunos de los coetáneos del economista, quienes incluso intentaron construir ingenios mecánicos que, mediante la adecuada manipulación de corrientes de agua, pudieran predecir el curso de la economía. Ésas fueron las primeras “simulaciones” de la economía: torpes, quiméricas, sublimemente newtonianas y, más tarde, obsoletas en cuanto se empezó a trabajar con ordenadores.

amplitud es una medida de la temperatura. Cuanto más caliente está un gas, más pronunciadas son las fluctuaciones de las partículas que lo constituyen. En otras palabras, las fluctuaciones de las partículas que siguen trayectorias aleatorias responden a una *escala* característica, es decir, la desviación de las partículas es de una magnitud determinada.

Una trayectoria aleatoria tiene una descripción matemática bien definida que surge de las estadísticas del proceso. Resulta imposible predecir, en cualquier instante, cómo será de grande el siguiente cambio aleatorio de dirección. Pero si llevamos la cuenta del tamaño de estas fluctuaciones a lo largo de un lapso de tiempo suficiente, enseguida descubrimos una pauta. Imaginemos que dibujamos una gráfica con dos magnitudes: el tamaño de las fluctuaciones y el número de veces en que esas fluctuaciones aparecen. Nos encontraremos con nuestra ya familiar curva campaniforme: la curva de error de De Moivre, en la que Adolphe Quetelet identificó la regularidad secreta de las estadísticas sociales, y que, en la actualidad, generalmente se conoce como “campana de Gauss”. Como descubrieron los estadísticos del siglo XIX, todo conjunto de cantidades cuyos valores estén determinados aleatoriamente encajará en una curva como ésta.

Teniendo esto en cuenta, Bachelier dio por supuesto que los precios de las acciones fluctúan de acuerdo con la campana de Gauss. Era una apuesta segura, especialmente teniendo en cuenta el predominio del comportamiento gaussiano en todas las demás ramas de las ciencias sociales. A continuación construyó un modelo económico que incorporó ese elemento aleatorio a los precios. No intentó explicar a qué se debían las fluctuaciones, sencillamente aceptó que se trataba de una característica que ofrecían los datos.

En la época de Bachelier, los conceptos de ruido y fluctuación eran nuevos para la física. La mayoría de los científicos se interesaron por lo que ocurría *por encima* del nivel de ruido de fondo. Necesitaban saber tan sólo la presión que ejercía un gas sobre la pared que lo confinaba, no las pequeñísimas fluctuaciones de presión que, de microsegundo en microsegundo, causaban las mínimas diferencias en el número de moléculas que golpeaban la pared en instantes sucesivos. En realidad, esas fluctuaciones eran en general demasiado pequeñas incluso para poder ser detectadas con las técnicas de la época, como Maxwell reconoció implícitamente en su teoría cinética.

Hoy en día se admite que el ruido y las fluctuaciones están entre los aspectos más sutiles y significativos de la física estadística. Una de las consideraciones más importantes emergidas de los estudios de tales aspectos es que no todos los ruidos son gaussianos. Sólo porque una serie de datos parezca errática e impredecible, no tiene por qué responder necesariamente a la estadística gaussiana. Si Bachelier hubiera medido escrupulosamente las fluctuaciones del mercado de valores, habría descubierto que su presunción era errónea. Lo podemos comprobar en los datos una vez que sabemos qué es lo que hay que buscar. La figura 8.2 muestra un registro típico de las fluctuaciones de los precios a lo largo del tiempo junto con un gráfico el ruido gaussiano. Evidentemente, las variaciones del mercado no son gaussianas, ocasionalmente están puntuadas por grandes picos, mientras que todas las fluctuaciones gaussianas tienden a mantenerse dentro de una magnitud limitada: tienen una escala típica, igual al ancho de la banda de los picos. Cuando se trata de datos reales, la escala no está tan bien definida.

Otra forma de mostrar la distinción, que nos permite ser bastante más precisos en nuestra comparación, es dibujar un gráfico que muestre cómo la probabilidad de una fluctuación de una medida particular depende de su magnitud: la función de distribución de probabilidades (véase figura 8.3). La curva de error es la función de distribución de probabilidades de las fluctuaciones gaussianas. En las variaciones de mercado no gaussianas de la figura 8.2a, se puede observar que las fluctuaciones pequeñas son más probables que las grandes. La función de distribución de probabilidades nos dice con exactitud la probabilidad de que aparezcan.

Ni siquiera para las fluctuaciones pequeñas están estas estadísticas cerca de una distribución gaussiana. Y en cuanto a las grandes fluctuaciones, las diferencias son pronunciadas: la curva de distribución gaussiana subestima significativamente su probabilidad. En el modelo gaussiano de Bachelier, las grandes fluctuaciones –las crisis y los *booms* bursátiles– eran tan improbables que prácticamente no se veían. El mercado se limitaría a titubear en torno a una situación más o menos estable. Pero, por supuesto, los *cracks* bursátiles existen. Se dice que esos acontecimientos extremos representan los extremos de la función de probabilidades, las partes de la curva que progresan hacia la probabilidad cero. Podríamos preguntarnos si de verdad debería preocuparnos que una teoría se ajuste a los

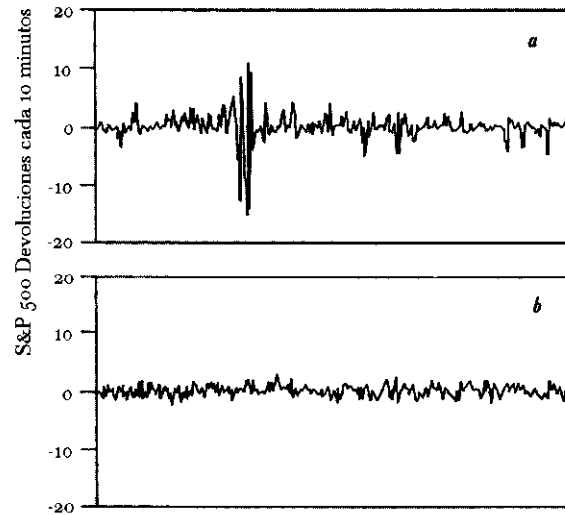


Figura 8.2. (a) Las fluctuaciones del índice 500 de Standard & Poor, una de las magnitudes que típicamente se emplean para medir el estado de la economía estadounidense (véase página 234). Una devolución es la diferencia entre dos valores del índice separados por cierto intervalo de tiempo; aquí el intervalo es de diez minutos. Así que una devolución de cero indica que el índice S&P 500 no ha cambiado en los últimos diez minutos. (b) Las fluctuaciones gaussianas, que cabe esperar para cambios puramente aleatorios, resultan bastante diferentes.

datos de esas partes tan singulares, porque hablamos de fluctuaciones que rara vez ocurren. ¿No es suficiente que el grueso de las fluctuaciones, de las pequeñas fluctuaciones, sí se corresponda con lo que podría ser una curva gaussiana?

No, no lo es. Porque son los acontecimientos extremos los que más preocupan a los analistas económicos: las grandes crisis del mercado. Tratar de comprender la economía con un modelo que no puede incluir los grandes *cracks* es como planificar la gestión hidrográfica para las pequeñas variaciones del caudal de los ríos sin preocuparse de los grandes cambios que motivan las inundaciones catastróficas. Y las desviaciones del comportamiento gaussiano no reflejan grandes crisis como las de 1987 y 1997. Las estadísticas de *booms* y crisis de tamaño moderado se desvían marcadamente de la distribución gaussiana. Lo que ocurre es que el mercado no se comporta de manera aleatoria.

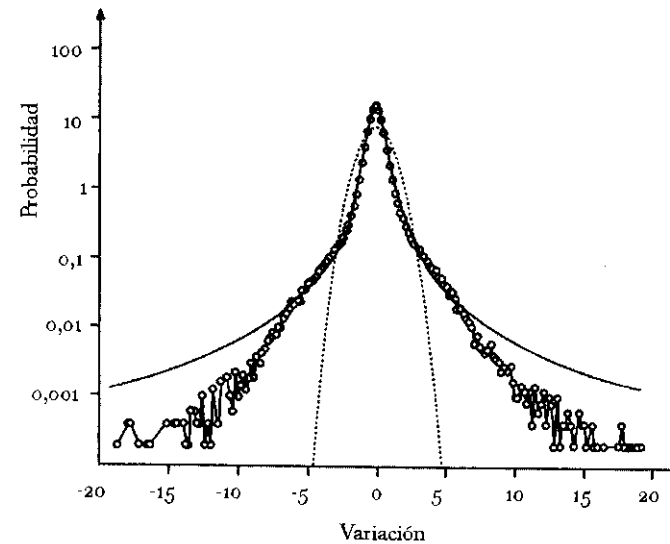


Figura 8.3. La función de distribución de probabilidades de las fluctuaciones del índice S&P 500. En este caso, el intervalo de tiempo de las devoluciones es de un minuto en lugar de los diez de la figura 8.2a. Pero la forma general de la curva es la misma para intervalos de tiempo entre un minuto y al menos un día. Por comparación, la distribución de probabilidades de las fluctuaciones gaussianas (una trayectoria aleatoria) queda recogida en la línea de puntos. La línea continua muestra la función de distribución de probabilidades de un vuelo de Lévy (véase la página siguiente).

COLAS ANCHAS

Si las fluctuaciones no son gaussianas, ¿qué son entonces? En la década de 1960, el matemático Benoit Mandelbrot, popularmente conocido como “el padre de los fractales”, estudió las fluctuaciones de los precios del algodón y reconoció que las trayectorias aleatorias de Bachelier no bastaban para describirlos. Propuso que la distribución de probabilidades de esas fluctuaciones era “de colas anchas”, es decir, parecida a la curva gaussiana para las fluctuaciones pequeñas, pero con colas más largas y elevadas para incluir las grandes fluctuaciones. Esto demandó un gran cambio en el modo en que la dinámica de los mercados se analizaba y modelaba. En 1964, Paul Cootner, de la MIT School of Management, dijo:

Mandelbrot [...] nos obligó a enfrentarnos de una forma sustantiva a esas observaciones empíricas incómodas que, hay poca duda, la mayoría de nosotros habíamos barrido debajo de la alfombra hasta ahora. Había conseguido pruebas de una visión más complicada y mucho más perturbadora del mundo económico de la que los economistas habían refrendado hasta entonces.¹⁵

Mandelbrot propuso que, en lugar de seguir una trayectoria aleatoria a través de un amplio registro de posibles valores, las variaciones de los precios ejecutan un “vuelo de Lévy”, nombre que dio en honor al matemático francés Paul Lévy (1886-1971), que introdujo la idea en 1926.

Un vuelo de Lévy es como una trayectoria aleatoria ocasionalmente jalonada por grandes saltos.* Así es como algunos animales buscan pasto. Exploran una pequeña área deambulando a voluntad, pero si no encuentran alimento, se desplazan rápidamente a una nueva zona donde hacen lo mismo. Esto puede ser más eficaz que limitarse a seguir una trayectoria aleatoria por todo el terreno, puesto que salen antes de las zonas donde es poco probable que encuentren lo que buscan. De los sistemas que siguen este tipo de comportamiento dinámico se dice que son procesos estables de Lévy. Mandelbrot sugirió que las fluctuaciones de los mercados económicos están gobernadas por tales procesos y que, ocasionalmente, los grandes saltos están comprendidos en las funciones de distribución de probabilidad de las fluctuaciones. Lo importante de esta afirmación es advertir que es descriptiva, igual que la formulación de Bachelier de las trayectorias aleatorias. Es una forma de describir las fluctuaciones sin proponerse explicar cómo llegan a ser así.

La economía de aquel tiempo fue refractaria a los modelos puramente descriptivos. El enfoque de la mayoría de los economistas académicos era trabajar no a partir de datos sino de principios. Elaboraban modelos basados en suposiciones sobre la forma de operar del mercado y veían lo que habían previsto. Las predicciones de los modelos rara vez se contrastaban con los datos puros y duros. El economista Paul Ormerod sostiene que la tradición científica de reunir datos frente a los cuales pueda

* Técnicamente hablando, un vuelo de Lévy es una trayectoria aleatoria en la que el tamaño de cada tramo corresponde a una ley de potencias de la función de distribución de probabilidades (véase la página 270): los tramos pueden tener cualquier tamaño, pero su probabilidad decrece a medida que son mayores. En una trayectoria aleatoria normal todos los tramos son del mismo tamaño.

contrastarse la teoría no ha calado en la ciencia económica hasta las últimas décadas. Así pues, manejar datos reales era una idea que muchos economistas no contemplaban; *empezar* por los datos debió de parecerles muy raro.*

LA FORMA DEL CAMBIO

Desde mediados de los años sesenta, la descripción estable de Lévy que llevó a cabo Benoit Mandelbrot ha sido gradualmente aceptada por muchos economistas académicos. Por su parte, quienes practican la economía –comerciantes y sus asesores, que pretenden aprovechar los modelos económicos para hacer previsiones reales– tienden a insistir en la idea de que las fluctuaciones son gaussianas. En parte, esto tiene una razón pragmática: el ruido gaussiano, aleatorio, es relativamente fácil de comprender intuitivamente y de manejar matemáticamente, mientras que el vuelo de Lévy no lo es. Estos economistas pragmáticos confían en que la naturaleza precisa de las fluctuaciones del mercado no importará demasiado en sus cálculos.

Pero el hecho es que los vuelos de Lévy proporcionan una descripción imperfecta de las fluctuaciones reales del mercado. En 1995, los físicos Rosario Mantegna y Gene Stanley, de la Universidad de Boston, llevaron a cabo el análisis de más de un millón de datos de un índice de mercados estándar –cinco años de datos económicos– a fin de descubrir su comportamiento estadístico. Estudiaron las estadísticas de las “devoluciones”: la diferencia entre el valor del índice en dos momentos separados por algún intervalo específico; de un día al siguiente, o de hora en hora o entre un mes y el siguiente. Las devoluciones son una medida de las fluctuaciones del mercado: cuando el índice se mantiene estable de un momento al siguiente, la devolución es cero. Mantegna y Stanley utilizaron el índice 500 de Standard and Poor: la suma de la capitalización de mercado de las quinientas empresas más importantes de los Estados Unidos, elegidas por el tamaño de su cuota de mercado, su estado de liqui-

* Por supuesto, no todos los economistas han compartido esta actitud. En realidad, dos años después que Mandelbrot, y de forma independiente, el economista Eugene Fama sostuvo que las fluctuaciones de los precios siguen una distribución de probabilidades de Lévy estable.

dez y la diversidad de industrias que representan. Se supone que ese índice es un buen resumen del estado de la economía estadounidense.

En la figura 8.3 se ve lo que encontraron Mantegna y Stanley. Desde luego, no se trata de ninguna trayectoria azarosa. Las fluctuaciones más pequeñas casan bastante bien con la probabilidad de distribución de un proceso estable de Lévy. Pero las fluctuaciones más importantes se desvían de la curva, quedando en realidad en algún lugar entre la curva gaussiana y el proceso de Lévy. En otras palabras, si la descripción de Bachelier de las fluctuaciones subestima la frecuencia de acontecimientos importantes, la descripción de Mandelbrot de las colas anchas la sobreestima. En este punto parece producirse un cruce entre el proceso estable de Lévy para las pequeñas fluctuaciones y algún otro tipo de comportamiento para las más grandes.

La distribución estadística de las fluctuaciones de mercado parece ser la misma para un amplio abanico de intervalos de tiempo entre sucesivas recogidas de datos. Rosario Mantegna y Gene Stanley observaron que las estadísticas minuto a minuto de las devoluciones del índice 500 de Standard and Poor son las mismas que para las que han sido recogidas de hora en hora y de día en día. En otras palabras, el comportamiento del mercado parece el mismo en distintos niveles de magnitud temporal (dentro de ciertos límites, como explico más abajo). Es una forma de decir que las fluctuaciones no tienen ningún tamaño característico, que, a diferencia de las fluctuaciones gaussianas no se corresponden con ninguna escala —como ya hemos visto, siempre tienen cierto tamaño físico—. Si ampliásemos una parte de un gráfico como el de la figura 8.2a (página 230), obtendríamos una línea quebrada muy parecida a la original. Podemos ampliar sólo un día de las fluctuaciones de una semana y a continuación sólo una hora de ese día y luego sólo un minuto de esa hora, y en todos los casos veremos el mismo tipo de gráfico de líneas quebradas.*

* Más exactamente, la *magnitud* de las variaciones depende de la duración de los intervalos temporales: es más probable que una devolución grande se acumule durante un día que que ocurra en un momento. Para permitir esto hay que reajustar las líneas del gráfico con distintos tramos temporales. Es como reajustar dos funciones de distribución de probabilidades de la altura de los niños —por ejemplo, para un colegio y para todo un país— de manera que para ambas valga la misma curva gaussiana (véase página 113). Ese reajuste no afecta a la forma matemática de las curvas, tanto si son gaussianas, estables de Lévy o de otro tipo.

Esta similitud de forma entre escalas es una característica de las estructuras fractales mencionadas en el capítulo 5. Es una característica de muchas formas naturales como las cordilleras y las costas. Benoit Mandelbrot dio nombre a los fractales y fue el primero en deducir que los altibajos de los mercados tienen propiedades fractales. Pero con su distribución estable de Lévy, simplificó la forma matemática precisa de esas propiedades.

Así pues, ¿cómo es esa forma? Cuanto más lo observamos, más sutil parece. No hay una sola curva que sirva para el conjunto de la distribución estadística de las fluctuaciones del mercado —depende, por ejemplo, de lo prolongada que sea la variación (en términos porcentuales) que se observa y en qué escala temporal—. Aunque la distribución que aparece en la figura 8.3 parece abarcar una amplia gama de escalas temporales, para intervalos muy prolongados (por ejemplo, de varios meses), la distribución empieza a parecerse más a una curva gaussiana. (Ésa es una de las razones de que haya que mantener el escepticismo ante la posibilidad de que una sola teoría explique el funcionamiento del mercado en su conjunto.) Y sin embargo, por escurridizo que pueda parecer, este comportamiento estadístico es coherente con los mercados: el índice 500 de Standard and Poor muestra el mismo comportamiento que el índice Nikkei de Tokio y que el índice Hang Seng de Hong Kong. Al parecer, los mercados capitalistas funcionan según una pauta estadística universal.

Lo que sigue sin saberse es si las grandes crisis bursátiles son típicas o atípicas de las fluctuaciones del mercado. Evidentemente, son típicas en el sentido de que no ocurren a menudo. Pero eso es precisamente lo que implica la distribución de probabilidades de las fluctuaciones: los acontecimientos decisivos son raros. La pregunta es, ¿encajan los grandes desastres bursátiles en la misma curva que las pequeñas fluctuaciones? Como los desastres son infrecuentes, la respuesta no es fácil. Algunos dicen que esos acontecimientos extremos pueden entrar dentro de la distribución perfectamente, lo cual significa que las crisis, aunque raras, no son anómalas, son un rasgo inherente del comportamiento de los mercados, derivado de los mismos procesos fundamentales que causan las fluctuaciones más pequeñas. Otros no están tan seguros. Por ejemplo, Rosario Mantegna y su colega Fabrizio Lillo han demostrado que las distribuciones estadísticas a corto plazo de las devoluciones de los días

de *crack* de los mercados o de los días de repunte después del *crack* difieren de las de los días normales, esto es, parece haber algo inusual en el funcionamiento del mercado durante esos días.

Pero sean cuales sean las estadísticas precisas de las fluctuaciones bursátiles, es irrefutable que no son plenamente aleatorias (gaussianas) y que son más proclives a alcanzar valores elevados. ¿Qué significa eso para la teoría económica?

LAS CURVAS CORRECTAS

Uno de los sueños de los economistas es el de elaborar una teoría capaz de predecir los altibajos del mercado antes de que ocurran. Esto permitiría perpetuar la acumulación de beneficios y comprar y vender exactamente cuando, según los cálculos, sea lo más conveniente. Los operadores de bolsa de verdad –o, al menos, los que tienen una comprensión profunda de la dinámica del mercado– han desechado esta idea hace tiempo. Saben que no es realizable. En realidad, la imposibilidad de hacer previsiones totalmente precisas ha sido consagrada por uno de los principios nucleares de la economía: la “hipótesis de los mercados eficientes”. Uno de los hechos que refrenda esta hipótesis es que no es posible predecir el precio futuro de las acciones a partir de los precios que ya han tenido. Adviértase que el hecho de que se afirme que es una hipótesis –una creencia, si se quiere– es una forma de protegerse frente a la falsedad de la afirmación, porque no existen pruebas rigurosas de que sea cierta.

El análisis estadístico de las fluctuaciones del mercado ha demostrado que, empíricamente, la hipótesis de los mercados eficientes se tiene en pie. La cuestión de la predicibilidad gira en torno a la idea de las correlaciones. Para hacer una previsión certera del precio de una acción basándose en su precio anterior, tendría que haber alguna relación matemática entre ambos precios: técnicamente hablando, tendrían que ser correlativos. Imaginemos, por ejemplo, que el hecho de que una acción haya venido bajando durante unos días significa que ha de seguir bajando al mismo ritmo al día siguiente. A veces, por supuesto, esta relación se produce –una acción se puede devaluar de manera constante a lo largo de unos días–, pero igualmente obvio es que no se trata de una relación

generalizable –si así fuera, cuando una acción empezara a bajar acabaría, con el paso de los días, por no valer nada–. En realidad, no hay forma de decir si una acción que un día ha bajado bajará también al día siguiente.

Los físicos tienen una herramienta matemática para medir las correlaciones: se llama “función de correlación”. La emplean, por ejemplo, para deducir hasta qué extremo el movimiento de cierta partícula de un fluido es predecible sobre la base del movimiento de otras partículas. Si la función de correlación entre ambas partículas tiene un valor alto, las trayectorias de las dos guardarán una relación muy estrecha. Por ejemplo, el movimiento de una madre y un niño que van de la mano y atraviesan una multitud es un movimiento muy correlacionado. Se puede predecir dónde irá el niño siguiendo la pista de su madre.

La función de *autocorrelación* de una partícula define qué relación guarda esa partícula en cualquier momento del tiempo con su *propio* movimiento anterior. La función de autocorrelación de una partícula de un líquido es un valor muy alto en intervalos de tiempo pequeños porque la partícula continúa moviéndose sobre su trayectoria anterior. Pero ese valor cae rápidamente a cero en intervalos más prolongados porque los choques con otras partículas *hacen aleatorio* rápidamente el movimiento destruyendo toda traza de una trayectoria anterior. El posible calcular la función de autocorrelación de un índice económico o del precio de una acción, que nos dice si su valor futuro depende de su valor pasado o no. Normalmente, este análisis demuestra que la correlación cae a cero en el espacio de entre cinco y quince minutos. Para intervalos temporales mayores, el precio ha *olvidado* por completo su pasado.

Se podría imaginar que comprando y vendiendo en los pocos minutos en que hay correlación, uno podría aprovechar el pasado para prever el futuro inmediato y operar con un beneficio seguro. En la práctica, sin embargo, esto no es factible –en parte a causa del tiempo finito necesario para hacer la previsión y, acto seguido, completar la transacción, pero también porque los pequeños costes impuestos a las transacciones erosionarían rápidamente cualquier beneficio potencial de explotar correlaciones a corto plazo–. Por lo tanto, no hay fórmula mágica que permita jugar a la bolsa sin riesgos. Esto encaja con la experiencia y con el sentido común. Sin embargo, es revelador del estado del análisis económico convencional que al menos una célebre teoría sugiera lo contrario. En 1997, Robert Merton y Myron Scholes fueron galardonados

con el Premio Nobel de Economía por la teoría de los precios de opciones, que desarrollaron con Fischer Black, quien sin duda habría compartido el premio con los anteriores de no haber fallecido unos años antes. El modelo de Black-Scholes, ampliado por Merton, define más o menos el pensamiento de los operadores de opciones.

Básicamente, las opciones son una especie de seguro que protege a los operadores de las vicisitudes del mercado o de los acontecimientos del mundo. El comprador de una opción paga una pequeña suma por el derecho a comprar o a vender algo a un precio específico en un futuro. Si ese precio desciende por debajo del valor que tenía cuando se produjo la transacción, es el *autor* de la opción quien compensa la diferencia. Las opciones son una forma de minimizar los riesgos –o de que otro cargue con ellos–, ésa es al menos la teoría. Se puede recurrir a las opciones para protegerse de casi todo: de las variaciones del tiempo (que pueden arruinar una cosecha o un evento que tenga lugar al aire libre), de la subida o bajada de los tipos de cambio, o de cualquier cosa que pueda reportar al comprador futuras pérdidas debidas a la mala suerte o a la voluntad divina. Son una modalidad de un tipo de activos llamados “derivados”, que dependen del valor de otra cosa. Los derivados conocidos como “futuros” son acuerdos para comprar o vender algo en un momento futuro a un precio acordado en el momento presente. Son, en esencia, una forma de apuesta.

Los derivados han desarrollado notoriedad en los últimos años a causa de su conducta de alto riesgo, que ha conducido a pérdidas masivas en las que han incurrido instituciones como el Barings Bank o Procter & Gamble. Se calcula que sólo en 1997 los derivados costaron a los inversores de todo el mundo unos 2.650 millones de dólares. Sin embargo, se supone que las opciones son derivados relativamente dóciles, gracias al modelo de Black-Scholes, que algunos han descrito como “la teoría de más éxito no sólo de las finanzas, sino de la economía”.¹⁶ Fisher Black y Myron Scholes consideraron la cuestión de la estrategia: cuál es el mejor precio para el comprador y cómo pueden comprador y vendedor minimizar los riesgos. Se daba por supuesto que el comprador recibe un “descuento por riesgo” que refleja la incertidumbre del precio de la acción que cubre la opción que está adquiriendo. Black y Scholes propusieron que esos descuentos, o primas, están ya inherentes en el precio de la acción, puesto que, en términos relativos y con respeto a las previsiones

de su valor futuro, los valores de mayor riesgo se venden por menos que valores más seguros. Basándose en esta idea, ambos economistas dedujeron una fórmula para calcular el “precio justo” de una opción. La teoría era un regalo para los compradores, a quienes les bastaba con introducir los números apropiados para extraer la cifra que debían abonar.

Fuera del modelo había un solo elemento que no podía concretarse: la volatilidad del mercado o su forma de fluctuar. Para calcularla, Fisher Black y Myron Scholes dieron por supuesto que las fluctuaciones del mercado son gaussianas. No sólo sabemos que esto no es cierto, sino que ello significa que la fórmula Black-Scholes puede dar lugar a resultados absurdos: sugiere que las opciones se pueden gestionar sin correr el menor riesgo. Se trata de un mensaje potencialmente desastroso que introduce una sensación falsa de confianza que puede desembocar en pérdidas enormes. Su punto flaco surge de una suposición errónea acerca de la variabilidad del mercado, lo cual demuestra que, en términos prácticos, es muy importante la forma de describir las fluctuaciones.

Las carencias de la teoría de Black-Scholes son bien conocidas por los economistas, que, sin embargo, no han conseguido mejorarlas. Se han propuesto muchas ampliaciones y modificaciones del modelo, pero ninguna consigue eliminar todos los problemas. Se ha calculado que las deficiencias de esos modelos son responsables de casi el cuarenta por ciento de las pérdidas de las transacciones con derivados del año 1997 y parece que, en algunos casos, las reglas que los propios inversores extraen de su experiencia son más adecuadas que los sofisticados modelos matemáticos. Econofísicos como el francés Jean-Phillippe Bouchard han propuesto nuevos modelos para determinar el precio de las opciones que van más allá de la teoría de Black-Scholes al tener en cuenta la naturaleza no gaussiana de las fluctuaciones. Esos modelos destierran la ilusoria noción de establecimiento de los precios sin riesgo. La confianza de Bouchard en el papel que la física puede desempeñar en la economía se refleja en el hecho de que ha fundado una consultoría, Science & Finance, que contrasta sus teorías con las demandas precisas del mercado.

La fijación del precio de las opciones es sólo un área en la que una mayor comprensión de las estadísticas del mercado podría transformar la teoría económica. Otra área activa es la mejora de los planes para optimizar las carteras de valores. Los físicos emplean sus métodos para investigar las correlaciones entre los distintos precios de las acciones y, por

tanto, para hallar la forma menos arriesgada de ampliar las inversiones en un mercado. Si, por ejemplo, uno invierte en acciones muy correlacionadas, la bajada del precio de una de ellas podría hundir toda la cartera. Para algunas de estas propuestas bastaría con una descripción más precisa de las fluctuaciones del mercado. Pero en otros casos, particularmente para elaborar los modelos económicos generales, lo primero que hace falta saber es la causa de las fluctuaciones. Es de lo que nos vamos a ocupar a continuación.

IX
AGENTES DE LA FORTUNA
*POR QUÉ LA INTERACCIÓN ES TAN IMPORTANTE
EN ECONOMÍA*

Si la economía llegara a convertirse en una verdadera rama de la ciencia, incrementaría enormemente nuestra capacidad para predecir el curso de los acontecimientos, así como el resultado de nuestros intentos por cambiar ese curso [...] [L]a ciencia económica [...] incrementaría nuestra capacidad para predecir las consecuencias de prever las consecuencias de cambiar el funcionamiento del sistema económico y, por tanto, de elegir el curso de acción más favorable.

ROBERT HEILBRONER (1999)¹

A Napoleón le gustaba contar la historia de un banquero marsellés que dijo a alguien que había ido a visitarlo y se había quedado muy sorprendido ante el contraste entre el esplendor de su château y su hospitalidad y la mezquindad de la oficina en donde le había conocido: "Muchacho, es usted demasiado joven para comprender cómo se forman las masas; todos los poderes verdaderos, auténticos, tanto si se componen de dinero, agua u hombres, se parecen: una masa es un inmenso centro de movimiento, pero hay que ponerlo en marcha, y hay que mantener ese movimiento"; y podría haber añadido que la forma de ponerlo en marcha y mantenerlo en movimiento es obedeciendo a las leyes de las partículas.

RALPH WALDO EMERSON (1860)²

Una vez, hace mucho tiempo, el economista Kenneth Boulding me preguntó: "¿Qué te gustaría hacer en economía?" Como yo era joven y arrojado, le

dije, con muy poca humildad: "Quiero llevar la economía al siglo XX". Me miró y me dijo: "¿No crees que primero habría que llevarla al siglo XVIII?"

W. BRIAN ARTHUR³

Si la física estadística de Maxwell se apoyó en las ciencias sociales, los economistas de finales del siglo XIX no tuvieron problema en devolver el favor. Pero ¿podía la economía aspirar realmente a la precisión y certidumbre de la física? ¿No es verdad que la precisión posible en el mundo de los átomos se extiende muy rara vez a la esfera de la voluble conducta humana? ¿No era la expresión "ciencia económica" otra cosa que un oxímoron? Cuando el historiador Thomas Carlyle llamó a la economía "la ciencia sombría"⁴ no se refería a que fuera defectuosa como ciencia, sino a que, con frecuencia, conducía a conclusiones difíciles de digerir. Sin embargo, los economistas no tardaron en encontrar sombras, al comprobar las discrepancias existentes entre sus modelos y el mundo real del comercio y la industria.

Francis Edgeworth proclamó alegremente y sin inmutarse que los economistas no debían limitar en absoluto sus objetivos. La meta, afirmó, era "no tanto cazar a un pájaro en particular como disparar al centro de la bandada para cazar cuantos más mejor".⁵ En su *Mathematical Psychics* (1881) confesó que creer en una "mecánica social" —una matemática económica— era, en parte, un acto de fe que extraía fuerza moral de los éxitos evidentes de la física:

En comparación con su hermana mayor [*la mécanique céleste*], la *mécanique sociale* es menos atractiva para el creyente común porque es discernible únicamente con el ojo de la fe. La belleza escultural de la una es manifiesta, pero los rasgos de cuento de hadas de la otra y su fluidez de formas están velados. Sin embargo, la matemática ha caminado durante mucho tiempo gracias a la evidencia de cosas no vistas del mundo de los átomos (los métodos para ello empleados, puede señalarse de modo incidental, estadísticos y toscos, tal vez ilustren la posibilidad de la matemática social). La energía invisible de la electricidad es captada por los

maravillosos métodos de Lagrange; la energía invisible del placer puede admitir un manejo similar.⁶

Según Edgeworth, el "placer" era la fuerza que impulsaba a sus hedonistas "aurigas", los agentes individuales de la sociedad que (según el pintoresco imaginario del economista inglés) interactúan como los átomos en el vacío. Francis Edgeworth empezó a vislumbrar una economía que tratara a las personas como "la multitud de átomos que constituyen las bases de la uniformidad en física".⁷

A este respecto, Edgeworth se parecía a su coetáneo Alfred Marshall, tutor de John Maynard Keynes en Cambridge, quien quiso entender la economía desde los primeros principios. Marshall hizo por la economía lo que Maxwell y Boltzmann por la termodinámica, examinándola con lupa e intentando revelar lo que las partículas individuales hacían a escala microscópica. Éste fue el comienzo de la microeconomía, que apuntala la mayor parte de la teoría económica actual. "Al fin y al cabo, la economía", dice Robert Heilbroner,

conciene a las acciones de los agregados de personas, y los agregados humanos, como los agregados de átomos, tienden a mostrar regularidades estadísticas y leyes de probabilidad. Por lo tanto, cuando el mundo académico se concentra en la exploración de la idea de *equilibrium*, del estado hacia el que tendería el mercado como resultado de las colisiones aleatorias de individuos que buscan maximizar sus utilidades, en realidad lo que hace es elucidar algunas tendencias del universo social.⁸

Edgeworth y Marshall eran muy distintos en otros aspectos. Marshall era un hombre pragmático, mientras que, según la valoración de Keynes, a Edgeworth no le importaba tanto utilizar la teoría para formular políticas o determinar cómo deberíamos gestionar nuestros asuntos como descubrir "teoremas de interés estético e intelectual".⁹ Algunos dirían que es una tendencia que hoy en día aún está viva y coleando.

A principios del siglo XX, los economistas estaban perfectamente dispuestos, incluso impacientes, por incorporar analogías de la mecánica estadística diseñadas por Maxwell, Boltzmann y Gibbs. El problema es que eran analogías erróneas. Asimismo, los economistas querían creer

en un mercado estable, suavemente alterado por ruidos aleatorios. Pero es evidente que el sistema económico no está en equilibrio. Sus teóricos todavía están intentando incorporar esta distinción. No obstante, al recurrir a imágenes de partículas en movimiento, los economistas sugerían, de forma implícita, que podrían emular a la física y formular una descripción de su tema de estudio desde la base. De eso vamos a ocuparnos en este capítulo.

EL OPERADOR RACIONAL

Durante una gran parte del siglo XX, en numerosas ocasiones se dijo que la comunidad científica estaba afectada por una enfermedad llamada “envidia de la física”. Los científicos de otras disciplinas deseaban que la suya gozara de la profundidad intelectual, la agilidad matemática y el rigor fundacional que tan patentes resultaban en la física. Los economistas, tal vez sin darse cuenta de que la suya era la tarea más difícil, no eran inmunes a esto. Paul Krugman afirma a propósito de un economista indio que explicaba a sus estudiantes una heterodoxa teoría de la reencarnación: “Si sois buenos economistas, economistas virtuosos, os reencarnaréis como físicos. Pero si sois malos economistas, pésimos economistas, os reencarnaréis como sociólogos”.¹⁰

Algunos podrían decir que las peculiares y asombrosas matemáticas de Edgeworth funcionan a modo de ardid compensatorio, como si el economista inglés hubiera querido demostrar que si bien la economía no podía obtener la precisión de la física, sí podía vestir sus mismos ropajes. Aunque muy distinto, el enfoque de la economía de Alfred Marshall, suena también a física: las teorías se desarrollan a partir de postulados fundamentales. No obstante, el propio Marshall advirtió los peligros de llevar esta analogía demasiado lejos. “La economía –afirmó– no puede aspirar a la exactitud de la ciencia física porque se ocupa de las fuerzas sutiles y siempre cambiantes de la naturaleza humana”. Robert Heilbroner abunda en esto:

[H]ay una brecha insalvable entre el *comportamiento* de [las partículas subatómicas] y el de los seres humanos que constituyen los objetos de estudio de las ciencias sociales [...] aparte de reflejos

puramente físicos, el comportamiento humano no puede comprenderse sin la idea de volición, esa capacidad impredecible de cambiar de opinión en el último momento. Por el contrario, los elementos de la naturaleza se *comportan* como lo hacen por razones de las cuales sólo sabemos una cosa: las partículas de la física no *eligen* comportarse como lo hacen.¹¹

Estas afirmaciones plantean varios problemas. Por supuesto, Heilbroner tiene razón al decir que los humanos deciden y las partículas no (aunque algunos especialistas en física cuántica hablan a veces como si lo hicieran), pero el elemento resultante de la indeterminación no impide necesariamente que las ciencias sociales diseñen modelos de comportamiento en masa, como ya hemos visto. Los primeros estadísticos se dieron cuenta de que en las grandes poblaciones hay regularidades incluso cuando los motivos de cada individuo se desconocen. Y Heilbroner olvida que en muchas situaciones las personas se enfrentan no sólo con un número muy limitado de opciones y pueden, por lo tanto, tener pautas de comportamiento a largo plazo relativamente predecibles incluso cuando cada individuo efectúa esas predicciones libremente. Si los peatones de las simulaciones del movimiento de los viandantes de Dirk Helbing (página 162) tuvieran que llegar aleatoriamente a algún punto del perímetro de un espacio abierto y cruzar hasta cualquier otro punto aleatorio, no obtendríamos ninguna pauta clara. El orden aparece porque los puntos de entrada y salida están delimitados. Lo mismo puede decirse de la economía: en el mercado, los operadores pueden ejercer el libre albedrío, pero sus elecciones están restringidas a comprar o vender en cualquier punto del tiempo.

La cautela con que Robert Heilbroner evita afirmar que la economía podría ser una ciencia exacta es comprensible y, hasta cierto punto, está perfectamente justificada, porque ya hemos visto con cuánta aleatoriedad se comportan los mercados. Pero resulta irónico, porque la economía convencional ha avanzado justo en dirección opuesta. En lugar de elevar los brazos al cielo con desesperación ante la imposibilidad de captar en un modelo cuán caprichosa es la conducta humana, los teóricos han asumido que las personas actuamos de forma perfectamente predecible, como autómatas racionales. Una parte de la agenda de los físicos consiste en inyectar una descripción *más* realista y menos idealizada del comportamiento humano.

¿Por qué los economistas tratan a los humanos como si fueran autómatas? Si digo que porque es la única forma de que sus modelos funcionen, no pretendo pasar por cínico. Simplemente, es la verdad: no había forma evidente, hasta hace relativamente poco, de lidiar con la indeterminación de la conducta humana.

Pero las matemáticas también desempeñaron su papel en la eliminación del elemento humano en la economía. Desde Adam Smith a John Stuart Mill y Karl Marx, los primeros economistas se tenían a sí mismos por filósofos morales y políticos. Examinaban minuciosamente sus estudios del mercado capitalista en busca de lo que pudieran suponer para la conducta política y social. Muchas de las figuras más eminentes del siglo XX, como John Maynard Keynes y Joseph Schumpeter, hicieron lo mismo. Pero, siguiendo los pasos de Francis Edgeworth, la mayoría de los economistas académicos empezaron a construir modelos matemáticos más elegantes y abstractos en los que no había sitio para el desorden y el alboroto del mundo real. Algunos de ellos afirmaron que incluir ruido en sus modelos era insultar a la inteligencia del mercado.

Así pues, ¿mediante qué juego de prestidigitación salió el libre albedrío de la teoría económica convencional? Hace mucho que esa teoría ha asumido que todos y cada uno de los agentes individuales del mercado —los operadores, hombres y mujeres, que compran y venden valores— tienen una conducta hobbesiana. Su objetivo es conseguir todo lo que puedan, maximizar sus ganancias, sean éstas los beneficios de sus transacciones o un bienestar más generalizado, que los economistas llaman *utilidad*, que incluye factores como el riesgo y la seguridad.

Parece muy razonable. ¿Para qué invertir en la bolsa si no es en busca de ganancias? Los problemas surgen cuando consideramos cómo maximizan su utilidad esos agentes. El punto de vista tradicional hace de ellos ordenadores preprogramados, omniscientes. Presupone que cada uno de ellos tiene un objetivo fijo y quiere conseguirlo de una forma totalmente racional. En cada instante, él o ella asimilan toda la información disponible de la situación del mercado y la aprovechan para calcular su próximo movimiento, como hace el ordenador Deep Blue cuando juega al ajedrez con Garry Kasparov. En otras palabras, los agentes de bolsa son “maximizadores racionales” perfectamente informados.

El atractivo de esta suposición consiste en que permite prever el siguiente movimiento de los agentes. Su comportamiento está predeterminado

por un conjunto de reglas. Así pues, los modelos tradicionales suponen que los factores que inciden sobre los precios son impredecibles y externos al mercado, de modo que las fluctuaciones son aleatorias (es decir, en general, gaussianas) y quedan más allá del control de los operadores. Los operadores se limitan a responder a estos altibajos impuestos desde fuera de una forma que les permita maximizar su utilidad en un momento en particular.

Que los precios fluctúen de forma impredecible no quiere decir (en el seno de la economía convencional) que los factores que influyen en los precios sean totalmente misteriosos. Al contrario, los cambios en los precios de los activos reflejan las alteraciones (impredecibles) de los “fundamentos”, de las fuerzas que determinan el valor final. El valor fundamental de una empresa, por ejemplo, es el valor de todos los dividendos que pagará en el futuro. Se supone que el precio de una acción de esa empresa ha de reflejar ese valor.

¿Parece esto un poco extraño? ¿Cómo demonios se puede saber la suerte que correrá la empresa y, por lo tanto, los dividendos que repartirá? Por supuesto, no se puede saber. Éste es uno de los actos de fe que la teoría macroeconómica tradicional se ve obligada a aceptar para que las matemáticas se le amolden. Otro acto de fe es la asunción de que todos los agentes de bolsa disponen simultáneamente de toda la información de los mercados y de que, además, ésta incide en el precio de los activos.

Esos actos de fe sustentan la hipótesis de los mercados eficientes (véase página 236), una de cuyas condiciones previas es que los precios de los activos sólo cambian cuando los fundamentos cambian, esto es, cuando se dispone de nueva información. Y puesto que esta información está a disposición de todos y como todos los agentes saben cuál es el mejor modo de maximizar sus utilidades, nadie puede explotarla en detrimento de los demás. Así que no hay método que garantice de forma infalible la obtención de alguna ventaja en el mercado. Además, merece la pena mencionar otros dos aspectos de los que nos ocuparemos más adelante. En primer lugar, todos los operadores son idénticos: todos son maximizadores racionales que juegan con las mismas reglas. En segundo lugar, todos tienen preferencias fijas: nunca cambian las creencias que gobiernan sus decisiones mercantiles.

Nadie negará que estas presunciones son demasiado simples. La cuestión es si su simplicidad es relevante. Encontrar la forma de simplificar

problemas complejos es la señal de identidad de la ciencia bien hecha. Con frecuencia, los científicos recurren a enfoques que a los legos pueden parecerles absurdos y, sin embargo, las teorías resultantes funcionan sorprendentemente bien. En cierta ocasión, Einstein dijo que las teorías científicas tienen que ser todo lo simples que se pueda, pero no más. En muchos aspectos, ésta es la piedra de toque de una buena teoría. Así que haríamos bien en no descartar de un plumazo la microeconomía tradicional por ofrecernos esa visión tan caricaturesca del mercado. Con frecuencia, esas caricaturas contienen toda la información necesaria para hilvanar una historia. Pero la prueba de fuego es si la teoría se sostiene al cotejarla con la realidad. La respuesta depende de lo que se coteje.

La idea de que las personas maximizan la utilidad y el beneficio y operan con una perfecta capacidad de previsión, domina la teoría macroeconómica convencional, la llamada microeconomía clásica. Es una idea consagrada en la teoría del ciclo económico real (CER), que pretende explicar los altibajos del mercado. La teoría del CER ofrece una imagen muy anodina, por no decir falaz. Propone que las causas del ciclo económico son exógenas, que vienen impuestas desde fuera al mercado en forma de una serie de impactos aleatorios derivados del progreso tecnológico. El mercado se limita a responder a esos impactos.

El aspecto menos satisfactorio de la teoría es que parece diseñada para ofrecer los resultados esperados. Las propiedades estadísticas de las fluctuaciones del mercado dependen sobre todo de lo que uno presuponga sobre la aleatoriedad de los impactos exógenos. Inevitablemente quizá, la presunción normal es que siguen una estadística gaussiana. Esto, por supuesto, da pie a unas fluctuaciones económicas de características muy particulares que pueden cotejarse con los datos que ofrece el mercado. En una observación superficial, la teoría del CER ofrece curvas de precios plausiblemente erráticas, pero al considerarla más de cerca, las estadísticas no salen. Por ejemplo, la función de autocorrelación (véase página 236) no casa con los datos reales.

Una crítica de mayor calado se deriva de la prueba del economista Robert Schiller en la década de 1980, en el sentido de que los precios de los activos no están necesariamente vinculados a su valor “fundamental” (el supuesto valor “verdadero” que obtendrían en un mercado equilibrado), como da por sentado la teoría del CER. Los precios cambian de forma más errática que los fundamentos, es decir, en jerga mer-

cantil, son más volátiles. Si el precio de los activos varía y los fundamentos no lo hacen, ¿qué impulsa ese cambio? ¿Por qué los agentes pagan distintos precios por productos cuyo valor subyacente no se ha modificado? Evidentemente, esto no casa con la idea de que los agentes siempre actúan de una forma racional.

En realidad, casi no es necesario un análisis detallado de las estadísticas que nos diga que, a veces, los agentes actúan irracionalmente. Si los precios sobrepasan el nivel que dictan los fundamentos, están “sobrevuados”, así que cabe pensar que, por sentido común, los operadores no comprenden. Pero lo hacen. Esto evita que el mercado recupere su equilibrio de manera instantánea mediante las leyes convencionales de la oferta y la demanda. Al parecer, impera la irracionalidad. Una vez más, los economistas no se sorprenden. Pero no cabe imaginar que, de alguna forma, alguien les ha imbuido una concepción falsa de la conducta humana. Saben bien que los mercados no son completos, que las personas no somos racionales y tomamos decisiones miopes y sin contar con todos los datos, y que todos somos distintos los unos de los otros. La cuestión es, ¿qué se puede hacer al respecto?

IGNORANCIA Y FE

Los legos tienen la desgraciada tendencia a despreciar el desdén de los economistas por la irracionalidad, como si se quisiera indicar que, psicológicamente, son muy poco sofisticados. Recientemente, un crítico (no físico) ha afirmado:

Tal y como ha sido formulada en incontables libros de texto, la teoría económica dominante da por hecho que un hombre o una mujer bien informados siempre tomará una decisión racional y bien informada sobre qué comprar y qué vender y a qué precio [...] pero esta premisa es descabellada.¹²

Pero a esta acusación, el economista John Kay replica:

Lo es, en efecto. Por eso la teoría económica dominante en la actualidad no da por hecho nada parecido. La economía de la infor-

mación imperfecta ha constituido un importante tema de investigación –tal vez, *el* más importante– de la economía en los últimos treinta años.¹³

Ésta es una defensa válida. Muchos modelos económicos actuales están formulados en términos de “racionalidad limitada”: decisiones racionales que se toman teniendo en cuenta algunos límites como el de la información incompleta, que, sencillamente, trata de extraer lo mejor de las circunstancias dadas.

De igual modo, debemos tener el cuidado de aclarar exactamente lo que queremos decir por “imperfección” o “incertidumbre”. En realidad, es posible tomar la mejor de las decisiones sobre la base de una información incompleta, sopesando probabilidades sobre la naturaleza de lo que no se sabe. El cálculo de riesgos ante un futuro incierto o con información incompleta es esencial en la obra de muchos economistas muy relevantes como los premios Nobel Harry Markowitz, Joseph Stiglitz, George Akerlof y Michael Spence. Y sin embargo, gran parte del esfuerzo en esta área se ha cifrado en encontrar estrategias óptimas (y por lo tanto racionales) frente a las impredecibles fluctuaciones del mercado.

Algunos economistas aceptan que la incertidumbre a la que hay que hacer frente es tan grande que los operadores y las empresas renuncian a la búsqueda inútil de una solución óptima y, en vez de ello, aceptan alguna que, simplemente, sea *bastante buena* de acuerdo a un conjunto dado de criterios. Se abandona la maximización en favor de la satisfacción. Pero, de nuevo, esto es dar por supuesto que las decisiones son básicamente racionales, si bien condicionadas por una fuerte dosis de realidad. Algunos creen que, en todo caso, la diferencia entre maximización y satisfacción es muy pequeña.

Sin embargo, Keynes dudaba de que las personas fuéramos capaces de optar por la mejor elección o, ni siquiera, de tomar una decisión particularmente racional:

una enorme proporción de nuestras actividades positivas depende del optimismo espontáneo más que de una especulación matemática [...] una espontánea urgencia por la acción en lugar de la inacción, y no como consecuencia de un promedio sopesado de

beneficios cuantitativos multiplicado por probabilidades cuantitativas.¹⁴

En otras palabras, se pueden concebir todas las complicadas fórmulas que se quiera, pero al final, la mayoría de nosotros –operadores incluidos– nos guiamos por el instinto y los impulsos, por lo que Keynes llamaba “espíritu animal”. Las decisiones de gestión de alto nivel sobre, por ejemplo, la política de empleo, inversión, diversificación o especialización de una empresa, se fundan en gran medida en juicios objetivos, basados menos en la matemática de la racionalidad económica y más en los años de experiencia de sus altos ejecutivos.

Uno de los profetas de esta perspectiva de la economía fue el estadounidense Thorstein Veblen, cuyo pensamiento está dominado por el duro clima pugilístico de la economía del Nuevo Mundo. Para Veblen, el mundo de la empresa era irracional hasta la barbarie. Era un mundo en el que la conducta está gobernada tanto por el hábito y la estupidez como por la planificación y la lógica. En su opinión, los empresarios reciben positivamente las contingencias imprevisibles del mercado, porque ofrecen oportunidades de negocio que una economía estable no puede ofrecer.

De hecho, es raro que la voracidad que se exige a la mayoría de los operadores de bolsa no vaya acompañada por cierto grado de impulsividad que hace caso omiso al frío cálculo. Pero es posible que la manera más productiva de considerar el elemento irracional de los negocios sea admitir que, contando con la misma información, distintas personas actuarán de forma distinta. Y esta forma no tiene por qué ser irreflexiva. Al contrario, la irracionalidad tiende a expresarse de acuerdo a las diversas opiniones acerca de cómo hay que responder ante determinadas circunstancias. Así es como se manifiesta la heterogeneidad del mercado: no todos los agentes son iguales. No hay consenso acerca de la mejor opción. Recientemente, varios economistas han empezado a introducir este aspecto en sus modelos. En la teoría de la elección discreta, por ejemplo, cada agente escoge una entre diversas alternativas, cada una de las cuales goza de cierta probabilidad.

Por lo general, sin embargo, el punto de vista sobre el papel de la racionalidad en economía diverge a lo largo de la línea de falla que divide a los analistas académicos de los operadores del mercado. Tradicionalmente,

los académicos han preferido las abstracciones idealizadas que epitomizan las teorías de Francis Edgeworth. Sus modelos describen un mundo alejado del que habitan los agentes, para quienes el retrato duro y lleno de oportunismo de Veblen parece cierto. Los teóricos de la economía neoclásica se aferran con firmeza a la idea de un mercado equilibrado en el que los precios siempre alcanzan el nivel que les corresponde y en el que prácticamente no hay oportunidades para explotar las tendencias del mercado. Sus operadores omniscientes adoptan de inmediato la mejor estrategia, aprovechando todas las ventajas que pueda ofrecer. Por otra parte, los operadores viven de su astucia y habilidad y cada uno de ellos cree que puede descubrir una vía imprevista hacia la maximización de beneficios. Hablan como si el mercado tuviera personalidad propia, a veces nervioso e irregular, otras confiado y desenvuelto. Para algunos operadores, la economía académica es pura fantasía. George Soros, indiscutible experto en la economía práctica del parquet bursátil, afirma: “debería parecernos extraño que una teoría patentemente falsa [la economía neoclásica convencional] haya conseguido tanta aceptación”.¹⁵

Uno de los primeros teóricos de la economía que introdujo la fe y la opción en la construcción de modelos fue Alan Kirman, de la universidad francesa de Aix-Marsella, quien en la década de 1990 propuso que, dependiendo de sus inclinaciones, los operadores podrían clasificarse dentro de dos categorías. Los *fundamentalistas* son los tradicionalistas: aquellos que adhieren al dogma racionalista de que los precios son un reflejo de las leyes fundamentales de la economía y que, por lo tanto, comprarán y venderán en consecuencia. Los *pronosticadores*, por otro lado, adoptan un enfoque más empírico. Piensan que los precios futuros pueden predecirse a partir de su comportamiento en el pasado. Algunos podrían recurrir a reglas generales o a la intuición; otros confiarán en fórmulas complejas extraídas de la teoría de probabilidades. Pero todos son esencialmente optimistas y creen que no tienen por qué estar a merced de un mercado que fluctúa de una manera puramente aleatoria. A veces, a los pronosticadores también se les llama “operadores de ruido”, denominación que refleja su convencimiento de que las fluctuaciones (o ruido) del mercado ofrecen una valiosa información que se puede conseguir siempre y cuando se sepa cómo.

Alan Kirman consideró que, para elaborar un modelo de las tendencias irracionales de los agentes, no bastaba con introducir la heterogeneidad.

Hacia falta algo más. En cuanto se nos sitúa ante varias opciones, no podemos ignorar el hecho de que, inevitablemente, la opción de cada uno está influida por la de los demás. Así pues, ha llegado la hora que suba a bordo el factor que probablemente represente la omisión más notoria de la teoría neoclásica convencional y que con mayor firmeza nos introduce en el reino de la física estadística. Ese factor es la *interacción*.

HAZ LO QUE VIERES

El sistema económico es supremamente interactivo. Los operadores se influyen unos a otros directamente: las prisas por comprar o vender un activo en particular pueden impulsar a otros a hacer lo mismo. Intuitivamente parece claro –basta con mirar las caras de los agentes bursátiles en el parquet– que las grandes crisis son fenómenos de estampida en los que los individuos responden al humor del mercado con espíritu gregario y, a veces, llevados por el pánico. Sin embargo, los modelos microeconómicos que ignoran la interacción insisten en una interpretación distinta: la de que los grandes *cracks* son impulsados por alguna fluctuación exógena que está fuera del control del mercado o en la cual todos los agentes deciden de forma independiente y simultánea seguir el mismo curso de acción.

Además, los agentes interactúan de forma indirecta. Sus elecciones tienen un efecto inmediato en los precios, lo cual, a su vez, influye en la elección de los demás. Como diría un ingeniero, es un trabajo de gran retroalimentación. Mientras que los modelos tradicionales dan por supuesto que los agentes adoptan estrategias (racionales) para responder a una evolución de los precios impuesta desde el exterior, en realidad, los agentes, amén de responder a sus fluctuaciones, contribuyen con sus actos a fijar los precios.

Una vez más, se corre el riesgo de caricaturizar la forma de pensar de los economistas. Como señala John Kay, “la idea de que el comportamiento de quienes participan en los mercados está influido por lo que ocurre dentro de los mercados” ha sido explorada en “literalmente, millares de libros y artículos escritos por los economistas”.¹⁶ Lo que la física tiene que ofrecer a la elaboración de los modelos microeconómicos no es una nueva perspectiva de los factores que controlan los mercados, sino

nuevas herramientas con las que darles cabida. Los físicos llevan más de un siglo lidiando con sistemas en los que interactúan muchas partículas. Sería un error suponer que esas herramientas se pueden trasladar directamente a la economía. Pero, de igual modo, sería sorprendente que algunos fenómenos ya bien comprendidos de la física no estuvieran presentes de alguna forma en la economía.

El hombre que introdujo la idea de interacción en microeconomía fue un matemático familiarizado con la física y con la economía. En 1974, Hans Föllmer, de la Universidad de Bonn, confeccionó un modelo de “agentes-interactivos” de la economía basado en los principios del modelo de Ising para los imanes (véase página 109). Como vimos en la descripción simplificada de los cuerpos magnéticos, los átomos están dispuestos sobre una retícula regular y “toman opciones”: alineas sus spins en una dirección o en la contraria. Esas opciones son interdependientes, es decir, el alineamiento de cada átomo depende del de sus vecinos, puesto que los campos magnéticos ejercen una fuerza que afecta a los demás. En el modelo de Hans Föllmer, cada átomo representa a un agente que se enfrenta a la opción de, por ejemplo, comprar o vender. Esta misma idea está muy difundida en la actualidad entre economistas y econofísicos que, como Alan Kirman, pretenden extender la microeconomía tradicional por medio de modelos de agentes interactivos. Las predicciones de esos modelos dependen de las reglas que gobiernan las interacciones. Föllmer se dio cuenta de que su modelo generaba más de un estado estable –más de un paisaje macroeconómico– de igual modo que el modelo de Ising ofrece dos estados magnéticos alineados, lo cual dio que pensar a los economistas aferrados a la idea de que el mercado tiene un estado de equilibrio único y particular.

En la década de 1990, los economistas estadounidenses William Brock y Steven Durlauf, ambos versados en física moderna, ampliaron el enfoque de Hans Föllmer. Brock y Durlauf formularon su modelo de agentes interactivos por medio de elecciones binarias, en una forma que equivalía al modelo de los fenómenos magnéticos que había elaborado Pierre Weiss a partir de los estudios de Pierre Curie (véase página 107). El modelo Curie-Weiss, o modelo del campo molecular, da por supuesto que cada átomo está influido por el efecto promedio de todos los demás y no sólo de sus vecinos más próximos. En la física, esto tiene algo de simplificación excesiva, y sus consecuencias son particularmente aparentes cerca

de un punto crítico. Pero en economía, las interacciones “globales” son más factibles. Los operadores de la bolsa de Londres son influidos por los demás en el mismo parquet, pero también pueden, gracias a las telecomunicaciones, saber el curso de las operaciones bursátiles que se producen en Nueva York y en Tokio. Así pues, para los modelos económicos, una teoría del campo molecular podría ser un enfoque muy realista.

La idea de un “campo molecular” que permite que cada individuo sepa lo que hacen los demás y responda a ello es también evidente en los intentos de algunos economistas por explicar las interacciones recurriendo a la teoría de juegos –una descripción matemática que explica cómo las personas efectuamos elecciones en los juegos competitivos, algo que investigaremos en el capítulo XVII–. En esos modelos, los operadores tratan de adivinar lo que otros operadores podrían hacer. La teoría de juegos ha aportado algunas perspectivas muy interesantes en los aspectos no racionales de las operaciones bursátiles, pero no ha conseguido ofrecer una explicación plausible de por qué el mercado fluctúa como lo hace.

Sin embargo, en economía, la presunción del campo molecular no puede asumirse por entero. Ningún operador puede poseer una visión global e instantánea del mercado. Tiene que existir algún grado de localización de interacciones entre los agentes. Las opciones de un agente en particular suelen estar más influidas por las de otros agentes que operan con sus mismos activos, sin importar la situación geográfica, que por lo que está sucediendo en un mercado lejano.

Con estas ideas en mente, Alan Kirman ha centrado su atención en la cuestión de cómo se propaga la información en el parquet. El asunto clave, afirma, es que la estructura de la red de información es parecida: “Me da la impresión de que la cuestión de cómo evolucionan las redes económicas es una de las más importantes si queremos empezar a comprender cómo se organizan los mercados”.¹⁷

Varios modelos microeconómicos de agentes interactivos dan por supuesto que entre los agentes existen lazos aleatorios. Esto es lo mismo que decir que cada agente tiene las mismas probabilidades de estar “conectado” aleatoriamente con otro miembro de la comunidad bursátil. Las personas sólo reciben influencias de las personas con quienes guardan alguna conexión. Kirman propuso este tipo de red de comunicación en 1983. Se dio cuenta de que los efectos de esa red en los modelos de agentes interactivos pueden conducir al agrupamiento: grupos de operadores

que desarrollan quién compra y quién vende, sobre todo entre ellos, y tienen muy pocas interacciones con otras personas fuera del grupo. Nos ocuparemos de las estructuras de red en el capítulo XV, donde veremos que esta idea de aleatoriedad no es la única, y no es necesariamente la mejor, manera de describir muchas de las redes sociales y empresariales que formamos las personas.

Además del agrupamiento, las interacciones entre agentes pueden conducir a un efecto conocido como *gregarismo*: la tendencia de los operadores a imitarse. Los episodios de comportamiento económico aparentemente irracional impulsados por alguna manía repentina que se apodera del mercado son notorios en la historia económica y no sólo porque ponen en tela de juicio las presunciones básicas de los teóricos. En la Holanda del siglo XVII, por ejemplo, el precio del tulipán se infló de manera absurda, cuando la teoría económica convencional dice que la ley de la oferta y la demanda debería estabilizar el precio.

En esto, una vez más, John Maynard Keynes llegó primero. En la década de 1930 comparó los mercados económicos con el tipo de concursos de belleza que a continuación fueron apareciendo frecuentemente en la prensa popular. Se ofrecía a los lectores una selección de “bellezas” y se les pedía que adivinaran cuál conseguiría más votos de los demás lectores. Por supuesto, es algo más sutil que pedir a los lectores que, simplemente, señalen a la “más bella”: requiere cierta intuición de cuál será el voto de los demás. Keynes supuso que este tipo de concursos daba pie a una conducta gregaria, pero no encontró la forma de expresar su suposición en términos teóricos.

En los años ochenta, Robert Shiller consideró de qué modo podría influir la conducta gregaria en la dinámica de los mercados de una manera cuantitativa. Le interesaba saber de qué dependen las variaciones de momento a momento en el volumen de negocios. Por lo general, los datos económicos suelen gozar de una propiedad llamada “agrupamiento de la volatilidad”, según la cual, las grandes fluctuaciones se producen durante ciertas convulsiones separadas por periodos relativamente inactivos. Durante esas convulsiones, el mercado está muy activo. Al parecer, es posible que esas convulsiones sean el resultado de una conducta gregaria que impulsa a un número cada vez mayor de operadores a comprar y vender de forma frenética. Pero queda una pregunta subyacente: ¿de dónde vienen las fluctuaciones?

NADA FUNDAMENTAL

Hemos visto cómo las teorías modernas, a las que representa la teoría del ciclo económico real, mantienen su determinación de desterrar las fluctuaciones del modelo y de situarlas fuera del sistema, como un “fijo” resultado de, por ejemplo, los cambios tecnológicos. Por otra parte, los modelos de agentes en interacción pueden aportar una explicación endógena de las fluctuaciones, mostrando que el comportamiento *de picos y valles* tan evidente en los precios de las acciones y en los índices económicos (véase la figura 8.2a de la página 230) puede surgir incluso en un sistema perturbado por nada más que un ruido gaussiano. Como dice Alan Kirman:

Los modelos que tienen en cuenta la interacción directa entre agentes nos permiten ofrecer una explicación de fenómenos macroeconómicos causados por esa interacción a nivel macroeconómico, pero que ya no son una versión ampliada de esta actividad.¹⁸

En otras palabras, las fluctuaciones de un índice económico causadas por la actividad de miles de operadores no tienen por qué ser una versión ampliada de las fuerzas aleatorias a las que cada operador individual está sujeto.

Es algo que han demostrado el economista Thomas Lux, de la Universidad de Bonn, aunque actualmente se encuentra en Kiel, y el físico Michele Marchesi, de la Universidad de Cagliari. En 1998 emplearon el modelo de fundamentalistas y pronosticadores de Alan Kirman para demostrar los orígenes de las variaciones en los precios de los activos. Los pronosticadores se dividían en dos grupos: optimistas, que compraban unidades adicionales de un activo con la esperanza de anticiparse a una subida de precios, y pesimistas, que venden más unidades de lo que sugieren sus pronósticos, ante el sombrío temor de que los precios se hundan. Ambos grupos de pronosticadores tienen en cuenta la conducta de otros operadores al hacer sus cálculos. Los pronosticadores pueden cambiar del pesimismo al optimismo y viceversa, y dan muestra de unas tendencias gregarias que dicta la opinión mayoritaria: cuando la mayoría de los pronosticadores son optimistas, por ejemplo, es más probable que los pesimistas cambien de bando. Además, los pronosticadores pue-

den convertirse en fundamentalistas y viceversa. Los agentes toman sus opciones considerando cuál es la estrategia más rentable: si a otro bando le va mejor, existe cierta probabilidad de que se unan a él.

En este modelo, los cambios en el precio de los activos vienen determinados por lo que hacen los operadores de acuerdo a las leyes de la oferta y la demanda. La fuerza que impulsa el cambio, entretanto, es la variación de los valores fundamentales. Lux y Marchesi dan por supuesto que esas fluctuaciones son gaussianas. Que sea así o no en la realidad resulta irrelevante para lo que se proponen. Lo que los investigadores citados querían poner a prueba es la idea, esencial en la teoría macroeconómica convencional, de que las fluctuaciones de los precios reflejan las de los fundamentos: la hipótesis de los mercados eficientes. Si esta idea se sostiene, los precios que surgen del modelo también deberían experimentar variaciones gaussianas.

Era muy posible que el modelo llegara a generar poco más que tonterías económicas. Pero en términos macroeconómicos, dio un magnífico resultado. A largo plazo, el mercado era “eficiente”: los precios y los fundamentos variaban considerablemente pero, más o menos, guardaban relación (véase figura 9.1a). Sin embargo, a corto plazo ocurría algo distinto. Las devoluciones, que reflejan las fluctuaciones de los precios, variaban de una forma decididamente no gaussiana (véase figura 9.1b). En otras palabras, las interacciones entre los operadores convertían una “entrada” gaussiana (los fundamentos) en una “salida” (precios y devoluciones) con propiedades estadísticas muy distintas en las que las fluctuaciones extremas eran mucho más comunes de lo que, por sí sola, la entrada parecía requerir. Además, la distribución de probabilidades no gaussiana para intervalos a corto plazo se convertía en gaussiana al pasar a largo plazo, justo como sucede en los datos del mercado real.

Thomas Lux y Michele Marchesi observaron un tipo de volatilidad parecido al que se observa en la realidad. Periodos de volatilidad elevada (grandes fluctuaciones) coincidían con periodos en los que la mayoría de los agentes eran pronosticadores. Dicho de otro modo, una estrategia eminentemente pronosticadora desestabiliza el mercado y da lugar a convulsiones. Pero el modelo incluye un mecanismo compensatorio que restaura la estabilidad. Cuando las fluctuaciones son grandes, los precios pueden diferir sustancialmente de los que dictan los

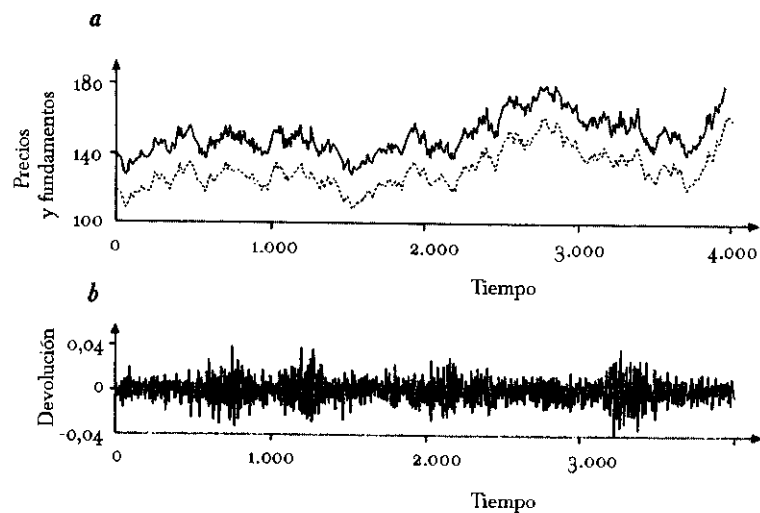


Figura 9.1. El modelo económico desarrollado por Lux y Marchesi muestra de qué modo la variabilidad aleatoria de los “fundamentos” que actúan sobre los precios cambia o se convierte en virtud de las interacciones de los operadores en una fluctuación de precios no aleatoria. (a) La variación de los precios a largo plazo (línea continua) oscurece la de los fundamentos (línea de puntos), lo cual demuestra que el modelo “se comporta adecuadamente”. Pero... (b) Las variaciones de las devoluciones a corto plazo (para una definición de “devolución”, véase la figura 8.2) tienen una distribución estadística no gaussiana; esto es, las fluctuaciones no son aleatorias y sus picos y valles son más pronunciados.

fundamentos. Un pronosticador se limitará a confiar en la tendencia que prevalezca en ese momento, sea cual fuere, mientras que un fundamentalista explotará esta divergencia y la aprovechará para mejorar sus beneficios. Por lo tanto, la estrategia fundamentalista dará mejores resultados y todos la considerarán preferible, lo cual motivará que los pronosticadores cambien de opciones. Esto impone un límite a las fluctuaciones del mercado.

Por lo tanto, Lux y Marchesi mostraron que las fluctuaciones características del mercado pueden ser endógenas –es decir, surgir en el seno del sistema–. En un intento por dar cuenta de las variaciones de la producción de las naciones, que normalmente viene definido por su Producto Interior Bruto (PIB), Paul Ormerod ha elaborado un modelo similar

de agentes interactivos. En este modelo, los agentes autónomos no son los operadores individuales sino las empresas. Éstas, al igual que los operadores bursátiles, no quitan ojo a lo que hacen los demás. Ajustan su producción a cada periodo económico (generalmente un trimestre) según sus previsiones de demanda a corto plazo, para las cuales se basan en el “ánimo” de los mercados.

Las fluctuaciones de la producción son, en esencia, un indicador del ciclo económico: la irregular serie de *booms* y depresiones que reflejan indicadores como el S&P 500. Ya hemos visto que el “ciclo económico real” convencional predice las propiedades estadísticas equivocadas de estas fluctuaciones. El modelo de Paul Ormerod, en el cual la variabilidad viene causada únicamente por el ruido gaussiano, da unos resultados mucho más realistas: la fluctuación de la productividad total ofrece estadísticas próximas a las de la realidad. Si Ormerod modificó sus supuestos sobre la distribución de las empresas por tamaño, las fluctuaciones conservan el mismo carácter estadístico pero pueden cambiar de amplitud: las *montañas* se allanan o son más escarpadas. La amplitud se hace mayor si la distribución se desvía en favor de unas pocas grandes empresas, mientras que las variaciones se suavizan cuando el perfil industrial está compuesto por muchas empresas pequeñas. Se trata de un mensaje sensato a la luz de la tendencia de que las pequeñas empresas sean absorbidas por un puñado de grandes empresas. En una economía en la que impere esta tendencia, cabe esperar que las recesiones sean más agudas. Así pues, al menos en este sentido, un mercado diversificado es un mercado más *saludable*.

No existe una única forma de elaborar un modelo que refleje las cambiantes y a veces irracionales apuestas de los operadores y de las empresas. La psicología que subyace a esas apuestas, sin duda una compleja mezcla de fe ciega, ilusiones, escrupuloso análisis de los datos, experiencias pasadas y mucho más, probablemente sea impenetrable o, al menos, imposible de expresar con términos matemáticos. Pero eso no tiene por qué importar. Como dijeron el economista Brian Arthur y los organizadores de un reciente taller sobre la “complejidad” en economía:

Es posible que no importe mucho saber *cómo* toman sus decisiones cada uno de los operadores. Lo que ocurra como resultado de sus acciones podría depender mucho más de la estructura de

las interacciones a través de la cual actúan: quién interactúa con quién, de acuerdo a qué reglas.¹⁹

Lo que la mayoría de los modelos de agentes interactivos revela es que, una vez que los maximizadores racionales desaparecen, el mito de una economía en equilibrio también se desvanece y es sustituido por algo que se asemeja más al mundo real: un mercado que fluctúa de forma salvaje y es proclive a las crisis. Por ejemplo, Arthur y sus compañeros han desarrollado un modelo en el que los agentes heterogéneos negocian sobre la base de un amplio abanico de estrategias y expectativas que los agentes revisan continuamente. Las estrategias que tienen éxito se mantienen, las que no funcionan se descartan. Cuando los agentes rara vez cambian de alternativa, la economía se acerca a las descripciones de la teoría racional neoclásica. Cuando los agentes revisan su comportamiento con una frecuencia que los investigadores consideran más realista, el mercado se sume en un estado impredecible, irregular y voluble muy parecido al de la vida real. En otras palabras, no parece que la economía esté guiada por la racionalidad.

¿HAY QUE DEJARLO ESTAR?

Si las interacciones entre operadores o entre empresas pueden dar explicación de los furiosos altibajos del mercado, es pura locura imaginar que el mercado pueda resolver sus problemas en el curso de días o semanas, o quizá más. Sin embargo, muchos gobiernos continúan creyendo que este tipo de manipulación es tan posible como deseable. Lo más probable, sin embargo, es que suponga un despilfarro de recursos, cuando no algo decididamente perjudicial para la economía.

No hace falta insistir en que las fluctuaciones del mercado, y en particular las recesiones, tienen graves consecuencias sociales y económicas. El crecimiento económico está íntimamente vinculado al empleo: con las crisis crece el paro, en periodos de bonanza, desciende. Keynes defendió que durante una depresión como la que siguió al *crack* de 1929, los gobiernos debían inyectar dinero en la economía para estimularla y devolverla a la fase de crecimiento. Keynes temía que, abandonado a su suerte, el sistema económico pudiera entrar en una espiral de recesión que aca-

baría por congelarlo, por incapacitarlo para volver al ciclo económico normal.

Hay muchos motivos para creer que Keynes tenía razón: la intervención del Estado puede ser el antídoto frente a la recesión. Ciertamente, parece que al inyectar dinero en la economía tras el *crack* de 1987, la Reserva Federal de Estados Unidos contribuyó a evitar la recesión. Sin embargo, conocer con exactitud cómo podría (o no podría) funcionar la intervención keynesiana, suscita cuestiones complejas que dependen de asuntos tales como las demoras entre los incrementos de la inyección monetaria y sus efectos en el mercado, la cuestión, más básica, de definir “inyección monetaria” y las expectativas generadas por las políticas intervencionistas. En *Vendiendo prosperidad* (1994), Paul Krugman ofrece una bella explicación de estas complejidades.

Sin embargo, las recesiones son acontecimientos extremos que piden medidas extremas. Los modelos microeconómicos de los que hemos tratado sugieren que los gobiernos que se preocupan de las fluctuaciones moderadas y a corto plazo del desempleo se parecen a los meteorólogos que se inquietan porque llueva una semana de julio. Esas variaciones son, sencillamente, parte del sistema, y la respuesta más eficaz no consiste en dirigir la economía hasta en sus más ínfimos detalles, sino en aliviar la desgracia temporal del desempleo. Si hubiera una mayor comprensión pública de tales desajustes, los gobiernos no tendrían por qué temer el oportunismo de los partidos de la oposición, que buscan sacar tajada de las recesiones puntuales de la economía (al tiempo que olvidan que tales sucesos ocurrían también cuando ellos gobernaban). Esto no es derrotismo, sino una propuesta para centrar con eficacia los recursos. Por la misma razón, haríamos bien en tomarnos con mayor escepticismo el hecho de que los gobiernos se apropien el mérito espurio de mejoras económicas a corto plazo que, con toda probabilidad, nada tienen que ver con su política.

Por otra parte, hoy existe quizás mayor peligro de caer presa de la creencia de que el mercado no debería soportar ninguna interferencia. Como he indicado en el apartado anterior, los fundamentalistas del mercado sostienen que la ausencia de intervencionismo constituye el mejor modo de dejar que la economía alcance su equilibrio. En ese venturoso estado se supone que todos los precios alcanzan su valor “verdadero”, el que determina la ley de la oferta y la demanda de Adam Smith

(el precio de compensación de mercado), y que todos los productos alcanzan la máxima eficiencia por su aprovechamiento social.

El atractivo de las políticas del *laissez faire* viene de lejos. Décadas antes de la publicación de *La riqueza de las naciones*, Charles Davenant afirmó: “El Comercio es libre por Naturaleza, encuentra su propia Vía y escoge mejor que nadie su propio rumbo”²⁰ –metáfora hidrodinámica en la que subyace la idea de que los precios alcanzan su nivel óptimo por sí solos-. Aunque opinaba que la actividad comercial no debía perder de vista la justicia más elemental, Adam Smith afirmó: “con frecuencia, debemos cumplir con las leyes de la justicia quedándonos quietos sin hacer nada”.²¹ Si eso no es *laissez faire*, ¿qué es? Para el conservador Edmund Burke, toda regulación comercial era “absurda, bárbara y, en realidad, malvada”.²² Es un punto de vista en modo alguno más extremo que el de los modernos economistas de derechas.

Hemos visto que la idea de un mercado en equilibrio es absurda. De ningún proceso o sistema que fluctúe con tan poca disciplina se puede decir que se aproxime siquiera a algo parecido al equilibrio. Lo que es más, no parece posible culpar de esas alteraciones a influencias externas que perturbarían un sistema que, de otro modo, tiene un comportamiento bien regulado. Los modelos microeconómicos de agentes interactivos sugieren que la economía es intrínsecamente inestable.

Algunos podrían decir que, de igual modo, el mercado responde con tanta flexibilidad y rapidez que, aunque cambie, siempre está en estado óptimo. En otras palabras, todavía distribuye bienes con la máxima eficiencia de un momento al siguiente. Pero incluso esta penetrante idea, el último refugio de la atractiva y duradera noción de “mercado eficiente” de Adam Smith, ha encontrado quien la ponga en duda. Un complejo y sofisticado modelo de agentes interactivos llamado *Sugarscape* y elaborado por Joshua Epstein y Robert Axtell, de la Brookings Institution, de Washington DC (lo describiremos en el capítulo XIV), revela que, cuando las relaciones mercantiles se ponen en manos de operadores realistas que sin conocimientos infinitos ni acceso a todos los demás operadores (esto es, de operadores que no son ni omnipotentes, ni omnipresentes, ni omniscientes), la distribución de los bienes es menos eficaz de lo que podría ser. Dicho de otro modo, algunos agentes son incapaces de procurarse bienes aunque los deseen y los puedan comprar.

Además, el modelo Sugarscape sugiere que si bien la actividad económica incrementa la “capacidad de negocio” de un territorio –el libre intercambio de bienes hace que una región sea capaz de sostener una población mayor–, también modifica la distribución de riqueza hacia una mayor desigualdad. En otras palabras, parece inevitable que la actividad económica coloque la riqueza en manos de unos pocos, circunstancia que comentaremos en el próximo capítulo.

Es posible que éste sea el precio que tenemos que pagar por el capitalismo, porque la experiencia nos dice que una economía férreamente controlada (como la de la antigua Unión Soviética) va contra los intereses tanto del bienestar general como de la eficiencia. Es algo que parecen confirmar los econofísicos. Sorin Solomon y sus compañeros de la Universidad Hebrea de Jerusalén han demostrado que los intentos por aplicar en todo el mundo una igualdad de riqueza tienden a que esa riqueza se acerque uniformemente a cero. Y un modelo económico de agentes interactivos ideado por Zdzislaw Burda, de la Universidad Jagelloniana de Cracovia, sugiere que las economías “socialistas” que restringen la actividad comercial son más susceptibles a derrumbarse y acabar en un estado en el que una gran parte de la riqueza está en manos de una sola persona. Es decir, son más susceptibles de caer en la corrupción. En general, se considera que la corrupción es un defecto humano, pero parece que algunos sistemas económicos tienen más probabilidad que otros de ser sus víctimas.

Pero el capitalismo extremo también es peligroso. Al fin y al cabo, las aleccionadoras historias de megacorporaciones como Enron y World-Com socavan la creencia de que la corrupción es exclusiva de las economías socialistas. Y Sorin Solomon y su equipo han demostrado que cuando los mercados se globalizan, existe un riesgo cada vez mayor de que toda la riqueza se concentre en un solo lugar. Esto no sólo es moralmente intolerable, sino peligroso para el mercado, que es mucho más susceptible de un derrumbamiento catastrófico que si tal “condensación de riqueza” se extendiera a muchos lugares diferentes. “El capitalismo extremo y el socialismo extremos –afirman– son igualmente contraproducentes y potencialmente desastrosos”.²³

Hallazgos como éstos están basados en modelos que con toda justicia pueden calificarse de sistemáticos, incluso de rudimentarios. No deberíamos verlos como otra cosa que como sugerentes. ¿Hay que creérselos?

Permita el lector que plantee la cuestión de otra manera. ¿Puede la derecha política aportar alguna justificación comparable, basada en la teoría más que en la ideología, de su defensa de los mercados sin restricciones? Sin duda, a algunos de los que participan en el juego esos mercados les dan muy bien resultado, pero no parecen ser el ideal de utilidad que la derecha (libertaria) pretende hacernos creer.

Ciertos economistas –afirman Epstein y Axtell– conceden poderes casi milagrosos a los mercados”, insistiendo en que toda intervención gubernamental evita que el mercado complete sus cualidades benéficas y de autorregulación. Ésta “es también, por desgracia, una posición que se promulga con frecuencia en los círculos políticos, especialmente cuando no existe ninguna evidencia econométrica o de otro tipo en la cual basar la toma de decisiones.”²⁴

Es hora de reconocer esas aseveraciones como lo que son: expresiones de fe, ajenas a los hechos y en su mayor parte basadas en puntos de vista prejuiciosos sobre el papel de los gobiernos, los impuestos y la legislación.

Tan consolidada está la filosofía del libre mercado en la teoría económica que hoy impera en Estados Unidos (me refiero a los expertos que ejercen verdadera influencia: los analistas de televisión, los columnistas del *Wall Street Journal*, los cerebros de los comités y, sobre todo, los asesores de la Casa Blanca),* que quienes se adscriben a este credo incluso esperan librarse del catastrófico derrumbe de las bolsas que avanza a toda máquina cuando escribo estas líneas. Echan la culpa a un puñado de ejecutivos corruptos, a la política gubernamental, a los inversores pequeños y volubles, a los sindicatos, a los críticos de izquierda que extienden las dudas y el pesimismo –por todas partes salvo en el propio mercado–. Si toda esa gente se *comportara*, dicen los defensores del libre mercado, las acciones nunca pararían de subir.

* Los miembros de todos esos grupos reciben en general el nombre de “economistas”, pero tienen poco en común. Paul Krugman prefiere llamar a los que no pertenecen al mundo académico “empresarios de la política” y a los demás “profesores”. Entre los profesores, asegura, hay muchos hombres de derechas y fundamentalistas del mercado, pero sus ideas se arraigan en la teoría en lugar de en los dogmas políticos.

Es muy probable que esta transparente tontería siempre encuentre una voz en tiempos de bonanza: cuando la economía florece, los liberales extremos se consideran vindicados. A las recesiones se las calificará de cosa del pasado –hasta que estalle la siguiente burbuja–. La verdad es que los altibajos de la economía son un rasgo intrínseco del juego capitalista que la ideología política no puede desechar. Son parte de las reglas naturales de la economía, porque tales reglas sin duda existen, por mucho que todavía no hayamos acertado a explicárnoslas. Si queremos hacerlo, parece probable que los modelos basados en la física pueden ayudar y, de ese modo, no hacer como el rey danés Knud y pedir que las olas se detengan en lugar de acudir en ayuda de quienes corren peligro de ahogarse.

X
DE PROPORCIÓN DESCOMUNAL
LOS ESTADOS CRÍTICOS Y EL PODER
DE LA LÍNEA RECTA

[...] el lector apreciará el orden de las líneas [...] y verá cómo ese orden indica la existencia de un principio gobernante fundamental.

GEORGE KINGSLEY ZIPF (1949)¹

La estética de las matemáticas y de las ciencias naturales es una con la estética de la música y de la pintura, inherentes ambas al descubrimiento de una pauta parcialmente oculta.

HERBERT SIMON (1996)²

Gran parte del mundo real está controlado tanto por las colas de las distribuciones como por los promedios, por lo excepcional y no por lo general, por la catástrofe y no por el goteo uniforme, por los muy ricos y no por la clase media. Hemos de librarnos del pensamiento promedio.

PHILIP ANDERSON (1997)³

Se podría pensar que la mejor forma de hacerse rico en la bolsa es dedicar toda la vida a estudiar su funcionamiento. Para los economistas John Maynard Keynes y David Ricardo, el conocimiento rinde dividendos. Ambos hicieron una fortuna especulando. (Lo que no está tan claro, eso sí, que sus ideas teóricas desempeñaran un papel más importante en sus éxitos que su sagaz instinto.) Por el contrario, pese a ser catedrático de economía política, Thomas Malthus, amigo de Ricardo, nunca desarrolló ninguna aptitud para jugar en la bolsa. Dejándose lle-

var por una cautela excesiva, perdió la oportunidad de hacer una fortuna fabulosa a raíz de la victoria de Wellington sobre Napoleón.

Ciertamente, sería una forma espléndida de calibrar la fe de los economistas en sus propias ideas exigirles que las pusieran a prueba con sus propios bolsillos. Un cínico podría esperar un substancial descenso en la literatura dedicada a las previsiones del mercado si ése fuera un criterio de publicación. En 1995, el científico francés Jean-Pierre Aguilar tuvo el singular valor de apostar su dinero en la propuesta de que en la economía hay una física. A raíz de un modelo de los *cracks* del mercado basado en la física se convenció de que tenía que comprar opciones de una empresa de fondos de gestión que operaba sobre la base de tales modelos. El modelo predecía un fuerte caída de bonos del Estado japoneses para mayo de ese mismo año. La caída no se produjo y Aguilar tuvo que invertir en una operación muy delicada para no perder su dinero. No es de extrañar que se contara entre los escépticos cuando, en 1998, algunos afirmaron que una técnica similar había *previsto* el *crack* de octubre de 1997. Este método de predicción sugería una intrigante idea: que los *cracks* se parecen mucho a los puntos críticos de la física estadística.

La idea de que la dinámica del mercado recuerda de algún modo al fenómeno de los puntos críticos tiene muchos seguidores. Con el fin de ver esta conexión, necesitamos observar una vez más esta extraña localización en el paisaje de los sistemas con muchas partículas. Muchas de las ideas más poderosas y asombrosas de la física estadística parten de las investigaciones realizadas en ese único lugar. El punto crítico motivó la exploración de la *continuidad* entre líquidos y gases de Johannes van der Waals. Muchos sistemas físicos, como los imanes y los superconductores, deben atravesar esa puerta si experimentan cambios totales de estado. Los puntos críticos son como los agujeros negros de la física estadística, porque todos los investigadores de ese campo acaban tropezándose con ellos antes o después. Normalmente, sin embargo, salen por el otro lado con una compresión mucho más rica y profunda de la forma en que esta rama de la física unifica el mundo físico.

En realidad, está de moda ver puntos críticos por todas partes: en los temblores de tierra, en la evolución, en los incendios forestales, incluso en las lista de espera de los hospitales y en las guerras mundiales. La persuasión de estas afirmaciones varía enormemente, pero es justo decir que muchas de las características del fenómeno del punto crítico –como

una sensibilidad extrema a las fluctuaciones, los acontecimientos “fuera de escala” y, en particular, una distribución de probabilidades especial– se encuentran con facilidad en la naturaleza y en la sociedad. Cuando menos, los puntos críticos son una buena metáfora, y a veces mucho más que eso, por su extraña combinación de lo impredecible con la norma, combinación que domina gran parte de nuestras vidas.

LA FÍSICA EN EL FILO DE LA NAVAJA

La teoría de Van der Waals explicaba la existencia de un punto crítico en el que los estados líquido y gaseoso de una sustancia se vuelven indistinguibles. Pero esa teoría no podía dar cuenta de algunos fenómenos extraños. Para empezar, los fluidos que están próximos al punto crítico se enturbian (a esto se le llama “opalescencia crítica”) y nadie sabía por qué.

La teoría abrazó cierta peculiaridad experimental: la extraordinaria sensibilidad del punto crítico. Un sistema próximo a su estado crítico se vuelve extraordinariamente sensible a las perturbaciones. Si apretamos una sustancia, pierde volumen. La resistencia que ofrece a la compresión es una medida de su compresibilidad. Una pelota de goma es más compresible que una bola de acero, y un gas es mucho más compresible que un líquido –es más fácil comprimirlo–. En el punto crítico del paso de líquido a gas, el fluido se hace compresible hasta el absurdo, en realidad, su compresibilidad de vuelve casi infinita. En principio, la compresión más débil basta para que un fluido se haga invisible. Esto parece absurdo y experimentalmente es inobservable, porque mantener una sustancia exactamente en su punto crítico es demasiado difícil –el estado crítico es muy inestable–. Pero lo que sí es posible observar es que la compresibilidad empieza a incrementarse muy rápidamente cuando se alcanza el punto crítico.

Lo mismo puede decirse de la respuesta de una sustancia al calor. Para elevar la temperatura de un sistema hay que introducir energía. A la cantidad de energía calórica necesaria para elevar la temperatura un solo grado se le llama *capacidad calórica*. El agua tiene una capacidad calórica singularmente alta, razón por la cual el agua de una tetera tarda mucho tiempo en hervir. En el punto crítico, la capacidad calórica de una sustancia se vuelve infinita. Es como si se convirtiera en un desaguadero de calor: se le puede calentar todo lo que se quiera, pero su temperatura

no cambia. Un punto crítico separa el helio líquido ultra-frío de ese raro estado no viscoso conocido como superfluido (página 116), y el súbito incremento en la capacidad de calor del líquido a una temperatura que está en torno a los 2°C por encima del cero absoluto es la prueba irrefutable de que se está aproximando a su transición de fase a superfluido.

Estas conductas tan extrañas se llaman *divergencias*: alguna propiedad de la sustancia diverge hacia el infinito en el punto crítico. La teoría de Van der Waals predice las divergencias en la compresibilidad y en la capacidad de calor de los fluidos en el punto crítico. Explica por qué, en el punto crítico, la situación se va de las manos. Existe una muy conveniente cifra llamada *exponente crítico* que especifica esos índices de divergencia. Midiendo con cuánta rapidez una cantidad como la capacidad de calor se incrementa cuando la temperatura alcanza su punto crítico, los científicos pueden calcular con facilidad el exponente crítico. Lo asombroso es que este exponente es el mismo para todos los fluidos. El exponente crítico que caracteriza la divergencia de compresibilidad es distinto del de la capacidad calórica, pero también es el mismo para todos los fluidos. Al parecer, los exponentes críticos líquido-gas son “universales”.

Para comprender el significado de los exponentes críticos hay que recurrir a las matemáticas, siquiera someramente. Los exponentes definen una relación matemática existente entre dos cantidades que se llama ley de potencias. Si el valor de una cantidad y depende del valor de otra cantidad x , de acuerdo a una relación de ley de potencias, cada vez que x se duplica, y se incrementa siguiendo un factor constante. El exponente de la ley de potencias es una cifra que nos dice cómo de grande es ese factor. Cuanto mayor es el exponente, más rápido se incrementa y cada vez que x se duplica. Si, por ejemplo, el exponente tiene valor 2, entonces y se incrementa cuatro veces cada vez que x se duplica. Si el exponente es 3, y se incrementa ocho veces.

Se trata, tal vez, de un concepto más sencillo de lo que parece. Por ejemplo, hay una relación de ley de potencias entre la longitud de las aristas de un cubo y su volumen —en este caso, el exponente es 3—. * Si duplicamos la longitud, el volumen del cubo se multiplica por un factor

* En otras palabras, el volumen depende de la longitud del lado elevado a la tercera potencia: la longitud elevada al cubo. El exponente es, simplemente, el superíndice en esta relación. Una ley de potencias general tiene forma matemática: $y=x^n$, donde n es el exponente.

de 8. Se pueden encajar ocho cubos de cinco centímetros de lado en un cubo de diez centímetros de lado.

Cada propiedad de un fluido que diverge en un punto crítico lo hace a un ritmo marcado por un exponente crítico, que es el mismo para todos los fluidos. Algunas cantidades no se incrementan hasta el infinito en un punto crítico, sino que descienden hasta cero. La diferencia de densidad entre un líquido y un gas hace esto, por ejemplo, como lo hace la magnetización de un imán en su punto de Curie (véase la página 109). Una vez más, hay un ritmo característico al cual esas cosas descienden a cero. También a ellas se les puede asignar un exponente crítico, pero los exponentes tienen valores negativos.

La teoría de Van der Waals del punto crítico de líquido a gas predice estas divergencias de ley de potencias, pero calcula mal los valores de los exponentes críticos. En realidad, la teoría dice que, en el punto crítico, las divergencias se elevan como montañas, pero no dice si esas montañas son suaves o escarpadas. Esto se supo en los años ochenta, cuando, en el viejo laboratorio de Johannes van der Waals en Leiden, Jules Verschaffelt tomó medidas muy precisas del comportamiento crítico de un hidrocarburo líquido llamado isopentano. Verschaffelt observó que el exponente crítico para la desaparición de la diferencia de densidad parecía ser de en torno a -0,343, mientras que el valor que predecía la teoría de Van der Waals era de exactamente -0,5. Cabría suponer que se trata de una diferencia muy pequeña —y eso pensaron algunos en su momento—, pero el hecho de que los exponentes críticos sean universales para todos los fluidos debe de encerrar algún saber fundamental acerca de la naturaleza de la materia. Así que merece la pena preguntarse qué le falta a la teoría de Van der Waals para qué no nos diga toda la verdad acerca del punto crítico.

UN EQUILIBRIO TEMBLOROSO

Lo que la teoría de Van der Waals no podía decir de los puntos críticos era que la clave de su peculiaridad reside en sus fluctuaciones. Un punto crítico es como una encrucijada, un lugar donde hay que tomar una decisión. En esto, recordará el lector, es en lo que una transición de fase crítica difiere fundamentalmente de las transiciones de primer orden

de, por ejemplo, la congelación y la ebullición. Cuando un líquido se asoma al borde de su punto de congelación, cada una de sus partes mira a su destino cara a cara: convertirse en sólido. Pero si enfriamos un fluido por debajo de su temperatura crítica, entonces, puede existir en dos estados, ambos igualmente atractivos: líquido o gas.* Y lo mismo puede decirse de un imán. Recordemos el modelo de Ising (página 109), por debajo de la temperatura crítica (la temperatura de Curie) un imán puede alinear todas sus agujas magnéticas atómicas (sus spins) en una de dos direcciones opuestas –y nada más que esas dos–. Así pues, un punto crítico es como una pelota puesta en la cima de una colina entre dos valles idénticos: o baja por uno o baja por el otro, pero, ¿por cuál? La elección la determinan las fluctuaciones.

En teoría, un fluido supercrítico tiene la misma densidad en todas partes. Pero las fluctuaciones azarosas –los movimientos aleatorios de los átomos– harán que, por instantes, esté más denso en unos lugares y menos denso en otros. Cuando el fluido es enfriado más allá de la transición de fase crítica, las regiones más densas tienden a pasar a líquido, puesto que ya estaban a punto de hacerlo. Las regiones menos densas suelen optar por el estado gaseoso. Las dos elecciones aleatorias se perpetúan. Esto es más fácil de ver en los imanes, donde una zona en la que todos los spins estén alineados fomentará que otros spins de la periferia se alineen del mismo modo, por medio de las interacciones entre un spin y sus vecinos más próximos.

En consecuencia, el sistema se vuelve exquisitamente sensible a las fluctuaciones aleatorias. Una ínfima diferencia en las preferencias inclinará la balanza de uno u otro lado. La inestabilidad significa que el estado crítico es muy precario, que constantemente está al borde de rodar por una ladera o por la otra. Mantener una sustancia en su punto crítico es como intentar que una aguja se mantenga en equilibrio soplándole desde todas direcciones al mismo tiempo.

Una peculiaridad fundamental surge de esta sensibilidad extrema a las perturbaciones: lo que ocurra en una parte del sistema puede tener un instantáneo efecto llamada en cualquier otra parte de ese sistema. La

* Para los físicos, un fluido no es más que una sustancia que fluye: puede ser un gas o un líquido. Por encima del punto crítico no se puede en realidad hablar de “gas” o de “líquido”, así que el término “fluido” se vuelve indispensable.

orientación de un spin puede afectar a la de otro que está muy alejado de él, aunque ambos estén demasiado lejos para influirse directamente. En la jerga de la física estadística: hay correlaciones de largo alcance en el sistema. El alcance de las correlaciones –la distancia típica sobre la que una partícula puede afectar a otra partícula– es otra de las cantidades que diverge hasta el infinito en un punto crítico.

Esta hipersensibilidad tiene un efecto colectivo. El alcance de la fuerza de la interacción entre dos partículas o spins del sistema no aumenta súbitamente en el punto crítico; en el modelo de Ising, por ejemplo, se amplía sólo hasta sus vecinos más próximos. Pero esas interacciones pueden transmitirse de partícula en partícula, alcanzando largas distancias sin que las superen los efectos aleatorizantes del movimiento térmico. Sus susurros se entienden con tanta claridad al final como al principio. En el punto crítico, todas las partículas pueden actuar al unísono.

El problema es que cada partícula *quiere* que todas las demás hagan lo mismo que ella. En consecuencia, el estado crítico se fragmenta en zonas que toman un camino o el otro, llevada cada una por desequilibrios localizados que surgen al azar. Esas regiones pueden ser de cualquier tamaño, desde una sola partícula a un grupo lo bastante grande para abarcar todo el sistema (véase figura 10.1). Se están formando y disolviendo, creciendo y encogiéndose constantemente. Por lo tanto, el estado crítico convoca un tipo especial y propio de fluctuaciones del ruido térmico que están *fuera de escala* y son de todos los tamaños concebibles.*

Este comportamiento es la causa de la opalescencia crítica: la lechosisidad de los fluidos cerca de su punto crítico. Bajo estas condiciones, un fluido se separa en regiones de líquido y gas de muchos tamaños. Algunas de esas regiones son del mismo tamaño que las longitudes de onda de la luz visible (algunos cientos de millonésimas de milímetro) y que coinciden significa que esparcirán mucho la luz, como los microscópicos glóbulos de grasa de la leche. Así que el fluido adopta un aspecto perlado y opaco.

La teoría de Van der Waals yerra con los exponentes críticos porque no reconoce la imagen microscópica de las fluctuaciones de estado crítico.

* El ruido térmico surge de las fluctuaciones de las energías de las partículas causadas por colisiones. Se manifiesta a modo de pequeñas variaciones de temperatura en cualquier localización de un sistema. Esas fluctuaciones son aleatorias, o gaussianas: como las que muestra la Figura 8.2b (página 230), y tienen un tamaño característico.

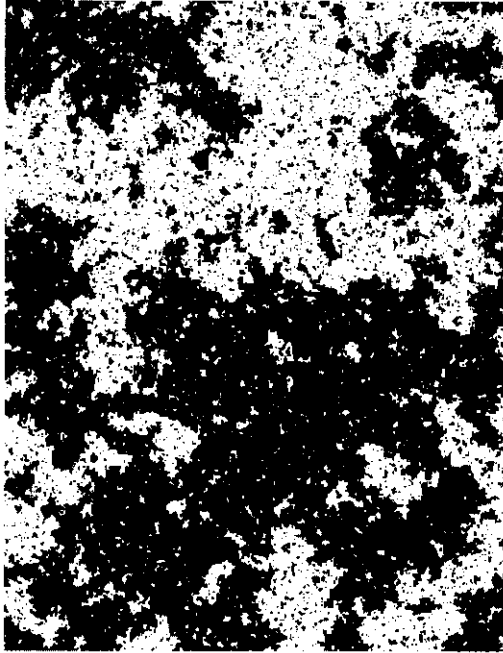


Figura 10.1. En un punto crítico pueden producirse fluctuaciones de todos los tamaños. En esta simulación por ordenador, las zonas negras podrían representar a un líquido y las blancas a un gas. O ambas podrían ser regiones de un imán donde los spins señalan en direcciones contrarias. El tamaño de estas regiones abarca todas las escalas, desde el tamaño de una sola partícula al tamaño del sistema entero. No hay escala típica en esta irregularidad: la escala es libre.

Al contrario, considera que, de promedio, el estado crítico es el mismo en todas partes, como si mirásemos la figura 10.1 desde cierta distancia y entrecerrando los ojos y, en lugar de zonas blancas o negras, lo viéramos todo gris. De acuerdo a esa imagen, cada partícula no sentiría la *blancura* o la *negrura* de sus discretos vecinos, sino únicamente la influencia de un *gris* medio sobre todas las demás partículas. A esto se le conoce como aproximación de campo molecular (véase página 253). La teoría del campo molecular de Van der Waals describe el estado crítico con considerable precisión y sólo fracasa en los detalles. Como hemos visto, el análisis del punto de Curie que hizo Pierre Weiss (página 107) también es una teoría del campo molecular y predice los mismos expo-

nentes críticos ligeramente incorrectos de la transición magnética que la teoría de Van der Waals para la transición crítica líquido-gas. El análisis de Lars Onsager del modelo de Ising bidimensional (página 110) fue más allá de la aproximación del campo molecular, lo cual le permitió calcular los valores exactos de los exponentes críticos. Pero para predecir esos valores teóricamente en un fluido real, necesitamos tener el éxito de Onsager con un modelo de tres dimensiones. Y esto, como ya vimos, se ha demostrado imposible.

Hay una forma de sortear esta dificultad, un ardid que permite a los físicos teóricos captar los valores “verdaderos” de los exponentes críticos en modelos como el tridimensional de Ising. Se trata de la *renormalización* y aprovecha que el punto crítico es por naturaleza fuera de escala. La técnica la desarrolló Kenneth Wilson, de la Universidad de Cornell, en los años sesenta, por lo cual recibió el Premio Nobel de Física en 1982. En efecto, la renormalización es una forma matemática de mirar con los ojos entrecerrados el estado crítico y eliminar *selectivamente* los detalles más insignificantes: las pequeñas gotas se borran y se hacen grises mientras las grandes permanecen. Conduciendo este proceso de renormalización a lo largo de varias escalas sucesivas, se pueden calcular los verdaderos valores de los exponentes críticos. Aplicado al modelo de Ising en tres dimensiones, este método proporciona valores cercanos a los que se recogen en mediciones experimentales para los fluidos reales.

El modelo de Ising para fluidos, con sus cajas llenas o vacías sobre una retícula, es una cruda aproximación a un fluido real. Pero los exponentes críticos del modelo en tres dimensiones son, por lo que se puede saber, exactamente los mismos que los que se miden experimentalmente para los líquidos y los gases. Ésta es, una vez más, una manifestación de la idea de universalidad: en lo que respecta al comportamiento crítico, los detalles no importan. Sólo las propiedades más relevantes de un sistema afectan a su comportamiento crítico; no si es nitrógeno o isopentano, o un metal magnético, o un modelo tosco de ambas cosas, sino si es bidimensional o tridimensional, si sus partículas interactúan a larga o corta distancia. Las diferencias de este tipo bastan para incluir dos sistemas en distinta *clase de universalidad*, todos los miembros de la cual comparten los mismos exponentes críticos. A no ser que existan tales diferencias, sistemas aparentemente distintos parecen iguales en su punto crítico.

CRACK CRÍTICO

Un documento escrito en 1999 del que es coautor Jean-Pierre Aguilar empieza:

Resulta bastante tentador ver los *cracks* financieros como análogos a los puntos críticos de la mecánica estadística, donde la respuesta a las pequeñas perturbaciones se hace infinita porque todas las subpartes del sistema responden de forma cooperativa.⁴

Ésa es la tentación en la que cayó Aguilar en 1995. Se había dicho que las crisis financieras corresponden a un tipo especial de transición crítica: la que muestra el llamado comportamiento de lógica-periódica. Esos puntos críticos surgen en el seno de ciertos modelos de la física estadística y tienen una seña de identidad propia. Este tipo de sistema tiende a las fluctuaciones periódicas, oscilatorias. En un contexto económico serían análogas a los ciclos económicos periódicos. Pero las variaciones logarítmico-periódicas no son como las oscilaciones regulares de una onda de luz o de un diapasón. Por el contrario, los picos y valles de las ondas están muy juntos. En el propio punto crítico se amontonan unos encima de otros. El enfoque de esa transición crítica viene, por tanto, señalado con antelación por los picos y valles que se siguen a intervalos cada vez más cortos: una serie de oscilaciones cada vez más aceleradas que anuncian la catástrofe.

Este precursor del punto crítico en tales sistemas conduce a algunos físicos a creer que, si las crisis financieras son de verdad puntos críticos logarítmico-periódicos, se pueden predecir identificando las oscilaciones más reveladoras de un índice económico y extrapolándolas hasta el punto en que coinciden. Dicho de otro modo, debería ser posible calcular la próxima llegada de un gran *crack*. En 1998, Marcel Ausloos y sus compañeros de Bélgica se valieron de este enfoque para estudiar el *crack* de octubre de 1997. A partir de su análisis de las fluctuaciones que se produjeron justo antes del *crack*, aseguraron que habrían sido capaces de predecir cuándo tendría lugar.

Sus trabajos alcanzaron las primeras páginas. Si era cierto, sería toda una revolución. Los inversores ya no tendrían por qué arruinarse con las caídas impredecibles de la bolsa. Bastaba con observar con detalle

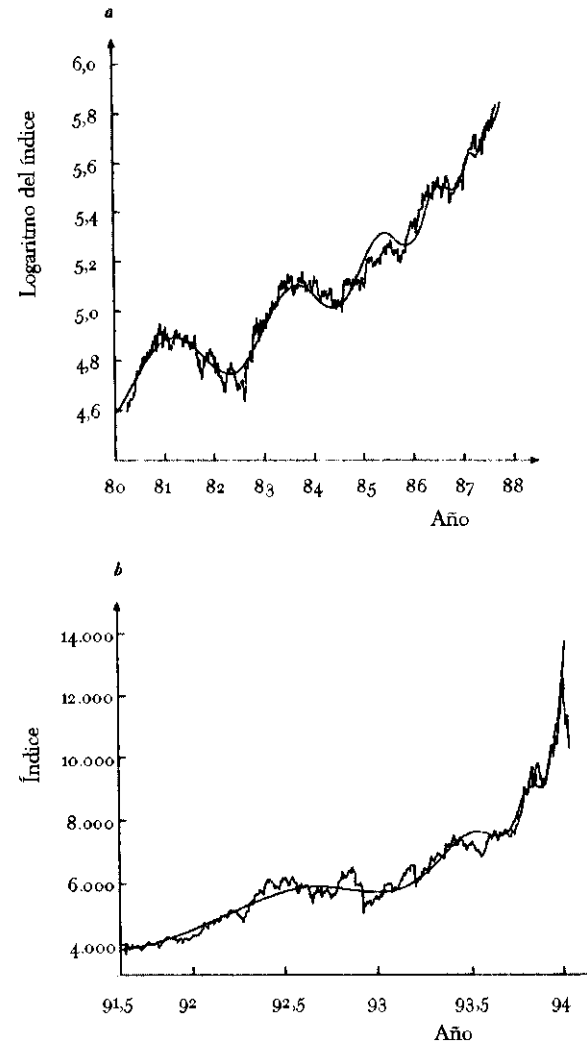


Figura 10.2. En el modelo logarítmico-periódico de las crisis financieras, las oscilaciones en los índices económicos se acumulan en un punto crítico, justo donde tiene lugar un *crack*. Algunos investigadores afirman que pueden ajustar una curva logarítmico-periódica a diversas crisis. Aquí aparecen los ajustes que Didier Sornette hizo del índice S&P 500 antes del *crack* del 19 de octubre de 1987 (a) y del índice Hang Seng antes de la caída de la bolsa de Hong Kong en marzo de 1994 (b).

sus altibajos para predecir el futuro. No era un método infalible, puesto que las oscilaciones sólo aparecían cerca del *crack*; en otras ocasiones, los precios “pierden toda memoria” del pasado en unos minutos y la predicción es imposible. Pero sería un instrumento maravilloso para las empresas de inversión.

El físico matemático francés Didier Sornette, que trabaja en la Universidad de California en Los Ángeles, está convencido de que las crisis del mercado son logarítmico-periódicas y ha observado que, en el pasado reciente, muchas de ellas encajan en el modelo de oscilaciones cada vez más frecuentes (véase figura 10.2). Según él, un *crack* no sólo se puede prever con semanas o meses, sino con años de adelanto. Sin embargo, hay econofísicos que no están convencidos. Desde Francia, Aguilar y su equipo sostienen que la forma en que el grupo de Ausloos hace coincidir la curva que predice el modelo logarítmico-periódico con los datos reales de 1997, supone una interpretación selectiva de lo que constituía un valle. Dicen que la técnica no funciona cuando se aplica a otras crisis y consideran muy improbable que un *crack* pueda guardar alguna relación con lo que el mercado hacía con varios años de antelación. Las coincidencias entre la teoría de los puntos críticos logarítmico-periódicos y los datos reales (como en el *crack* de octubre de 1997) que parecen ser buenas, concluyen, sólo son fortuitas.

Por supuesto, las *previsiones a posteriori* siempre son cuestionables en cualquier circunstancia. Puesto que lo que ocurrió ya se sabe, ¿es posible ser verdaderamente objetivo al *predecirlo*? Didier Sornette admite con cierto disgusto que intentar hacer una predicción genuina de un *crack* es una tarea muy ingrata. Sornette y su compañero WXZ predecían un *crack* en el mercado inmobiliario británico para finales de 2003. (Esta temeraria predicción aún puede consultarse en <http://www.ess.ucla.edu/faculty/sornette>.) Hay al menos, afirma, tres resultados posibles:

- Nadie cree la predicción, pero el mercado se derrumba de todas formas. En este caso, los críticos dirán que no es más que una solitaria y afortunada correlación sin significado estadístico. Además, ¿de qué vale una advertencia si no evita el *crack*?

- Muchos inversores creen la predicción, se dejan llevar por el pánico y, por lo tanto, causan un *crack*. Es decir, la predicción incide en su cumplimiento.
- Muchos inversores creen la propia predicción y adoptan medidas para evitar el *crack*, así que no hay crisis. Es decir, la propia predicción evita su cumplimiento.

Ése es el problema con el sueño de la predicibilidad en economía: el comportamiento futuro del mercado depende de lo que los operadores y los inversores creen que va a suceder, así que es muy probable que, por el hecho de predecirlo, el futuro se pueda modificar (si es que la predicción se toma en serio).

EL MERCADO AUTORREGULADO

A pesar del escepticismo que despierta el modelo de crisis logarítmico-periódicas, la idea de que la dinámica del mercado está gobernada por conductas semejantes a las de los estados críticos ha encontrado amplia aceptación. En el capítulo VIII vimos que las estadísticas de las fluctuaciones económicas no son gaussianas. En vez de ello, las fluctuaciones parecen (al menos en marcos temporales de breves a moderados) fuera de escala: se advierten variaciones de todos los tamaños. Estadísticamente, los datos económicos de las “colas anchas” de la distribución de probabilidades siguen una ley de potencias, un rasgo característico de la conducta del punto crítico.

La ley de potencias nos habla de la probabilidad de las fluctuaciones de un tamaño determinado. Pongamos por caso que estudiamos la secuencia temporal de un índice económico como el que aparece en la figura 8.2 (página 230) y tomamos nota de la frecuencia con la que obtenemos una devolución de cierto tamaño. El irregular gráfico oscila a ambos lados de cero: la devolución más probable es cero y las desviaciones importantes son raras. Si medimos el número relativo de fluctuaciones de tamaño cada vez mayor, nos damos cuenta de que la probabilidad decrece de acuerdo a la ley de potencias. De igual modo que un sistema en su punto crítico puede responder a una perturbación experimentando una fluctuación (de cualquier tamaño), podemos suponer que esta distribución de probabilidades de las fluctuaciones del mercado económico también

señala que, en cierto sentido, se trata de un estado crítico en el que los precios pueden subir o hundirse dependiendo de los factores aleatorios que influyen en ellos.

Pero un estado crítico es muy precario y susceptible de desmoronarse hacia un lado o hacia otro a la más ligera provocación. Así pues, si el mercado es crítico, ¿cómo puede haber permanecido en ese estado tanto tiempo? En 1987, un grupo de físicos del Laboratorio Nacional de Brookhaven, situado en la localidad estadounidense de Long Island, se toparon por casualidad con un sistema que tenía la extraña y milagrosa propiedad de reorganizarse constantemente en un estado crítico. A ese fenómeno lo llamaron *criticalidad autoorganizada*. Esos investigadores —Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld— no tenían como objetivo la investigación de los puntos críticos. Lo que intentaban hacer era extraer el sentido de un problema recóndito de la física del estado sólido, el problema de cómo los electrones atraviesan a veces los sólidos cristalinos en una serie de ondas llamadas ondas de carga y densidad. Resultó que se trataba de una especie de movimiento correlativo. Los electrones no se mueven de manera independiente, como hacen a lo largo de un cable eléctrico normal. En vez de ello, el movimiento de un electrón tiene un gran efecto sobre los demás: todos están asociados.

Bak, Tang y Wiesenfeld ampliaron su perspectiva sobre los sistemas asociados de muchas partículas interactivas. Como tosco modelo de las ondas de carga y densidad, imaginaron muchos péndulos en oscilación, unidos por muelles. Los dos sistemas no parecen guardar ninguna similitud, pero, matemáticamente, existe una analogía entre ellos, de igual modo que un péndulo sirve de modelo de cualquier proceso en el que haya algún movimiento periódico sencillo. Cuando los investigadores estudiaron el comportamiento de este modelo escribiendo sus ecuaciones newtonianas de movimiento y resolviéndolas por ordenador, observaron algo muy curioso. Si dejaban que uno de los péndulos siguiera balanceándose, otros se movían, puesto que la energía se comunicaba a través de los muelles. Ahora bien, la transmisión era irregular, resultaba imposible predecir su alcance: unas veces, el movimiento de un solo péndulo se transmitía a sus vecinos más próximos; otras, una *avalancha* recorría el sistema, con miles de péndulos en movimiento. No había forma de saber el tamaño de esa avalancha. Cuando los investigadores dibujaron la distribución de probabilidades de esas avalanchas —qué probabi-

lidad había de que se produjera una avalancha de un tamaño determinado— encontraron una ley de potencias. La seña de identidad de los gráficos de ley de potencias es que, cuando se los traza en una escala logarítmica (véase la leyenda de la figura 10.3), la curva de distribución de probabilidades se convierte en una línea recta.

El equipo de Brookhaven ideó a continuación un modelo más atractivo e intuitivo de ese comportamiento asociado. Sustituyeron sus péndulos y sus muelles por un montón de arena. Imaginemos que dejamos caer granos de arena sobre una mesa. El montón va convirtiéndose poco a poco en una montañita. Cuando las laderas alcanzan cierta altura, si se dejan caer nuevos granos en la parte alta, se puede producir una avalancha. Antes de este punto, los granos se mantienen en su lugar a causa de la fricción, que evita que se deslicen. A partir de cierto ángulo bien definido, la fricción ya no puede evitar el desplazamiento y empiezan las avalanchas. Cuando un grano empieza a moverse, choca con otros, impulsando una especie de reacción en cadena: el desplazamiento de los granos se asocia a las colisiones. Este proceso podría perder ímpetu a partir de que algunos granos empezaran a rodar. O podría continuar propagándose hasta que prácticamente toda la ladera se precipitara en una avalancha catastrófica.

Esto es lo importante: no hay forma de prever, cuando añadimos un nuevo grano a la avalancha, si moverá sólo unos pocos granos, precipitará la avalancha de toda la ladera o sucederá algo entre una cosa y la otra. Cuando Bak, Tang y Wiesenfeld idearon un modelo matemático simple de este experimento del montón de arena y lo estudiaron en un ordenador, volvieron a observar que el tamaño de distribución de las avalanchas seguía una ley de potencias (véase figura 10.3). Las grandes avalanchas son menos frecuentes que las pequeñas, pero pueden ocurrir avalanchas de todos los tamaños. En otras palabras, las fluctuaciones del montón están fuera de escala. Se puede considerar que la pila existe en un estado crítico.

Toda avalancha libera “tensión” en el montón, bajando el ángulo de la pendiente y restaurando la estabilidad. Pero sólo un poco. La avalancha se limita a volver al montón al borde de deslizarse, de modo que el siguiente grano que se añade pueda precipitar otro deslizamiento. De este modo, el montón de arena ronda este estado de estabilidad precaria sin desviarse mucho de él. Lejos de que el montón esté condenado a

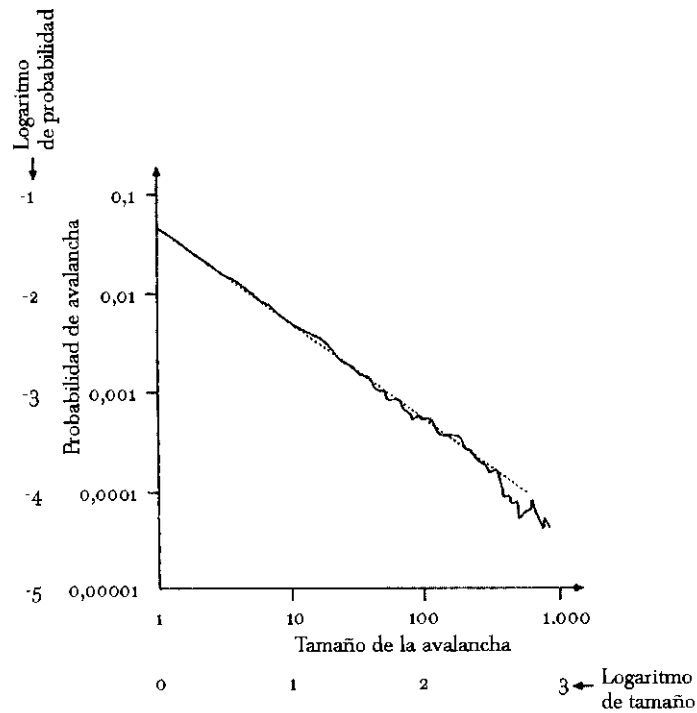


Figura 10.3. La ley de distribución de probabilidades de las avalanchas en un modelo matemático de un montón de arena. La mejor manera de demostrar que la ley de potencias determina el logaritmo del tamaño de la avalancha frente al logaritmo de su probabilidad: a continuación, el gráfico se convierte en una línea recta. La pendiente de la línea equivale al exponente de la ley de potencias. Aquí, la pendiente es cercana a -1, que es característica de la criticalidad autoorganizada. Los grandes acontecimientos, a la derecha del gráfico, son menos frecuentes, así que las estadísticas son menos fiables en ese tramo: la línea es más irregular. La línea recta que recoge los datos con mayor fidelidad es una línea de puntos.

desmoronarse sin remedio, más bien el estado crítico se reedita continuamente después de cada avalancha. Por eso se dice que el estado crítico es autorregulado. Por el contrario, el estado crítico de un líquido o de un gas puede considerarse autodestructivo, listo para transformarse en un sistema estable y totalmente distinto a la más leve perturbación.

El modelo del montón de arena describe una situación de desequilibrio. Aquí, el estado crítico es un “estado estacionario”, porque el sistema nunca se aleja demasiado de él. Pero no es un estado equilibrado, porque no es inmutable: recibe nuevos granos constantemente. La caída de los granos sobre el montón es la fuerza impulsora que impide el equilibrio. La criticalidad autoorganizada es una propiedad de los sistemas en desequilibrio.

La criticalidad autoorganizada es uno de los pocos descubrimientos genuinamente nuevos de la física estadística en las dos últimas décadas y ha demostrado ser una idea asombrosamente fértil. Per Bak ha identificado un amplio abanico de fenómenos naturales que parecen experimentar fluctuaciones de ley de potencias susceptibles de criticalidad autoorganizada –o algo parecido–. Desde hace tiempo se sabe que los terremotos obedecen a una distribución de probabilidades de ley de potencias: esto es, la probabilidad de un terremoto disminuye a medida que su intensidad aumenta de acuerdo a una ley de potencia. Es lo que descubrieron en los años cuarenta los sismólogos Beno Gutenberg y Charles Richter, del Instituto de Tecnología de California. Consultaron un catálogo mundial de terremotos y elaboraron un gráfico del número de sucesos de cada tamaño. En aquella época, no había modo de interpretar su ley de potencias. Pero Bak y los demás han sugerido que refleja la criticalidad autoorganizada en los sistemas de falla geológicos. Los movimientos de la corteza de la Tierra crean tensiones en las formaciones rocosas hasta que, finalmente, hay deslizamiento. Esto libera la tensión, pero sólo lo suficiente para recuperar la estabilidad. A continuación, la presión empieza otra vez. Normalmente, la presión se libera en pequeñas dosis, causando temblores de poca importancia, pero de vez en cuando se produce una liberación catastrófica y el desastre azota una ciudad como Los Ángeles o Kobe.

Bak observó también criticalidad autoorganizada en los incendios forestales. En muchas grandes zonas boscosas el peligro de incendio es mayor, pero la mayoría de los incendios son de extensión limitada. A veces, sin embargo, un incendio puede propagarse de copa en copa hasta arrasar un bosque entero. La actividad volcánica, las manchas solares, los *temblores de estrella* que se cree que ocurren en objetos celestes tan exóticos como las estrellas de neutrones, incluso la pauta de las extinciones de las especies en la historia fósil, todo ello, asegura Bak, lleva la huella de la ley de potencias y de la criticalidad autoorganizada.

Es irónico, pero da la impresión de que el montón de arena no se encuentra en un estado crítico autorregulado. A primera vista el experimento parece sencillo, pero en la práctica es muy difícil medir los deslizamientos de la arena con precisión y reunir datos de un número lo suficientemente amplio de avalanchas a fin de discernir una ley de potencias genuina de algo que se le parece mucho. De modo que diversos experimentos han arrojado resultados conflictivos. Pero parece que el modelo matemático original construido por Bak, Tang y Wiesenfeld prescinde de algunos aspectos importantes de los granos de arena reales, como una descripción precisa de la forma en que, con los choques, se disipa la energía de un grano que cae. La auténtica criticalidad autoorganizada (CAR) parece algo esquiva en los granos de arena: en los cereales, tal vez en algunos casos, pero no en todos. Por ejemplo, se ha dicho que hay CAR en los granos de arroz, pero no en los de arena. Así pues, la forma del grano importa.

Esto pone en tela de juicio la afirmación de Bak de que la CAR es la clave del “funcionamiento de la naturaleza”: parece un fenómeno insuficientemente general y enérgico para aspirar a tal grado de universalidad. No obstante, existen pocas dudas de que las características básicas de la CAR —una distribución de probabilidades de las fluctuaciones que sigue la ley de potencias y acontecimientos catastróficos que “liberan tensión” al tiempo que devuelven al sistema al borde de la inestabilidad— parecen proporcionar un poderoso marco para comprender una amplia gama de fenómenos. Así pues, no debería sorprendernos que entre esos fenómenos se incluyan algunos aspectos de las interacciones sociales.

ECONOMÍA DE LÍNEA DURA

En 1988, Per Bak trabajaba en el Instituto de Santa Fe, Nuevo México, centro del universo intelectual para todo investigador interesado en los sistemas interactivos complejos, pertenezcan éstos a la física, la biología, la geografía, las ciencias sociales o cualquier otra cosa. Recibió la visita de Michael Woodford y José Scheinkman, economistas de la Universidad de Chicago, que habían oído hablar de la CAR y querían investigar si la economía se comportaba de ese modo. Fue una intuición muy sagaz, especialmente porque el concepto de CAR apenas tenía un año de

vida. Algunos economistas descarriados se habían interesado ya en la aplicación de los conceptos de la teoría del caos a la economía —Scheinkman era uno de ellos—, pero, decididamente, la idea no pertenecía a la corriente dominante. A Woodford y Scheinkman la teoría de Bak les pareció más prometedora, porque parecía permitir exactamente el tipo de acontecimientos extremos: grandes “avalanchas” que los modelos económicos tradicionales rechazaban.

Como físico, a Bak la aplicación de su modelo a la economía le resultó reveladora. Normalmente, los físicos se ocupan de objetos inanimados cuyo comportamiento no tiene nada de irracional, e incluso cuando llegan a cabo todo tipo de aproximaciones y simplificaciones (cosa que hacen invariablemente), las matemáticas que aplican son tan complicadas que tiene que resolverlas un ordenador. Bak imaginó que su modelo económico sería todavía más complejo, así que se quedó asombrado al ver que sus compañeros economistas preferían buscar “modelos que puedan resolverse analíticamente con matemática de lápiz y papel”. Fue el comienzo de lo que Bak llamó “una productiva, aunque bastante difícil, colaboración”.⁵

Como resultado obtuvieron un modelo económico basado en los agentes, que seguía las directrices trazadas por los modelos de los que nos hemos ocupado en el capítulo anterior y que fue publicado en 1993 por Bak y Kan Chen junto con Woodford y Scheinkman. “Nuestra conclusión”, dijo Bak,

es que las grandes fluctuaciones que hemos observado en la economía indican que ésta opera en un estado crítico autorregulado en el que las pequeñas crisis pueden desembocar en avalanchas (*cracks*) de todos los tamaños, como los terremotos. Las fluctuaciones son inevitables. No hay forma de que nadie pueda estabilizar la economía y se libre de las fluctuaciones a través de regulaciones de los tipos de interés o con medidas de otro tipo.⁶

La idea de una economía crítica autorregulada es atractiva, pero, desgraciadamente, como el modelo del montón de arena, parece acertar en espíritu pero errar en los detalles. La esencia de la CAR se encuentra en la conducta fuera de escala descrita por una ley de potencias. Pero aunque pueda parecer que datos económicos como el ascenso y la caída

del índice S&P 500 se comporten de ese modo dentro de ciertos límites, esos rasgos no se mantienen en el cuadro general. Las fluctuaciones observadas para intervalos de algunos minutos se parecen, más o menos, a las que se observan para intervalos horarios o diarios cuando todo se reajusta adecuadamente (página 234), pero en realidad, las estadísticas no son exactamente las mismas. Cuanto más grande el intervalo temporal, más se aproxima la distribución de probabilidades de las fluctuaciones a una curva gaussiana. Por otra parte, en periodos de varios años, los precios crecen más o menos linealmente (esto es, proporcionalmente al tiempo transcurrido), jalonados por marcados descensos. De modo que todo modelo que asuma una forma matemática para la estadística de los cambios de precios en todas las escalas temporales no puede ser correcto. Por la misma razón, la distribución de probabilidades de las funciones o de las fluctuaciones de los precios obedecen a una ley de potencias sólo por encima de un abanico limitado dentro de las “colas anchas”; fuera de este abanico, se observa otro tipo de relación. Así que, aunque ofrece una bonita explicación de cómo los acontecimientos extremos pudieran constituir un aspecto natural, aunque raro, de la fluctuación de un sistema, el CAR por sí solo no basta para dar cuenta del funcionamiento de la economía.

EL ESPÍRITU DE LA LEY

Las distribuciones de probabilidad de la ley de potencias, que no discriminan (como lo hacen las fluctuaciones gaussianas) frente a acontecimientos extremos, podrían ofrecer una explicación penetrante de cómo la gente organiza sus asuntos. El físico Sidney Redner, de la Universidad de Boston, afirmó en 1998 que las estadísticas de citas en la literatura científica obedecen a una ley de potencias. Los documentos científicos incluyen una lista de remisiones a documentos previos cuyos hallazgos son mencionados y utilizados en la investigación de la que se ofrece testimonio. Algunos documentos —el del CAR de Bak, Tang y Wisensfeld es uno de ellos— contienen ideas que son muy influyentes y estimulan cientos de estudios a posteriori. Se los cita con profusión. Otras publicaciones abordan tópicos muy especializados y son escasos los investigadores que tienen necesidad de referirse a ellos, así que sólo aparecen en un puñado

de citas. Sidney Redner revisó cerca de ochocientos mil documentos publicados en 1981 y observó que las estadísticas de sus citas obedecían a una ley de potencias: la mayoría de los documentos sólo eran citados unas cuantas veces, pero unos pocos aparecían en un gran número de relaciones bibliográficas. (En realidad, casi la mitad de los documentos no aparecían citados en ninguna parte, revelador recordatorio de la modesta naturaleza de la mayoría de los proyectos de investigación. Tennyson tenía razón al afirmar: “la ciencia se arrastra de punto en punto”.)⁷

Se podría argumentar que las relaciones de ley de potencias son afirmaciones de lo obvio. Por supuesto, los grandes terremotos son más raros que los pequeños. Por descontado, algunos documentos de investigación son muy influyentes mientras que otros no causan ningún impacto a nadie. Eso es cierto, pero una ley de potencias dice algo más que eso: describe un *tipo* particular de camino en el que la probabilidad de que un acontecimiento se produzca desciende a medida que ese acontecimiento sea mayor o más extremo. A priori no hay motivo para sospechar que, cada vez que duplicamos el tamaño del acontecimiento, la probabilidad vaya a disminuir de acuerdo a un factor constante —que la probabilidad de cuatro citas será una octava parte más pequeña que la de dos citas, por ejemplo, y que la probabilidad de ocho citas sea también una octava parte más pequeña que la de cuatro citas—. El mensaje general de la ley de potencias es evidente a un nivel intuitivo; la relación matemática precisa, sin embargo, no es en absoluto inevitable.

En su libro *Ubiquity*, el físico y autor científico Mark Buchanan ha hecho la fascinante sugerencia de que la historia opera en un estado crítico autorregulado. Su idea es que los conflictos y las guerras son resultado de tensiones que mantienen a las relaciones internacionales al borde de la catástrofe. En consecuencia, las guerras, sean de la magnitud que fueren, de las pequeñas escaramuzas a conflagraciones mundiales, son inevitables. Buchanan ofrece lo que, admite, es una evidencia provisional de su propuesta en forma de un gráfico que muestra la relación entre el número de conflictos y su tamaño, medida de acuerdo a su número de víctimas. Las guerras que sólo han causado centenares de muertos y las guerras mundiales, en las que han muerto millones de personas, siguen una misma ley de potencias.

Fue el físico británico Lewis Fry Richardson quien primero advirtió este comportamiento. Richardson, que fue uno de los pioneros de una

moderna “física de la estrategia política”, empleó conceptos tomados de la meteorología para desarrollar modelos matemáticos de la carrera armamentística entre naciones antagonistas. Tal vez por su condición de cuáquero que durante la Primera Guerra Mundial prestó servicio como conductor de ambulancia, Richardson esperaba promover la paz internacional elucidando las causas de la guerra.* Entre los años veinte y los años cincuenta acumuló datos de las estadísticas de “disputas mortales”, en las que, con ánimo provocador, incluyó la guerra entre los tipos de asesinatos. Observó que existía una especie de ley de Gutenberg-Richter de los conflictos en la que todos los acontecimientos, desde el asesinato de una persona (“conflictos de magnitud 0”) a las dos guerras mundiales (“magnitud 7”), obedecían a una distribución de probabilidades de una ley de potencias.

El aleccionador corolario, sostiene Buchanan, es que no hay manera de decir de qué forma podría estallar un conflicto a causa de la menor perturbación. Al fin y al cabo, la Primera Guerra Mundial estalló tras el asesinato del archiduque Francisco Fernando en Sarajevo en 1914, suceso que dependió de un cúmulo de circunstancias desgraciado e impredecible que aquel fatídico día se dieron cita. No es difícil encontrar fallas en esta idea. Parece muy probable, por ejemplo, que la Segunda Guerra Mundial fuera inevitable (entre otras cosas) por la Primera Guerra Mundial y por el Tratado de Versalles, y que no se desencadenara a raíz de algún suceso extraño acaecido en 1939. De hecho, la Primera Guerra Mundial no se libró ni mucho menos a causa del asesinato del archiduque. Pero ésta no es la cuestión. Buchanan afirma que si hay “tensión” en un sistema complejo como éste, los pequeños sucesos pueden tener consecuencias desproporcionadas. En cualquier caso, los datos de Richardson suponen que la idea de Immanuel Kant de que unas leyes naturales gobiernan el curso de la historia todavía no se ha agotado. La pregunta que harán los historiadores es si esto puede aclararnos cómo es la historia *como tal*, si nos ayuda a comprender por qué las cosas sucedieron como lo hicieron. Una pregunta a la que, en un contexto distinto, volveremos después.

* El interés de Richardson en si las guerras entre naciones vecinas dependían de las longitudes de sus fronteras comunes le llevó a darse cuenta de que esos límites y los de las costas dependen del tamaño del paso empleado para seguir esas tortuosas líneas en zigzag. Este descubrimiento impulsó el posterior desarrollo de la geometría fractal por Benoit Mandelbrot.

LO MENOS QUE UNO PUEDE HACER

El sociólogo estadounidense George Kingsley Zipf (1902-1950) contribuyó a que la sociedad retomara la fe de la Ilustración en las leyes naturales de la sociedad y en la posibilidad de una sociología verdaderamente científica, con su obra *Human Behavior and the Principle of Least Effort [La conducta humana y el principio del mínimo esfuerzo]*, publicada en 1949. Se trata de un documento muy curioso, al mismo tiempo increíblemente profético e hijo de su época.

La idea central de Zipf era que las personas actúan de aquella forma que sólo exija de ellas el mínimo esfuerzo. Es de sentido común y para Zipf era el equivalente sociológico del principio físico propuesto en el siglo XIX por el matemático irlandés William Hamilton. La “ley de la acción mínima”, dijo Hamilton, determina cómo se mueve una entidad bajo la influencia de varias fuerzas. Demostró que por debajo de las leyes de la mecánica de Newton estaba la tendencia de un objeto a seguir una trayectoria que genera la “acción” más limitada posible: una cantidad mecánica que depende de la trayectoria que se haya tomado. Hay muchas trayectorias por las que una bola que reposa sobre una mesa podría llegar al suelo, pero sólo una de ellas minimiza la acción del movimiento y ésta es la que sigue la bola cuando rueda por el borde.

Es sencillo calcular la acción que acumula un objeto que se mueve a lo largo de una trayectoria en particular, pero determinar el “esfuerzo” que interviene en las actividades humanas lo es mucho menos. No se trata tan sólo de la energía que se gasta: como indicó Zipf, distintas personas podrían elegir distintas maneras de llevar a cabo una tarea, dependiendo de cuánto crean que les va a costar en tiempo, energía, incomodidad, dinero o lo que sea. Un ingeniero puede unir dos ciudades excavando un túnel a través de una montaña; otro construirá una carretera por el puerto. Según Zipf, ambos actúan de acuerdo a sus estimaciones de cuánto “esfuerzo” será necesario, se trata únicamente de que esas estimaciones difieren.

Se trata, evidentemente, de un principio algo endeble, debido a la subjetividad de cualquier valoración del “esfuerzo”. La idea suena bien, pero su parámetro central es incuantificable. No obstante, Zipf intentó explicar una asombrosa diversidad de rasgos y patrones de conducta de las personas de este modo, incluyendo las propiedades y desarrollo del lenguaje, la estructura de la música, la demografía humana, la distribu-

ción de las industrias, las estadísticas de los viajes, los datos matrimoniales, los conflictos civiles e internacionales y las distribuciones de renta.

Sin embargo, la contribución principal de Zipf a la física de la sociedad fue empírica. Reunió datos en todas esas áreas y demostró que todos respondían a distribuciones de probabilidad caracterizadas por leyes de potencias, con sus singulares gráficos en línea recta. En esa época, los sociólogos rara vez veían más allá de las estadísticas de distribuciones gaussianas (aleatorias) y el significado de los datos de Zipf ha llegado a apreciarse sólo a través de la reciente emergencia del comportamiento de ley de potencias en el corazón de la física estadística. Si Per Bak (que falleció en 2002) creía que, en cierto sentido, la CAR explicaba “el funcionamiento de la naturaleza”, Zipf consideraba que sus gráficos de la ley de potencias explicaban “el funcionamiento de la sociedad”. Creía que las ciencias sociales difieren de las ciencias naturales en que están dominadas por la ley de potencias más que por la estadística gaussiana. Ahora sabemos que las leyes de potencias también son muy comunes en el mundo natural.

Sea como fuere, Zipf descubrió algo de fundamental importancia. En 1983, Benoit Mandelbrot escribió: “El error de la estadística aplicada y de las ciencias sociales por no tener en cuenta a Zipf contribuye a explicar el espectacular atraso de ambas disciplinas”.⁸ Zipf afirmó que una ley de potencias en particular —una en la que la línea recta tiene una pendiente de -1 (véase el texto de la figura 10.3), que ahora se considera un diagnóstico de la CAR— era característica de fenómenos en los que las personas actúan en el seno de algún grupo más que como individuos, esto es, de fenómenos en los que hay interacción. Más o menos, ésta era su valoración del papel de las interacciones en los fenómenos sociales, que ahora podemos considerar cruciales. Como el físico Philip Anderson ha señalado, las distribuciones de ley de potencias de los fenómenos sociales destruyen la idea de que lo que importa es la conducta “promedio” o el “hombre promedio” de Quetelet. En efecto, una ley de potencias eleva las probabilidades de los acontecimientos extremos, que una distribución de probabilidad gaussiana relega al estatus de aberraciones despreciables.

Es posible que el sociólogo Vilfredo Pareto fuera el primero en introducir leyes de potencias en la ciencia social, y lo hizo antes de que la física descubriera nada parecido. En 1897, Pareto afirmó que las rentas hacia el extremo más rico del espectro social están distribuidas de acuerdo a una ley de potencias (véase figura 10.4). Esto implica que una gran parte

de la riqueza de la nación está en manos de unos pocos individuos. Según algunas estimaciones, un cuarenta por ciento de la riqueza de los Estados Unidos está en manos del uno por ciento de la población y el cinco por ciento de la población acumula más de la mitad de la riqueza total.⁹ Esta desigualdad ha ido en aumento desde la década de 1970 y otras naciones han caído en la misma tendencia.

Pareto expresó este desequilibrio en términos de la llamada regla 80:20. El ochenta por ciento de la riqueza está en manos del veinte por ciento de la gente. El sociólogo observó esta distribución de renta en varios países, sin que importase qué sistema político o qué régimen impositivo tuvieran. El principio 80:20 ha llegado a convertirse en regla de oro en muchas decisiones empresariales: el ochenta por ciento de los beneficios procederá del veinte por ciento del desembolso, el ochenta por ciento de los resultados se deberá al veinte por ciento de la plantilla, etcétera. Pero centrarse en las cifras particulares oscurece el punto principal, que no sólo es que entre esfuerzo y recompensa hay una relación desigual, sino que la *distribución* sigue una ley de potencias. Las cifras exactas —es decir, la pendiente del gráfico de ley de potencias— pueden variar: la relación no siempre es 80:20, pero la línea recta se mantiene. Se supone que la misma distribución de riqueza tenían en el siglo XIV a. de C. en el antiguo Egipto, a partir de un análisis del tamaño de las casas en la ciudad en ruinas de Tell el'Amarna, la ciudad de Akenatón.

Posteriormente, la distribución de renta de Pareto llegó a considerarse un aspecto fundamental de la sociedad, investido de la misma mística de la que la distribución gaussiana había gozado a principios del siglo XIX. En 1940, el economista Carl Snyder dijo que “la curva de Pareto está destinada a ocupar un lugar entre las grandes generalizaciones del saber humano”.¹⁰ Lo cierto, sin embargo, es que todavía no está del todo claro con cuánta rigidez se aplica la *ley*. Es sorprendentemente difícil determinar con precisión las distribuciones de renta (una manera de hacerlo es estudiando los ingresos fiscales, otra, inferir los niveles de riqueza de los pagos del impuesto de sucesiones). En 1935, el economista George Findlay Shirras cuestionó la validez de la ley de Pareto, afirmando que no había lugar para ella en los estudios de distribución de renta. Pero parece haber buenas razones para creer que al menos el tramo de población más rico de una sociedad responde a una distribución de ley de potencias, como muestra la figura 10.4. La *pendiente* de una curva de ley

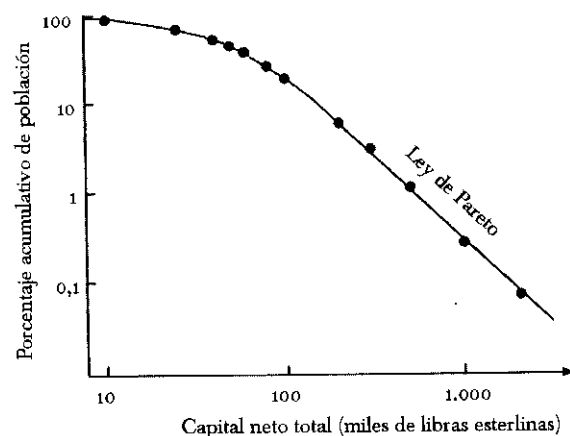


Figura 10.4. Las distribuciones de la renta nacional suelen responder a una ley de potencias, como ya en el siglo XIX observó Vilfredo Pareto. Pareto afirmó que la pendiente de la línea recta siempre es -1 , pero estudios posteriores han demostrado que suele ser mayor. A mayor pendiente, mayor el empobrecimiento de la economía. Aquí muestro la distribución de riqueza de la población del Reino Unido en 1996, según las cifras recogidas por la Hacienda británica. Se trata de una distribución acumulativa: cada punto muestra el porcentaje de población con una riqueza neta mayor de la que corresponde al eje horizontal.

de potencias refleja el grado de disparidad entre rentas: a mayor pendiente, mayor la desigualdad de distribución de la riqueza y mayor la pobreza. En las economías donde la desigualdad es muy grande, como en Haití o en Zaire (o en el antiguo Egipto), unos pocos son ricos a costa de la gran mayoría, que es muy pobre. Ésta es una buena razón para no fiarse de las estadísticas promedio que citan los políticos, a no ser que sepamos la distribución de riqueza que les corresponde.

El econofísico israelí Sorin Solomon, el francés Jean-Philippe Bouchard y sus equipos han propuesto modelos para explicar cómo puede surgir la ley de Pareto a partir de las ideas desarrolladas para explicar los movimientos de las moléculas encadenadas de los polímeros. Comparan esos movimientos con los intercambios de capital en los mercados de inversión. Trabajando en colaboración con Zhi-Feng Huang, de la Universidad de Colonia, Solomon ha demostrado que, dentro de la actividad comercial, en los mercados no regulados, la curva de Pareto tiene

tendencia a incrementarse, ocasionando una disparidad cada vez mayor entre ricos y pobres. Una consecuencia de esto es que las fluctuaciones del mercado también se incrementan: el mercado se hace menos estable. Así pues, sostienen los investigadores, una política social que tenga por objetivo aumentar la riqueza de los miembros más pobres de la sociedad “no es sólo un deber humano, sino un interés vital de los mercados de capital”¹¹ —una forma inteligente de actuar de forma interesada.

¿ORDEN UNIVERSAL?

George Zipf esperaba que sus observaciones fueran utilizadas como guía de la práctica política. Su sueño suena, en estos tiempos postmarxistas, algo enervante: “una ciencia social sistemática hará posible una ingeniería social objetiva”.¹² Pero tenía razón, si por ingeniería social entendemos nada más que planificación bien informada. Sus ambiciones iban todavía más lejos. En el auténtico espíritu de la Ilustración, Zipf tuvo la impresión de que el descubrimiento del orden (y aquí se refería a la ubicua ley de potencias) en el centro de los asuntos humanos revela que, dentro de la voluntad humana, opera una especie de plan natural. En una época de declive de las creencias religiosas, Zipf pensó que eso podría contribuir a que una ciencia social racional ocupara su lugar:

Porque en los fenómenos cotidianos de la vida encontramos una unidad, un orden y un equilibrio que tienen que desembocar en la fe en la racionalidad última del todo cuya totalidad reside más allá de nuestro poder de comprensión.¹³

A partir de aquí no queda más que un pequeño paso al misticismo pitagórico. Pero esa necesidad no impide nuestro asombro ante la universalidad que gobierna tantos aspectos de la sociedad de la misma manera que rige las propiedades de los átomos. Pero es preciso que eso no haga caer en una “religión de la ciencia”, de igual modo que no podemos ver en los torbellinos de un río la prueba de una planificación divina. Sencillamente, podemos celebrar el hecho de que exista una “ley de los grandes números” que nos permite intuir cierto orden y regularidad en medio de una por otra parte aterradora diversidad.

XI
OBRA DE MUCHAS MANOS
EL CRECIMIENTO DE LAS EMPRESAS

Conocí a un vinicultor de California. Intentaba, me dijo, exprimir hasta el último céntimo de margen de su producto a fin de que su bodega se desarrollara "lo más rápido posible". "¿Quiere usted que su negocio crezca mucho?" le pregunté. "No, no quiero crecer más -respondió-. Quiero crecer mejor". Para hacerlo necesitaba mejor equipamiento, mejores vinos, mejores empleados, no más.

CHARLES HANDY (1976)¹

Las grandes organizaciones humanas siempre conducen a la opresión a no ser que exista una maquinaria democrática que lo evite.

J. B. S. HALDANE (1949)²

¿Qué escala es la apropiada? Depende de lo que queramos hacer. Hoy en día la cuestión de la escala es extraordinariamente crucial en la política, la sociedad y la economía, y también en casi todo lo demás.

E. F. SCHUMACHER (1973)³

Hace tres años, Brecon era una población con mercado al borde de convertirse, como les sucede en la actualidad a muchas otras comunidades, en una población con hipermercado. Safeway, el gigante de la alimentación del Reino Unido, se aproximaba. Cuando el ecologista

George Monbiot llegó a la ciudad, no tardó en saber que los vecinos esperaban lo peor.

“Safeway dice que nos trae a Brecon la oportunidad de elegir”, le dijo Brian Keylock, carnicero de profesión,

pero en el pueblo ya hay nueve carnicerías. Hay nueve oportunidades de elegir. Si todos cerramos, adiós oportunidades. La pescadería ya ha cerrado. Las tiendas de ropa ya han cerrado [...] Fíjese en Leominster. Desde que pusieron esa cosa, el pueblo está muerto. Con nosotros pasará lo mismo.⁴

En realidad, Brecon tenía suerte de haber sobrevivido tanto tiempo. Las poblaciones británicas vienen sufriendo la muerte de la calle Mayor y la desaparición de sus tiendas desde principios de la década de 1980. Ahora, las cadenas comerciales, los bancos y las inmobiliarias colonizan los centros de las ciudades y es difícil comprar una pinta de leche. Para hacerlo, hay que dirigirse a las afueras, donde los hipermercados ofrecen leche de diez marcas distintas, amén de todos los demás artículos que antaño llevaban a la gente de tienda en tienda.

El problema —si se quiere considerar la desaparición del pequeño comercio como un problema— no está sólo en la existencia de grandes cadenas e hipermercados, sino en que todos recurrimos a ellos alguna vez. En realidad, cada vez tenemos menos opciones: el hipermercado Sainsbury de Axminster, Devon, fue el único lugar que encontré abierto para tomarme una taza de té la tarde de domingo que estuve dándome un paseo en bicicleta por allí. Las pequeñas teterías no pueden competir con esos horarios. Y ése es el problema: las grandes empresas se pueden permitir cosas que las pequeñas no pueden. Por ejemplo, ¿cuántas panaderías podrían vender una barra de pan por ocho peniques, como hizo Safeway en 1999? Esos ocho peniques están muy por debajo del precio de coste, pero los hipermercados apuestan por rebajar los productos básicos muy por debajo de los precios de sus competidores para así dar la impresión de que son fabulosamente baratos y atraer a clientes que, además de los básicos, comprarán otros productos que son mucho más caros. Hace poco, los supermercados Lidl de Gran Bretaña cargaban precios *negativos* (sí, descontaban dinero de la cuenta final) a las latas de guisantes.

Los profetas del capitalismo nos dicen que todo es para bien. En 1978, un “papel verde” (documento político) del gobierno británico afirmaba:

Normalmente, la interacción sin restricciones de las fuerzas competitivas dará como resultado una mejor distribución de nuestros recursos económicos, una bajada de precios, un aumento de calidad y un mayor progreso material, y, al mismo tiempo, proporcionará un entorno que facilite la preservación de nuestras instituciones políticas, sociales y democráticas.⁵

Es posible que los carniceros de Brecon no opinen lo mismo.

Entretanto, los adversarios del capitalismo suelen retratar el mercado libre como un sistema en el que, inevitablemente, el pez grande se come al chico, lo cual conduce a un mundo de comercio homogéneo dominado por unos pocos actores. Ciertamente, así puede parecer. Entre 1990 y 1996, los comercios británicos que vendieron menos de cien mil libras esterlinas al año bajaron un treinta y seis por ciento, mientras que el número de sucursales o delegaciones de los hipermercados casi se triplicó entre 1986 y 1997. Y si ampliamos la perspectiva, las grandes empresas tienen más músculo que algunos países: cincuenta y dos de las cien mayores economías del mundo son grandes corporaciones. Todo es preocupante por una sencilla razón: George Monbiot sostiene que el crecimiento de las grandes empresas no sólo amenaza la cohesión de las comunidades locales, sino el propio concepto de democracia. Esto parece razón suficiente para preguntarse por los factores que impulsan la expansión y la reducción de las empresas.

En este capítulo estudiaremos si hay leyes fundamentales que gobiernen el crecimiento de las empresas. Muchos teóricos de la economía han sospechado que existen, pero si esto es así, nadie se ha puesto de acuerdo en cuáles son ni en cómo funcionan. No obstante, hay señales de que empieza a emerger una especie de principio de “universalidad” en los negocios que supondría que, tanto si se trata de acerías, publicidad o fabricación de pan, el crecimiento de las empresas sigue una “ley de hierro” que nos dice qué tipo de distribución de pequeñas, medianas y grandes empresas cabe esperar. Y eso es lo raro. Porque pese a las señales de que el mundo de la empresa se endurece, las indudables desigualdades de la globalización no son toda la verdad. Si bien es cierto que

unas pocas grandes corporaciones ejercen una enorme influencia en la elección de los productos y en la publicidad, hay un número mucho mayor de pequeñas que de grandes empresas. La mayoría de esos pequeños arbustos nunca llegan a crecer; muy pocos, en realidad, están destinados a ser árboles, pero que nadie crea que los arbustos van a desaparecer; no, al menos, a juzgar por las cifras actuales.

Las pequeñas empresas saben hasta qué punto el éxito depende de la suerte, pero de las volubles fortunas de muchos negocios, parecen emerger sólidas leyes que gobiernan el crecimiento de las empresas. Que podamos modelar el mundo del comercio para darle la forma que más nos convenga (¿que más convenga a quién?) es una incógnita, pero lo cierto es que no podemos pensar en conseguirlo hasta que identifiquemos y comprendamos esas leyes. Si, por ejemplo, deseamos poner un límite al tamaño de las grandes corporaciones o ayudar a las pequeñas empresas sin que se sientan compelidas a crecer, necesitamos modelos de crecimiento empresarial que nos permitan prever las consecuencias de la legislación o de la normativa comercial que queramos aplicar. Si finalmente descubrimos (lo cual parece probable) que todo mercado que permita un mínimo de libre comercio generará, inevitablemente, algunas grandes empresas, sabremos al menos a qué atenernos.

HACIENDO COMPAÑÍA

El comercio mundial no *necesita* empresas. En la Bretaña romana se podía comprar prendas de seda china. En correspondencia, Roma exportaba al Oriente: se han encontrado monedas romanas en el actual Vietnam. El templo de Tojaidi en Nara, Japón, construido el año 752 d. de C., tiene cristal bizantino. A la formidable red comercial del mundo antiguo la sostenían artesanos que vendían sus productos a mercaderes que a su vez se los vendían a todos aquellos que podían permitirse importaciones exóticas de tierras lejanas.

Así que, ¿para qué valen las empresas? En la Edad Media, los artesanos descubrieron algunos de los beneficios de la organización colectiva. Los gremios protegían a sus miembros de la explotación y podían forzar salarios estándar para los contratos que firmaban los gremialistas. Pero la Revolución Industrial reveló la mayor ventaja del trabajo colec-

tivo: la economía de escala, que hizo posible la mecanización. Por supuesto, no muchos sacaban ventaja de la nueva situación, sólo unos pocos: la industrialización benefició a los jefes capitalistas mucho más que a los trabajadores. Pese a ello, el trabajador de una gran empresa con un salario de subsistencia estaba, con mucho, en mejor situación que el artesano tradicional, que no podía esperar competir con sus rivales industriales. El primero estaba dentro del sistema; a no ser que se plegara, el segundo se moría de hambre.

A las economías de escala se llega por diversos caminos. Las grandes empresas pueden comprar maquinaria cara, lo cual está por encima de las posibilidades de los individuos. Las grandes empresas ganan en eficacia reuniendo a todos sus trabajadores bajo el mismo techo y repartiendo tareas entre trabajadores especializados. “La división del trabajo —dijo Adam Smith— ocasiona, en todos los oficios, un aumento proporcional del poder de producción de la mano de obra”.⁶ Además, las grandes empresas reducen los costes de transacción con unos cuantos contratos de gran volumen en lugar de incontables contratos de menor cuantía.

El mercado laboral coactivo de la Revolución Industrial acabó por suavizarse en la segunda mitad del siglo XIX para dar lugar a una promesa de entorno seguro para el trabajador. La gran empresa paternalista ofrecía seguridad de empleo, beneficios laborales como los seguros sanitarios, transporte o alojamiento, amén de camaradería y, a su debido tiempo, la promesa de una pensión. Es posible que fuera esto más que cualquier otra cosa lo que minó la “revolución inevitable” de Marx, que estaba basada en el modelo de explotación de la primera mitad del siglo XIX y en los principios mercantiles de Adam Smith, que impelían a los patrones (si es que era necesario impelírsele) a pagar a los trabajadores sólo el mínimo necesario para que siguieran vivos. En Japón en particular, la transacción entre jefe y trabajador dejó de ser sólo “trabajo a cambio de un salario”, para convertirse en “lealtad de por vida a cambio de protección de por vida”. Creamos o no en la halagüeña imagen del capitalismo en acción, hay pocas dudas de que la mayoría de la gente prefiere formar parte de la plantilla de una empresa a trabajar por su cuenta.

La teoría tradicional de la empresa tiene bastante poco que decir de las complejas relaciones entre empresario y trabajadores. Desarrollada por economistas, esa teoría ha mantenido su simplicidad gracias a la suposición de que los agentes hacen gala de la calculada racionalidad a la

que la disciplina está tan acostumbrada. Las empresas, dice esa teoría, existen para maximizar beneficios. Su objetivo es conseguir que sus ventas estén muy por encima de sus gastos. Orientadas hacia este objetivo tan claro, las empresas utilizan un cálculo muy desarrollado de la oferta y la demanda que les permite optimizar objetivos. Querrán expandirse hasta el punto en que todo aumento de los ingresos quede perfectamente equilibrado por una elevación de los costes, de modo que no aumenten los beneficios a causa de un incremento de la producción.*

A corto plazo todo funciona perfectamente. Por desgracia, la teoría convencional de la empresa también predice que, finalmente, en un mercado totalmente libre, nadie puede obtener ningún beneficio a largo plazo. El capitalismo, dice la teoría, es malo para los capitalistas. La razón es simple, y Adam Smith ya se dio cuenta. En un mercado gobernado por una competencia perfecta en el que todas las empresas son igualmente capaces y pueden fijar los precios que quieran, siempre se podrá sacar ventaja a otras empresas recortando el margen de beneficio y vendiendo más barato. Por eso ninguna empresa puede subir los precios por encima del umbral de rentabilidad, en el cual los ingresos guardan un perfecto equilibrio con los costes. Si lo hace, otra empresa venderá más barato y nadie comprará el producto más caro.

Como vimos en el capítulo VIII, el problema de dónde salen los beneficios fue un quebradero de cabeza importante para los economistas del siglo XIX. Marx sostenía que provenían de la "plusvalía" que cada trabajador entrega a su patrón trabajando más horas de las que corresponderían a su salario: el patrón consigue trabajo extra de forma "gratuita". De ahí provienen los beneficios. Esto encajaba con la imagen marxista del proletario explotado; y en nuestro presente clima de reducción de

* El nivel ideal de producción es aquel en el cual el ingreso marginal (el cambio de los ingresos tras un incremento en el número de unidades producidas) equivale al coste marginal (el cambio en el global de los costes tras un incremento en el número de unidades producidas). Puesto que cualquier planta de producción tiene un nivel óptimo de aprovechamiento, intentar aumentar su producción por encima de su capacidad acabará desembocando en rendimientos decrecientes (sin inyección de capital para aumentar la planta). Cuando eso ocurre, el coste marginal se eleva a un nivel constante a medida que aumenta la producción, que es lo que finalmente hace decaer los beneficios cuando se incrementa la producción.

Los economistas han estudiado la relación entre ingreso marginal y coste marginal dibujando curvas teóricas que muestran de qué modo se relacionan ambos con la producción. Resulta que esas curvas idealizadas rara vez se asemejan a las que se elaboran con datos reales, lo que redundará en los problemas (que tantas veces se olvidan) de la teoría convencional de la empresa.

plantillas y de trabajadores que trabajan más horas de las que les corresponden, habrá que concluir que Marx alguna razón tenía. Pero no es difícil pensar en muchas otras razones de que las empresas obtengan beneficios pese a la intervención de las fuerzas del libre mercado. Es evidente que la publicidad distorsiona los gustos de los clientes: no necesariamente buscarán el producto más barato, sino que se verán impulsados a comprar aquellos que consideran *mejores* o de más prestigio. La gente pagará un elevado sobreprecio por los artículos de marca.

Pero ésa no es toda la historia. La presunción de la competencia perfecta es en realidad una forma de soslayar el extraño hecho de que las empresas son interdependientes: el comportamiento de una de ellas puede afectar los precios y la rentabilidad de las demás. Los economistas lo saben, pero no saben cómo abordarlo.

La llamada teoría neoclásica de la empresa, es decir, la convencional, se siente cómoda sólo en dos escenarios extremos. En condiciones de competencia perfecta, se puede considerar que cada empresa opera en el seno de un mercado con características fijas impuestas desde fuera. Se supone que las relaciones entre el coste de fabricación, el precio de venta y la cantidad de un producto son inmutables, surgen del comportamiento promedio de todas las empresas del mercado. Todas las empresas tienen que hacer malabarismos con esas condiciones impuestas a fin de lograr rentabilidad. Lo mismo puede decirse del extremo opuesto: el monopolio, cuando hay una sola empresa en el mercado. Por definición, la interacción no se produce porque no hay nadie con quien interactuar. Pero en la práctica, los monopolios son, evidentemente, casos especiales para los que normalmente existe una legislación específica que regula la forma de operar de los mercados. (De otro modo, la empresa monopolística puede fijar el precio que quiera a sus productos.)

Lo cierto es que un mercado libre rara (o ninguna) vez opera en condiciones de competencia perfecta entre un número elevado de empresas más o menos equivalentes. En vez de ello, normalmente hay muchas empresas de diversos tamaños, cada una de las cuales tiene perfiles de producto que se superponen unos a otros, aunque no necesariamente son equivalentes. Es ahí donde la teoría convencional hace aguas. Sin embargo, sí funciona cuando la situación es más limitada, es decir, en caso de oligopolio, en el que sólo unos cuantos actores importantes dominan el escenario. Esto no es raro: en el Reino Unido, por ejem-

plo, cinco cadenas de hipermercados acumulan tres cuartas partes de las ventas de alimentos y no hay más que unos seis diarios de tirada nacional importantes.

La interacción entre las empresas es muy relevante para la rentabilidad y los precios. La rebaja de precios funciona igual que en un mercado de competencia perfecta, pero cuando intervienen menos actores la interacción entre las empresas es más extrema. Esto puede conducir al tipo de inestabilidad y a los cambios repentinos que, en física, son la señal de identidad de las interacciones más intensas. Por ejemplo, los precios pueden mantener cierta estabilidad durante periodos prolongados y a continuación, bruscamente, pueden entrar en caída libre a consecuencia de una guerra de precios. Es lo que ha ocurrido recientemente entre los fabricantes de ordenadores personales, líneas aéreas y los diarios de tirada nacional del Reino Unido. En apariencia, son los consumidores quienes sacan provecho de esas batallas, porque pueden llegar a comprar muy por debajo del precio de coste, pero a largo plazo, la lucha puede acabar con algunos actores, lo cual reduce la capacidad de elección y da pie a que el mercado se deslice hacia un monopolio, como está sucediendo en el Reino Unido con el grupo News International, de Rupert Murdoch.

Los economistas han intentado reconstruir la interacción de los modelos oligopólicos de varias maneras. Una solución rudimentaria es reconocer que la rivalidad puede cambiar la forma de la curva de demanda, que relaciona el precio con la cantidad de producto. Por ejemplo, es posible que los rivales de una empresa puedan afrontar las rebajas de precios que acometa esa empresa, pero no los incrementos. Pero esto sólo modifica una de las características del modelo: la relación entre precio y cantidad. En realidad, sólo es un intento de reducir el mercado interactivo a otro tipo de mercado en el que cada empresa maniobre dentro de unas circunstancias fijadas desde el exterior.

Los oligopolios no tienen por qué ser competitivos. Redunda claramente en interés de las empresas actuar en connivencia para fijar precios elevados, que, por falta de elección, los consumidores quedan forzados a pagar. Esto crea carteles que pueden operar como monopolios de facto. Pese a que en algunos países los carteles están prohibidos, es muy difícil evitar la connivencia en la fijación de precios a costa del consumidor. "Definitivamente, existen muy pocas dudas", asegura George Monbiot,

de que algunas grandes cadenas operan en realidad como monopolios locales o regionales. Tesco y Sainsbury, por ejemplo, controlan el cincuenta y siete por ciento del mercado alimentario de Londres y del sur de Inglaterra.⁷

Los carteles se basan en que las empresas que los forman intervengan en el juego y no bajen los precios y, por lo tanto, se apropien de una cuota mayor de mercado. Esta cooperación para sacar provecho, unida a la tentación de obtener mayores beneficios saliendo del cartel, se presta perfectamente al análisis por medio de la teoría del juego, de la que hablaremos en el capítulo XVII. Tales métodos son moneda común en economía para estudiar los oligopolios, que tienen una gran tendencia a la connivencia.

No obstante, ninguno de esos enfoques tradicionales tiene en cuenta de qué forma está estructurado el mercado, es decir, cuál es la distribución de las empresas por tamaño. La competencia perfecta, los monopolios y los oligopolios son excepciones. Normalmente, en el mercado real hay empresas de muchos tamaños. Las empresas pequeñas pueden modificar la conducta de los oligopolios, mientras que, a su vez, las grandes empresas limitan la competitividad de las pequeñas.

Además, la teoría convencional no describe bien las motivaciones de las empresas. Casi sin duda, la mayoría de las empresas *no* son maximizadoras puras de beneficios. Cada una apuesta por sus propios objetivos, que pueden ser el resultado de muchos ingredientes que están en conflicto entre sí. Ni el cínico más recalcitrante puede afirmar que para todas las empresas el beneficio es lo primero –recordemos que no sólo estamos hablando de las multinacionales, sino de las panaderías locales con tres empleados–. Una empresa para la que trabajé en cierta ocasión da tres comidas a sus empleados. Si no lo hiciera, sus beneficios aumentarían, y dudo de que nadie la abandonara por no dar tres comidas –aunque se oírían muchos gruñidos–. Por supuesto, no se trata de un comportamiento totalmente desinteresado: a una empresa le conviene que sus empleados estén satisfechos.

Otras empresas actúan no para maximizar el beneficio sino la facturación, sobre la base de que, a largo plazo, la cuota de mercado es más importante que la rentabilidad. Para algunas, el objetivo es el crecimiento de la plantilla. Otras, en la intrincada terminología económica, buscan el bene-

ficio satisfactorio: conseguir un resultado conveniente (no necesariamente óptimo) en función de un amplio abanico de criterios (página 250).

Dadas todas estas estrategias, cabe esperar que el crecimiento de algunas empresas tenga poco o nada que ver con el crecimiento de otras. Pero debemos recordar la importancia de distinguir los resultados estadísticos de los individuales. Que las personas tengan muchos motivos distintos cuando se mueven en determinado entorno no significa que, en conjunto, su movimiento carezca de rumbo. ¿Se advierte alguna regularidad estadística en la conducta colectiva de las empresas por debajo de la idiosincrasia de cada una de ellas?

LA LEY DEL NEGOCIO

Se podría pensar que un libro titulado *Inégalités économiques [Desigualdades económicas]* tiene que ser una denuncia marxista del capitalismo, pero en absoluto era ésa la intención del autor. En este libro, publicado en 1931, el economista francés Robert Gibrat desarrolló la primera teoría universal sobre por qué las empresas llegan a ser de distintos tamaños.

Gibrat comprendió que esa teoría tiene que ser estadística: debe abordar la fórmula matemática de la distribución de probabilidades del tamaño de las empresas. Para Gibrat era evidente que esa distribución es muy desigual, es decir, hay muchas más empresas pequeñas que grandes. Este hecho básico es tan cierto hoy como lo era en la década de 1930, y los datos económicos de cualquier país industrializado lo confirman. El economista Robert Axtell, de la Institución Brookings de Washington DC, afirma: “La estabilidad de esta distribución a lo largo del tiempo la convierte [...] quizás, en la regularidad estadística más sólida de todas las ciencias sociales”.⁸

Gibrat sospechaba que los factores subyacentes al crecimiento de las empresas incluían una considerable aleatoriedad, conclusión que extrajo de la obra del astrónomo holandés Jacobus Kapteyn. Alrededor de 1916, Kapteyn demostró que las “distribuciones desiguales” en ecología de la población pueden surgir de procesos gaussianos (es decir, aleatorios). Gibrat sostenía que el ritmo de crecimiento de una empresa es aleatorio y que, en cualquier momento concreto, ese ritmo es amplificado por el tamaño de la empresa en ese preciso momento.

Esto define la ahora tan celebrada ley de crecimiento proporcionado de Gibrat, que el economista francés concibió como una especie de ley newtoniana del mundo de los negocios. Voy a explicar cómo funciona. Para predecir cuánto cambia una empresa de tamaño entre el momento actual y un incierto momento futuro, se elige un número al azar entre 1 y -1 (puede ser, por ejemplo, 0,5, o 0,3528, o puede ser cero) y se multiplica por el tamaño de la empresa en el presente. Por lo tanto, las grandes empresas tienden a cambios de tamaño más importantes que las pequeñas, pero no siempre tiene por qué ser así. Hay que tener en cuenta el azar porque es muy difícil predecir los diversos factores que influyen en el crecimiento. Por expresar la regla del crecimiento de otro modo, cuanto mayor es una empresa, más capaz es de capitalizar las oportunidades que se le presentan.

La ley de Gibrat conduce a una distribución de tamaños a la que corresponde una fórmula matemática llamada “logarítmica normal”.^{*} Gibrat recopiló los datos del tamaño de las fábricas francesas en los años 1920 y 1921 y demostró que su distribución de tamaños se correspondía bastante bien con sus predicciones. Y no se detuvo aquí. Al presentar los datos, sugirió que su ley era válida para distintos periodos (se aplicaba con igual validez en 1896 que en 1921), distintos sectores (industria y agricultura) y para las distintas empresas dentro del mismo sector. En la década de 1940, el modelo de Gibrat era muy considerado e incluso hoy en día se utiliza en ocasiones como parámetro de algunos estudios teóricos y empíricos sobre el crecimiento de las empresas.

No obstante, el modelo es básicamente erróneo –y todos lo sabemos–. Diga lo que diga el modelo de Robert Gibrat acerca de la distribución de las empresas por su tamaño, a partir de la simple observación del crecimiento de las empresas reales, es evidente que no crecen o decrecen siguiendo unos pasos de tamaño aleatorio. Además, francamente, esta imagen no es coherente con la idea neoclásica de empresas que maximizan racionalmente sus beneficios (lo cual supone que las empresas deberían responder de forma similar, más que de forma independiente y aleatoria, a los cambios del mercado).

^{*} Esto significa que la distribución de probabilidades del *logaritmo* de los tamaños de las empresas es gaussiana.

Por lo tanto, si la ley de Gibrat nos sirve en tanto que útil idealización, no podemos esperar que se corresponda estrechamente con la realidad. De hecho, en la década de 1950 la idea de una ley de crecimiento de carácter universal cayó en el descrédito. Por aquel entonces, los economistas estaban convencidos de que la estructura y la dinámica del mercado variaban de una industria a otra, quizá porque los distintos métodos de fabricación dan lugar a economías de escala de distinto tipo o quizá a causa de la incidencia que puedan tener la publicidad o la investigación y el desarrollo. El caso es que algunos estudios más pormenorizados de la distribución de tamaños de las empresas sugerían que las curvas *universales* de Gibrat sólo eran una coincidencia producida a partir de datos incompletos. El economista John Sutton, de la Escuela de Economía de Londres, resume así el punto de vista que en la actualidad se ha impuesto:

no hay razones obvias para establecer una relación general entre el volumen de una empresa y su índice de crecimiento previsto, como tampoco las hay para que esperar que la distribución de tamaños de la empresas adopte ninguna forma particular en cuanto al comportamiento general de la industria [...] [L]as investigaciones empíricas llevadas a cabo a partir de los años sesenta han arrojado dudas acerca de si alguna fórmula concreta de la distribución de tamaños puede considerarse “usual” o “típica”.⁹

El rechazo del modelo de Gibrat queda justificado no sólo por su aparente falta de conformidad con el crecimiento real de las empresas, sino con su fracaso a la hora de proporcionar algo más que una prescripción arbitraria del proceso: su ley de crecimiento proporcionado no está justificada por principios microeconómicos. Sin embargo, la teoría económica estándar sobre la empresa no tiene nada mejor que ofrecer. Robert Axtell, de la Institución Brookings, señala que “la incapacidad de la teoría neoclásica de la empresa –con sus funciones de costes en forma de U y sus tan racionales y bien informados gestores– para ofrecer una explicación plausible de la distribución de tamaños empírica”.¹⁰

Al parecer, esto obliga a los economistas a la frustrante tarea de idear modelos específicos de crecimiento para cada industria, orientados a las peculiaridades de esa industria en particular. Para que luego se hable de

la universalidad de la ley de Gibrat. Según John Sutton: “La evolución de la estructura del mercado es un fenómeno complejo y es probable que la búsqueda de un modelo único que comprenda todas las regularidades estadísticas observadas no sea un objetivo adecuado”.¹¹

FIRMES PRINCIPIOS

Los hay que no están tan seguros. En 1996, el físico Gene Stanley, el economista Michael Salinger y algunos compañeros de la Universidad de Boston estudiaron los índices de crecimiento de todas las empresas estadounidenses (que cotizan en bolsa) entre los años 1975 y 1991. Con un total cercano a las ocho mil empresas, se trata de un enorme conjunto de datos al que se ha recurrido para numerosos estudios. Los investigadores observaron que los índices de crecimiento no se correspondían con la distribución logarítmica normal de Gibrat, sino que, en su lugar, guardaban una relación de ley de potencias como la de los fenómenos críticos. Esto significa que el resultado de trazar el logaritmo del índice de crecimiento contraponiéndolo al logaritmo de la probabilidad de ese índice es una línea recta. O, para ser más precisos, *dos* líneas rectas: una para los índices de crecimiento positivos y otra para los índices de crecimiento negativos, y ambas con la misma inclinación. Esto genera un gráfico en forma de tienda de campaña (véase figura 11.1). Y la ley de potencias es válida para dos medidas distintas de “tamaño” de la empresa: facturación (ingresos) y número de empleados.

Así pues, es posible que sí exista, después de todo, una ley general del crecimiento de las empresas, aunque no sea la de Gibrat. Pero hay algo más. La distribución logarítmica normal se deriva de la presunción de que las empresas crecen independientemente unas de otras –de que el proceso es aleatorio, aunque “ponderado” por el tamaño de la empresa–. Por otro lado, la larga experiencia de los físicos con las leyes de potencia les lleva a creer que esas leyes son el síntoma universal de que hay interdependencia. Normalmente, una ley de potencia surge del comportamiento colectivo entre entes cuyas interacciones pueden dar pie a una relación de enorme influencia entre ellos.

Es una idea que respalda un modelo microeconómico de crecimiento de las empresas ideado por Robert Axtell. En este modelo, las empresas

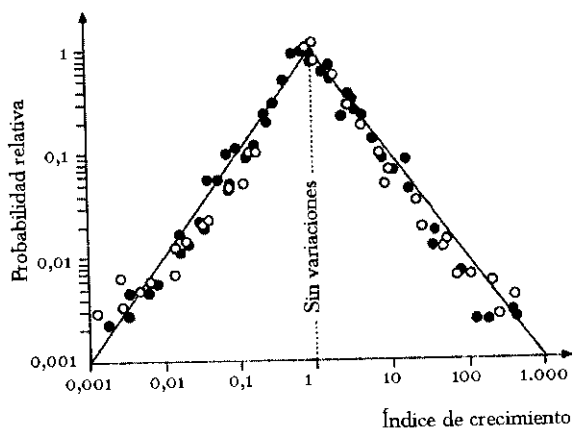


Figura 11.1. Distribución de probabilidades de los índices de crecimiento de todas las empresas estadounidenses que cotizaron en bolsa entre los años 1975 y 1991. Los índices de crecimiento se evalúan con los incrementos (o las disminuciones) de las ventas (círculos negros) y el número de trabajadores (círculos blancos). En general, los índices de crecimiento son mayores cuanto mayor es la empresa, pero todas las cifras se integran en un solo gráfico si se consideran los índices de crecimiento *relativos* –básicamente, cuánto cambian las empresas de tamaño expresado en porcentaje–. La probabilidad de cada índice de crecimiento concreto disminuye cuando ese índice se incrementa de acuerdo a una ley de potencias, de modo que las cifras dan como resultado una línea recta cuando se expresan en logaritmos. La disminución de tamaño de las empresas sigue la misma ley de potencia que el crecimiento, lo cual da al gráfico su característica forma de tienda de campaña.

surgen a partir de la agregación de muchos trabajadores (“agentes”) que, enfrascado cada uno de ellos en sus propias tareas, interactúan continuamente. La agregación viene impulsada por ciertas normas del modelo que permiten extraer un gran provecho del comportamiento colectivo. El modelo de Robert Axtell sigue el espíritu de la microeconomía, puesto que intenta deducir el comportamiento colectivo de un sistema a partir de las motivaciones de cada uno de los agentes que lo constituyen. Pero a diferencia de muchas “teorías de la empresa”, empieza sin preconcepciones de para qué son las empresas o cómo se comportan: en realidad, los agentes no están obligados a constituir ninguna

empresa ni a sumarse a ellas. Que lo hagan es indicativo de que redundan en su propio interés. Porque los agentes lo hacen todo pensando en su mayor provecho personal. En este sentido, son esos maximizadores racionales tan caros a todo economista. Pero no tienen un conocimiento perfecto de lo que ocurre en otros lugares del sistema –lejos del lugar en el que se encuentran–. Y no son los codiciosos “maximizadores de beneficios” que algunos economistas dan por hecho. Por el contrario, son maximizadores individualistas de su propia felicidad.

¿Qué hace feliz a estos agentes? Eso depende de cada uno de ellos. Todos persiguen dos objetivos: dinero y tiempo libre. Por desgracia, en el mundo de Robert Axtell no se pueden tener las dos cosas al mismo tiempo, porque el dinero sólo se consigue trabajando mucho. El dinero y el tiempo libre son dos demandas enfrentadas. El punto de equilibrio varía de un agente a otro: algunos optan por salarios bajos si eso les deja mucho tiempo de ocio, otros se aplican con diligencia cuantas más horas mejor con el fin de llenar sus arcas. Las preferencias relativas de dinero y ocio varían en el conjunto de la población de agentes. De modo que cada agente trata de encontrar un trabajo que le permita la relación deseada entre ambas variables. Si le gusta trabajar se unirá a una empresa en la que haya mucho que hacer; si prefieren el ocio, buscarán una empresa que les dé cierta libertad, aplicando poco esfuerzo sin que eso se note demasiado. Es posible que el salario no sea muy alto, pero, ¿a quién le importa?

En efecto, todos los agentes pretenden maximizar su *utilidad* (véase la página 245), es decir, una medida de *felicidad* concreta que, en este caso, se refiere al equilibrio deseado entre ocio y trabajo. Jeremy Bentham apeló a un concepto similar con la doctrina filosófica del utilitarismo, que sostenía que la sociedad tenía que esforzarse por encontrar un estado que maximice la utilidad colectiva de la población: el estado de mayor felicidad total. Pero los agentes de Axtell no tienen ningún espíritu comunitario. Les importa bien poco la utilidad del colectivo, lo único que les interesa es sacar el mayor provecho en función de las oportunidades que se les presentan.

Cabe preguntarse por qué, al fin y al cabo, los agentes de este modelo querrían formar parte de una empresa. Si quieren haraganear, ¿no podrían hacerlo solos con mayor facilidad? Y a la inversa, ¿por qué malgastar las ganas de trabajar en una empresa de potenciales holga-

zanes? Es una cuestión que consideró el premio Nobel de Economía Ronald Coase en un importante artículo para la teoría de la empresa que publicó en el año 1937. En ese artículo se preguntaba por qué el mercado no consistía únicamente en personas que comerciaban entre sí a título individual.

La respuesta de Coase se centraba en los costes de transacción: los inevitables costes de toda actividad comercial, como el tiempo, el esfuerzo y, con frecuencia, la carga financiera invertidos en la negociación, elaboración y formalización de los contratos, etcétera. Por su parte, en 1920, Alfred Marshall sugirió que la clave del trabajo organizado hay que buscarla en el viejo dicho “el trabajo compartido es más llevadero”. Es decir, ciertos esfuerzos son en general más rentables si se llevan a cabo en el seno de un colectivo y no de forma individual. La división del trabajo, compartir los costes de la capitalización, la especialización, todo ello permite que el colectivo sea más valioso que la suma de sus partes. Los economistas llaman a esto “incremento del retorno de escala”, es decir, a mayor tamaño, mayor productividad. Axtell proporciona a sus agentes un incentivo para que formen agregados —empresas—, concretando esta propiedad en una ecuación matemática que relaciona los esfuerzos de cada agente con la productividad del grupo al cual pertenece.

Las teorías de la empresa al uso presuponen que las compañías crecen a causa de sus crecientes utilidades a gran escala. El modelo de Axtell no lo hace, lo cual es de suma importancia. Axtell se limita a afirmar que, realizando el mismo esfuerzo, los agentes consiguen más cuando comparten sus recursos. De aquí se puede deducir que cabe *esperar* que las utilidades se incrementen a medida que el tamaño de las empresas aumenta, pero que eso *no* tiene por qué ser así. No se especifica, por ejemplo, cuánto rinde cada agente en concreto. Todo lo que dice el modelo es que unir fuerzas redundante en interés de cada uno de los agentes, sean éstos adictos al trabajo o vagos redomados. En cualquier caso, reciben más por menos, lo cual deja satisfechos a unos y a otros.

En el modelo de Axtell, todos los agentes, cada uno con sus propias inclinaciones, tienen libertad para incorporarse o abandonar las empresas (grupos de agentes) en busca de lo mejor para ellos. Por lo tanto, las empresas pueden crecer o decrecer en función del flujo de agentes. En realidad, cada agente tiene relativamente poco que elegir. No puede ver lo que ocurre

en el mercado en su conjunto; las reglas del modelo sólo le permiten saber qué tal le va a un pequeño número de “amigos”, generalmente dos. Si a esos amigos les va mejor, el agente se une a ellos; si no, no se mueve.

El punto clave del modelo es que cada agente puede elegir cuánto quiere trabajar. Su decisión varía dependiendo de las circunstancias. Si un vago puede abrirse camino en una empresa de adictos al trabajo, puede no hacer casi nada y, aun así, sacar provecho. Cada grupo de agentes de una empresa recibe un salario en virtud del conjunto de la producción y todos cobran lo mismo. Si un vago se une a una empresa con cincuenta buenos trabajadores y no se esfuerza lo más mínimo, la producción total no aumenta en proporción, pero él recibe el $1/51$ de lo que han ganado los otros cincuenta. El salario, entretanto, apenas cambia: es el $1/51$ del total, en lugar de ser el $1/50$. Así que, si la empresa es relativamente rentable, sus trabajadores pueden tolerar a ese vago en la plantilla. (En la versión más sencilla del modelo, los trabajadores no pueden actuar contra los vagos y expulsarlos. Todo cuanto pueden hacer es dejar la empresa por otra, si es que con ello su esfuerzo se ve más recompensado.) Por el contrario, si el vago trabaja por cuenta propia, no puede permitirse no hacer ningún esfuerzo, porque, en ese caso, no tendría nada de qué vivir, e incluso los amantes del no hacer nada tienen que comer. En una empresa pequeña, la presencia de un agente que no trabaja es más notoria que en una grande, así que es más probable que los otros agentes se vayan, siempre y cuando puedan encontrar mejores pastos.

En este modelo, todos los agentes renuevan sus decisiones cada cierto intervalo aleatorio de tiempo, como si se despertaran y pensarán lo que tienen que hacer: “¿Quiero hacer lo que hago?”. Al volverse activos de esta forma, los agentes reajustan sus niveles de esfuerzo a mayor ventaja de su utilidad. Además, sopesan las ventajas relativas de seguir donde están, incorporarse a la empresa de un amigo o poner en marcha una empresa nueva por su cuenta.

Una de las grandes preguntas en un modelo como este es si puede haber estados estables en los que todos los agentes sean felices en donde están. A esos estados, los economistas los llaman “equilibrios de Nash”, en recuerdo del matemático John Nash, que los propuso en 1949. Esos estados se corresponden con situaciones en las que ningún agente puede mejorar sus circunstancias modificando su comportamiento. Tradicionalmente, los economistas tienden a buscar los equilibrios de Nash de sus modelos

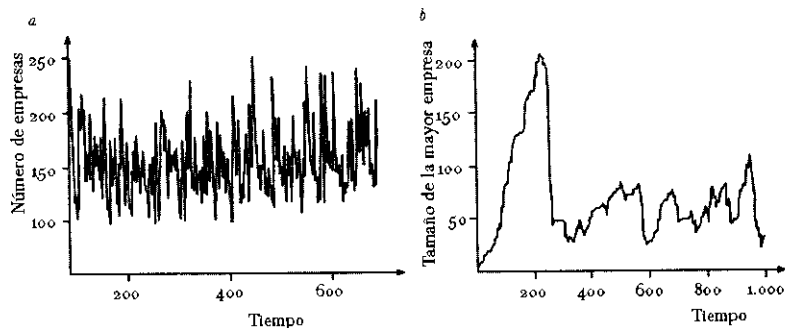


Figura 11.2. En el modelo de Axtell para el crecimiento empresarial, la rotación es constante. El número total de empresas (a) nunca alcanza un valor constante e incluso las grandes empresas (b) pueden derrumbarse estrepitosamente.

porque, piensan, son los que determinan el comportamiento en el mundo real. Pero en el modelo de Axtell no hay equilibrios de Nash, es decir, el modelo no alcanza ningún estado permanente. Hay un movimiento constante en el que las empresas crecen espectacularmente o quiebran (véase figura 11.2). Es un modelo en desequilibrio, lo cual lo diferencia de la mayoría de los modelos microeconómicos de crecimiento empresarial.

De lo cual, sin embargo, no puede deducirse que de un sistema así no se puede obtener ninguna certeza. Al contrario, estamos obligados a extraer consecuencias estadísticas. No se puede decir, por ejemplo, cuánto tiempo tardará en aparecer una empresa que englobe el veinticinco por ciento de la mano de obra total. Sin embargo, en cualquier momento podemos determinar la probabilidad de que exista una empresa así. De hecho, una muestra estadística de varios recorridos del modelo nos ofrece la distribución completa de las empresas por su tamaño. Se trata de una ley de potencias: el gráfico (del logaritmo) del tamaño de las empresas y de la probabilidad de que exista una empresa de determinado tamaño es una línea recta (véase figura 11.3a). Y es precisamente eso lo que se observa en la práctica, como Axtell dedujo de la estadística realizada con los datos de unas veinte millones de empresas estadounidenses en 1997 (véase figura 11.3b). Se trata de un resultado del modelo sorprendente: ninguna otra teoría microeconómica de la empresa ha previsto correctamente la naturaleza de esta distribución, es decir, que se correspondía con una ley de potencias.

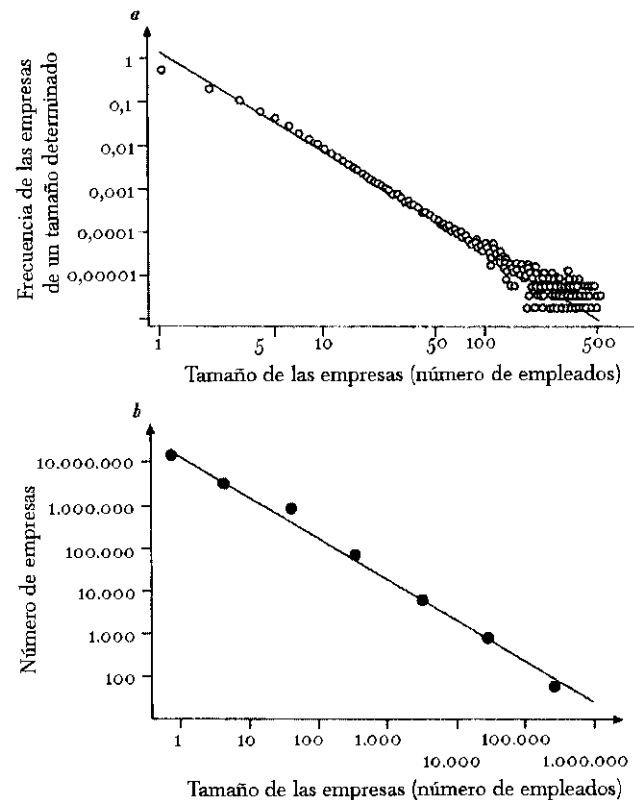


Figura 11.3. (a) Distribución estadística de las empresas por su tamaño en el modelo de Axtell. La relación es una ley de potencias: muestra una línea recta sobre un gráfico logarítmico. (b) La distribución de empresas estadounidenses en 1997 a partir de los datos del censo de Estados Unidos y de Compustat, base de datos económicos, combinados con datos de trabajadores autónomos. El mayor sector consiste en 15,5 millones de empresas sin empleados, es decir, el de los trabajadores autónomos.

Otra prueba reveladora del modelo es preguntar por los índices de crecimiento del modelo. Recordemos que Robert Gibrat sostenía que la distribución de los índices de crecimiento es aleatoria. Los datos económicos de la realidad demuestran que, por el contrario, su distribución se corresponde con una ley de potencias, que da como resultado un gráfico de

escalas logarítmicas con forma de tienda de campaña (véase figura 11.1). El modelo de Axtell genera esta misma forma para la distribución de los índices de crecimiento (véase figura 11.4).

Los escépticos podrían sospechar que esas leyes de potencias aparecerán sin importar cuáles sean nuestras presunciones acerca del comportamiento de los agentes –de alguna forma, las leyes de potencia son parte constituyente del modelo–. Pero si suponemos que los agentes cambian de empresa a voluntad (en lugar de mejorar su utilidad) o escogen niveles de esfuerzo de forma aleatoria (en lugar de adecuar su esfuerzo a las circunstancias), la distribución de las empresas por su tamaño deja de ser una ley de potencias. De modo que parece que dicha ley es una consecuencia de la conducta voluntaria de cada uno de los agentes del mercado. Por otro lado, la ley de potencias sigue valiendo incluso al alterar muchos detalles de la forma de elección de los agentes. Por ejemplo, se puede aumentar el tamaño del círculo de amistades de cada agente (y, por tanto, incrementar su conocimiento del mercado laboral), o se pueden mejorar los factores que promueven los incrementos del retorno de escala, o se pueden introducir nuevos factores como los incentivos para quedarse en el seno de una empresa (bonos por lealtad). Esas cosas alteran la pendiente de la línea, que, no obstante, sigue siendo recta.

Nadie afirma que éste sea un modelo perfecto de crecimiento empresarial. No tiene en cuenta factores importantes, como la estructura de dirección, la especialización de producto, etcétera. Y, sin embargo, da la impresión de que el modelo puede servir para hacer predicciones realistas sobre las propiedades estadísticas de las empresas. ¿Cómo puede ser? Robert Axtell sospecha que podría existir una especie de universalidad equivalente a la de la física, en la que el comportamiento global no es sensible a la conducta individual. Para él, el origen de esta universalidad reside en el hecho de que, sin importar el peso relativo de los distintos factores que influyen en la decisión de los individuos, las opciones reales son muy limitadas. Básicamente, cada agente sólo puede hacer dos o tres cosas: incorporarse a una empresa, abandonarla o unirse a una empresa rival. Forzar estas reglas no modifica esta situación. Mientras esas tres opciones, y las motivaciones que las sustentan, no cambien, el mercado adquirirá ciertas propiedades colectivas con independencia de cuáles sean sus detalles.

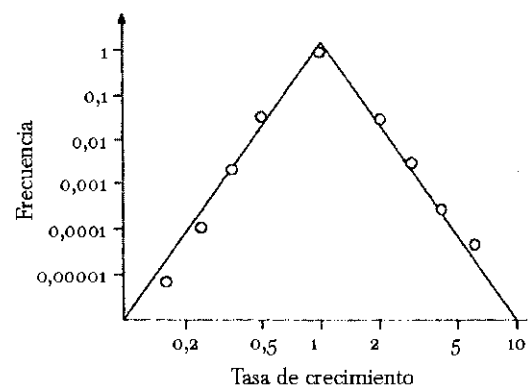


Figura 11.4. Los índices de crecimiento del modelo de Axtell muestran la misma ley de potencias doble o distribución con forma de tienda de campaña que se observa en el mundo real (cf. figura 11.1).

AUGE Y CAÍDA

Por lo que se puede ver por la comparación con los datos del mundo real, ésta parece una buena descripción de la forma en que evolucionan las empresas. Pero el modelo no predice estas amplias y frías (aunque importantes) medidas estadísticas de crecimiento empresarial. Como está construido “desde la base” y a través de agentes en interacción, nos ofrece una historia –en realidad, varias historias, una por cada vez que ponemos a prueba el modelo en un ordenador–. No podemos esperar que ninguna de estas historias reproduzca con exactitud lo que, por ejemplo, ocurrió en el sector manufacturero estadounidense en la década de 1950, pero sí podemos estudiarlas en busca de las características típicas del ciclo vital de las empresas, de la trayectoria individual de los agentes, etcétera.

Lo primero que hay que señalar es que la mayoría de las empresas son efímeras. No es evidente que en el mundo real sea así, porque hay empresas que perduran, como Ford y General Motors, pero lo cierto es que la mayoría sobrevive muy poco tiempo. Por ejemplo, de las cinco mil mayores empresas de Estados Unidos en el año 1982, sólo el treinta y cinco por ciento seguían siendo entidades independientes en 1996. El mundo de la empresa experimenta una elevada *rotación*, algo que muchas teorías económicas de la empresa no reconocen.

Así pues, ¿por qué fracasan las empresas? En el modelo de Axtell existe una trayectoria característica. En primer lugar, una empresa nueva crece más o menos exponencialmente a medida que las utilidades crecientes motivan que los trabajadores acudan a ella en tropel. Pero llega un momento en que la empresa alcanza su máxima expansión, después de la cual la caída suele ser súbita y catastrófica. Reducida a una fracción de su antiguo tamaño, la empresa sigue luchando durante un tiempo de la mano de un pequeño grupo de esforzados trabajadores antes de desaparecer (véase figura 11.5). Esta caída es consecuencia del propio éxito de la empresa. Una vez que se hace lo bastante grande, se convierte en un refugio de oportunistas y aprovechados que capitalizan el esfuerzo de los demás. De esa forma, poco a poco, la empresa se llena de vagos hasta que, de pronto, otros trabajadores deciden que ya han tenido bastante y abandonan el barco. (Adviértase que en este modelo las empresas caen porque los trabajadores las abandonan en busca de empleos mejores, no porque el mercado para sus productos desaparezca o a causa de un incendio o por cualquier otro motivo. El fracaso es autoinducido.) Es revelador que justo antes de que una empresa se derrumbe, el esfuerzo medio de sus trabajadores caiga hasta cero.

A los agentes no siempre les va tan bien como les gustaría —su utilidad tiene altibajos—, pero en conjunto, la utilidad de los agentes de las grandes empresas rara vez está por debajo del promedio de todo el sistema: al parecer, las grandes empresas ofrecen una estupenda protección en tiempos de infortunio. Sólo ocasionalmente y de forma pasajera la utilidad de esos agentes está por debajo del promedio, y esto porque algunas veces quedan atrapados en una empresa con problemas sin que aparezcan mejores opciones.

Si pensamos que un modelo tan simplificado puede decirnos algo del mundo real, aprenderemos detalles muy reveladores de las empresas. En primer lugar, no son maximizadoras. Las empresas en su conjunto no maximizan ni los beneficios ni la utilidad total (como las teorías convencionales nos quieren hacer creer). A nivel individual, los agentes sí quieren maximizar sus utilidades, pero esto no condiciona el comportamiento del grupo. Las empresas de mayor éxito no son las que aspiran a maximizar los beneficios. Por el contrario, la longevidad de una empresa se basa en su capacidad para atraer y retener trabajadores productivos. Una empresa decae no cuando pierde margen de beneficio, sino cuando acepta a demasiados vagos.

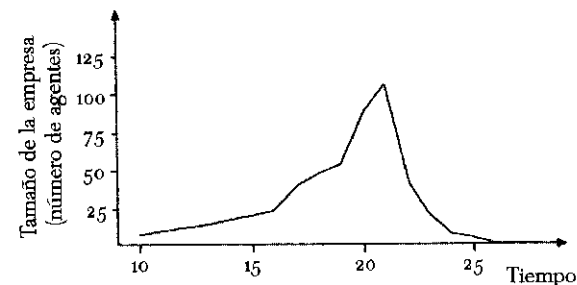


Figura 11.5. Las empresas del modelo tienen una historia típica: el crecimiento exponencial es seguido de un declive repentino y de una muerte gradual. Aquí tenemos un ejemplo.

La idea de que apostar por los beneficios por encima de todo no conduce directamente al éxito no debería sorprender a ningún miembro de la comunidad empresarial, que muchas veces se ha mostrado reacia a reconocerlo. Algunos fundamentalistas del mercado consideran que la maximización de beneficios no es sólo un principio de buena gestión, sino una obligación social: el célebre dicho “la codicia es buena”. Pero como señala el economista británico John Kay, eso no es verdad. Si los empleados sufren por una búsqueda exagerada del beneficio, la empresa también:

Los fabricantes de automóviles abandonaron el trabajo a destajo porque destruía las relaciones sociales en las factorías, provocaba interminables negociaciones y confrontaciones y consolidaba un entorno de trabajo en el que nadie se preocupaba por la calidad del producto.¹²

El modelo de Axtell no da pie a esas complejidades en la interacción de los trabajadores, pero puesto que dota a sus agentes de una especie de libre albedrío (si trabajan mucho o poco, si se quedan en una empresa o la abandonan), la elección del trabajador sí determina el éxito o el fracaso de la empresa.

Axtell tiene la impresión de que las teorías macroeconómicas tradicionales de la empresa han llegado a un callejón sin salida por su nega-

tiva a ver el rostro dinámico y en cambio constante del mercado laboral. La tendencia, afirma, ha sido la de elaborar modelos que dan por supuesto que los trabajadores tienen una intención uniforme, de acuerdo a la cual todos ellos se acomodan felizmente a cualquier empresa. Esas teorías, afirma Axtell,

comienzan de manera inocua, con agentes con voluntad propia en el seno de entornos estratégicos de uno u otro tipo, similares desde un punto teórico a alguna forma conocida de organización (es decir, jerárquicos). A continuación, deducen el comportamiento de las empresas resultantes para responder a los rivales estratégicos, la incertidumbre, las limitaciones de la información, etcétera. Pero esas deducciones casi siempre se caracterizan por una teoría del equilibrio, es decir, la inmovilidad entre las empresas se considera resultado del equilibrio reinante en el seno de las mismas. Por lo tanto, la presunción de homogeneidad es manifiesta.¹³

Lo equivocado de esta búsqueda del equilibrio, que recuerda a la de los fundadores de la mecánica estadística, resulta aún más transparente en nuestra época, donde cambiar de empleo es muy habitual. Pero incluso en tiempos pasados, la idea de que se podía tener un empleo de por vida daba una impresión errónea del mercado laboral, afectado entonces como ahora por fluctuaciones y crisis impredecibles. Una teoría de la empresa debe ser, necesariamente, una teoría del desequilibrio con un futuro incierto.

Observando los datos reales, se puede comprobar que, muy probablemente, hay leyes generales que describen la creación y el crecimiento de las empresas. Modelos como el de Robert Axtell nos permiten abrigar la esperanza de que llegaremos a comprender la causa profunda de esas leyes. Pero, en última instancia, debemos hacernos otra pregunta: ¿qué queremos? Como siempre sucede con la física social estadística, no podemos esperar que nos enseñe a predecir o controlar los detalles —como el de si Brian, el carnicero de Brecon, podrá sobrevivir cuando un gran hipermercado se instale en su pueblo—. Ésta es una de las grandes limitaciones del enfoque. Pero tal vez sí tengamos posibilidad de identificar en qué condiciones pueden tener alguna oportunidad establecimientos como el de Brian.

XII ÚNASE AL CLUB *LAS ALIANZAS EN LOS NEGOCIOS Y EN LA POLÍTICA*

La ciencia de la sociedad habría obtenido un elevado nivel de perfección si nos permitiera comprender, en cualesquiera circunstancias sociales concretas —por ejemplo, en las circunstancias que atraviesan en la actualidad Europa o cualquier país europeo—, por qué causas la sociedad se ha convertido, en todos y cada uno de sus particulares, en lo que es.

JOHN STUART MILL (1843)¹

Era muy probable que, en algunos sentidos, la llamada a la unidad antifascista obtuviera una respuesta inmediata, porque, públicamente, el fascismo trataba como enemigos a los liberales de todo tipo, a los socialistas y a los comunistas, y a los regímenes soviéticos, y pretendía destruirlos. Como afirma el viejo dicho inglés, tenían que unir su estrella si no querían acabar estrellados.

ERIC HOBSBAWM (1994)²

¿Por qué hay guerras y revoluciones? No lo sabemos. Lo único que sabemos es que para llevar a cabo las unas o las otras, los hombres se reúnen para formar cierta combinación de la que todos toman parte; y decimos que ésta es la naturaleza de los hombres, que ésta es la ley.

LEÓN TOLSTOI (1869)³

La verdad es que soy un usuario de Mac. Supongo que eso podría hacer que me tacharan de radical, iconoclasta y librepensador. Al menos, eso es lo que a los usuarios de Mac nos gusta pensar. Sin embargo, quie-

nes optan por PC con tecnología Microsoft, nos ven como idiotas que han optado por el bando perdedor.

A veces, el mercado nos sitúa ante una elección tan difícil que ni siquiera la contemplamos –pedir un café en Estados Unidos siempre es una prueba de fuego–. Otras veces, sin embargo, parece que no hay opción. Para enviar cartas por correo ordinario, existe un único servicio postal. Pero a veces el sistema se bifurca y entonces hay que decidirse sin tardanza: sabiendo que no hay vuelta atrás, ¿seguimos por la derecha o por la izquierda? La vida nos sitúa ante muchas elecciones binarias. Somos, entonces, como un átomo magnético que se preguntará hacia dónde tiene que apuntar la aguja de su brújula, su spin, y, además, también nos influyen las elecciones de quienes nos rodean. En consecuencia, puede existir un sutil juego de interacciones que conducen a resultados imposibles de prever sin considerar la dinámica del grupo en su conjunto.

En este capítulo y en los dos siguientes, voy a considerar diversas situaciones sociales en las que nos vemos frente a opciones difíciles y excluyentes. Comienzo aquí con un tipo especial de situaciones frecuentes en la política y en los negocios: la formación de fusiones y alianzas. Las empresas no siempre crecen en la forma que perfilamos en el capítulo anterior, mediante una acumulación constante de empleados o un incremento gradual de las ventas, también se pueden fusionar con un competidor con la esperanza de adquirir ventajas sinérgicas. También pueden optar por colaborar sin renunciar a su identidad individual. En el despiadado mundo de las fusiones empresariales puede haber un pequeño rincón para tomarse un respiro. Es posible que los actores que no pueden llegar a líderes del mercado no tengan más opción que unir sus reducidas fuerzas a las huestes de los gigantes, para ser absorbidos o, por lo menos, para adaptarse a los modos de actuar del más fuerte.

En los sistemas políticos multipartidistas, las alianzas pueden decidir el equilibrio de poder. Si el número de partidos es elevado, bien puede ocurrir que ninguno pueda gobernar sin el apoyo de otros. De pronto, los actores secundarios se encuentran con la llave del poder. Es lo que ha venido ocurriendo durante décadas en Alemania, donde, por ejemplo, el Partido Socialdemócrata gobernó (en Alemania Occidental) en coalición con el Partido Democrático Libre desde 1969 hasta 1982.

La historia está viva con las consecuencias de las coaliciones entre políticos y naciones. ¿Habría salido derrotado Napoleón en Waterloo sin la

intervención de los prusianos? ¿No obtuvo Estados Unidos su independencia no gracias a George Washington sino a una amalgama de potencias europeas impacientes por ver el declive de los británicos en el Nuevo Mundo? ¿Cómo habría sobrevivido Atenas frente a los persas sin la ayuda de Esparta, su eterna enemiga? Estas cuestiones les pueden parecer ociosas a muchos historiadores que tienen por norma interesarse sólo por lo que ocurrió y no por lo que pudo haber ocurrido. Pero vamos a ver cómo, bebiendo en las fuentes de inspiración de la física, se puede investigar con mayor entidad “lo que podría haber sido” y empezar a explorar las contingencias de la historia. Si es cierto que la galleta se desmenuza de una sola forma, podemos empezar a sistematizar, más que sólo imaginar, las alternativas y, por lo tanto, a hacer de la “historia contrafactual” una meta más concreta y objetiva.

ESTABLECIENDO PARÁMETROS

En la parte noble del panteón de las empresas sólo hay espacio para unas pocas. Su supremacía viene definida por su tamaño, facturación y cuota de mercado. Pero incluso las grandes empresas se ven forzadas alguna vez a cooperar más que a competir con sus rivales; por ejemplo cuando las nuevas tecnologías dan relevancia a los parámetros y a la compatibilidad. A no ser que los productos que venden las distintas empresas sean técnicamente compatibles, toda empresa se arriesga a verse excluida de algún sector del mercado.

Con frecuencia, esto se percibe como una de las cuestiones candentes de la sociedad moderna, que ejemplifica bien la lucha que se produjo entre los sistemas de proyección de vídeo Betamax y VHS en la década de 1980. Se ha dicho que la ineficacia de la red ferroviaria del sur de Estados Unidos durante la década de 1860 –por la combinación de tres anchos de vía distintos– contribuyó a la victoria de la Unión sobre la Confederación. (En el Norte, el ancho de vía ya se había unificado en su mayor parte.) Durante el desarrollo de la máquina de escribir, las empresas se vieron frente al dilema de adaptarse a la disposición de teclas QWERTY o apostar por otra nueva. El sistema QWERTY se ha convertido en un accidente petrificado de la historia, pese a estar muy lejos de ser un diseño óptimo: la accesibilidad de las teclas no se corresponde con la

frecuencia con que se usan. Hay incluso quienes sugieren que, en el siglo XIX, el QWERTY se escogió precisamente *a causa de* su ineficiencia, que evitaba que las teclas mecánicas se atascaran cuando las utilizaban mecanógrafos excesivamente diestros.* Cuando se inventó el fonógrafo, los fabricantes tuvieron que acordar que los discos rotarían a 16, 33, 45 y 78 revoluciones por minuto (y luego, si merecía la pena insistir en el primero y el último de estos parámetros). El conflicto entre los sistemas de medición métrico y anglosajón es notable en el sector industrial, y la existencia de esos dos sistemas todavía causa problemas a ambos lados del Atlántico. (La NASA se percató de ello en 1999, cuando un fallo de conversión entre los dos sistemas echó a perder una misión con doscientos millones de dólares de presupuesto.) Los voltajes de las redes eléctricas nacionales, el tamaño de los primeros discos compactos, los códigos de color para los gráficos por ordenador... la lista podría seguir y seguir.

Desde el punto de vista del consumidor, el deseo de acordar los parámetros es evidente, pero lo que no está tan claro es cuál es la mejor opción para las empresas. Si el mercado se fragmenta en muchos grupos de usuarios distintos con funciones equivalentes pero con equipos incompatibles, las empresas sólo pueden hacerse con una cuota de mercado determinada. (Pocos consumidores podrán comprar en más de un sistema.) Si, por el contrario, una empresa decide amoldar las especificaciones operativas de su producto a las de algún producto de la competencia, su cuota de mercado potencial será mucho mayor, pero, a cambio, será compartida. Además, los costes de capital de modificar el proceso de producción para adaptarse a un nuevo estándar representan un importante desincentivo. Ahora bien, si un estándar empieza a sacar ventaja a los demás, es posible que merezca la pena adaptarse, porque aunque eso signifique amoldarse a un rival, la empresa puede gozar de cierta ventaja frente a otras.

En algunos casos, una industria o una nación adoptan un determinado estándar –algunas veces obligadas por la legislación–; pero es raro.

* La normalización de los anchos de vía y de los teclados de las máquinas de escribir son ejemplos clásicos de la llamada *path dependence* y de *lock-in* de la evolución de los mercados económicos. En tales casos, el resultado depende de las circunstancias históricas. Brian Arthur, que ha elaborado un modelo de agentes para investigar la normalización del ancho de vía estándar, sostiene que la *path dependence* puede ser el resultado de la eventual aparición de un parámetro relativamente ineficiente o menos que óptimo, lo cual pone en tela de juicio la idea convencional (neoclásica) de la economía, de que la competencia siempre se salda con la elección del mejor resultado de los posibles.

Con mayor frecuencia, las fuerzas del mercado presionan para que una industria adopte estándares competitivos y las empresas privadas o estatales tienen que alinearse con un bando o con el otro. Porque, en general, sólo compiten entre sí dos bandos. Esto puede ser el resultado natural de dos tendencias opuestas. Si una empresa tiene que elegir entre dos alianzas, lo mejor que puede hacer es optar por la mayor: las alianzas pequeñas se extinguen y su número total decrece. Al mismo tiempo, una empresa no suele querer colaborar con otra con la que esté enfrascada en una competencia feroz. Cuando sólo hay dos alianzas, todas las empresas pueden formar parte de un grupo tan grande como sea posible, al tiempo que se oponen activamente a su rival más importante.

La evolución de los estándares técnicos de los sistemas operativos de los ordenadores en la década de 1980 es un ejemplo clásico. El sistema operativo de un ordenador es el programa que gestiona el equipo, procesa la información y la distribuye; es, por así decirlo, la lengua materna del ordenador. Cualquiera que tenga conocimientos técnicos suficientes puede inventar un sistema operativo –puede inventar un lenguaje– y en los años en que nació la informática, eso es precisamente lo que ocurrió. La industria de los ordenadores se habría convertido en una Torre de Babel.

Pero a finales de la década de 1960, dos informáticos de los Laboratorios Bell de la sucursal de AT&T en Nueva Jersey diseñaron un sencillo y elegante sistema operativo que llegó a ser conocido por el nombre de Unix. Se hizo muy popular, pero AT&T no pudo sacar ningún provecho de él porque, por aquel entonces, la ley no le permitía entrar en el sector informático. Así que decidió ceder el Unix por su coste nominal a todo el que lo quisiera –que, al parecer, fueron casi todos–. Además, quienes adquirían la licencia del Unix también tenían derecho a modificarlo y mejorarlo. Cosa que por supuesto hicieron. En la década de 1980 existían unas doscientas cincuenta versiones de Unix en funcionamiento, y cada una de ellas era incompatible con las demás. Sucedió como en la evolución de las especies: las poblaciones acumulan pequeñas mutaciones hasta que llegan a ser genéticamente incompatibles y no pueden intercambiar información genética.

El mercado de los terminales informáticos, la mayoría de los cuales funcionaban con Unix, había adquirido proporciones gigantescas: en 1990 estaba valorado en diez mil millones de dólares. Las empresas contaban con una fuerte motivación para estandarizar sus sistemas operativos Unix.

El primer movimiento se produjo en 1987, cuando Sun Microsystems y AT&T acordaron el uso del llamado Unix Sistema V, que AT&T había desarrollado en la década de 1970. AT&T cedería la licencia de ese sistema a otras empresas, pero ahora por un precio. Ante la perspectiva de estar bajo la égida de AT&T, en mayo de 1988, siete de sus rivales, IBM y Digital Equipment Corporation incluidas, formaron una alianza llamada Open Software Foundation (OSF) con la intención de desarrollar un nuevo sistema operativo basado en Unix. Como respuesta, a finales de 1988, AT&T y Sun Microsystems formalizaron su propia alianza: Unix International Incorporated (UII). La industria quedó polarizada en dos bandos.

Finalmente, ninguno de ellos resultó vencedor. UII se deshizo en 1993, pero OSF tuvo muy poco tiempo para saborear su aparente victoria, porque no tardó en fragmentarse a causa de la incapacidad de sus miembros por resolver los intereses que los enfrentaban. Felizmente, sin embargo, en 1994 se atisbó cierto consenso cuando un consorcio de fabricantes llamado X/Open Company (que al año siguiente se fusionó con OSF para formar Open Group) llegó al acuerdo de apostar por la llamada Single Unix Specification. Alentadas por los Estados y por las firmas comerciales, que defendían la creación de un sistema operativo estándar, los principales fabricantes de ordenadores empezaron a adaptarse a los nuevos requisitos.

El crecimiento inicial de OSF y de UII había obligado a las empresas informáticas a optar por un camino o por el otro. ¿Qué debían decidir? ¿Se puede prever qué resultado tendrá la formación de alianzas en la industria?

HACIA LOS VALLES

El politólogo Robert Axelrod dice que sí, que se puede, y junto con sus compañeros de la Universidad de Michigan ha elaborado una teoría que lo demuestra. La llaman "teoría del paisaje" y es una adaptación a medida de la física estadística. Se trata de un juego en el que los jugadores son como partículas de gas a punto de condensarse –quizás en una gran gota, pero muy probablemente en dos o más gotas más pequeñas-. Los participantes en el juego se ven arrastrados por una especie de atracción mutua, pero también hay repulsiones que los mantienen ale-

jados. De ese tira y afloja surgen configuraciones, y esos agentes que tanto se asemejan a las partículas forman alianzas.

La condensación de las partículas en cúmulos de número discreto es un fenómeno muy común: pensemos en el vapor de agua que se condensa en gotas de lluvia o en copos de nieve. También se forman cúmulos si una combinación de dos líquidos distintos se *enfria* de pronto –es decir, desciende a una temperatura en la que ambos líquidos ya no se pueden mezclar y empiezan a separarse-. Es algo corriente en la metalurgia, donde, al enfriarse, los dos metales de una aleación se segregan formando pequeñas gotas de esos dos metales en estado puro. La configuración ideal final de los átomos de un metal –la que posee menor energía– podría ser la de la separación completa de ambos tipos, como la capa de vinagre que queda por debajo de la de aceite en una ensalada que lleva mucho tiempo aliñada. Pero los pequeños cúmulos de cada metal pueden congelarse antes de estar fundidos en una sola capa, permitiendo que ambos metales queden estrechamente intercalados.

Con frecuencia, el crecimiento de esos cúmulos está relacionado con su tamaño: cuanto más grandes, más aprisa crecen; esto se debe al incremento de la superficie del cúmulo, que es donde más partículas tiene. Los cúmulos pequeños están condenados a desaparecer o a ser absorbidos por otros más grandes. En física, a este fenómeno se le conoce como ley de Ostwald. Se trata, si se quiere, de otro caso en el que el rico se hace más rico y el pobre más pobre. Trasladado al mundo de la empresa, podría servir como metáfora de las absorciones y de la globalización.

La imagen tiene mucho sentido desde un punto de vista intuitivo cuando se la aplica a las alianzas empresariales: como es natural, toda empresa se ve arrastrada hacia las coaliciones que, según todo parece indicar, emergerán con mayor fuerza. Pero también hay otras fuerzas en juego. Un impulso fundamental es el de no alinearse con empresas rivales, sino el de oponerse a ellas y tratar de expulsarlas del mercado. Los controvertidos intentos de Microsoft por monopolizar el mercado de los ordenadores personales a finales de la década de 1990 demostraron esta cruda ley darwiniana de los negocios. Impulsadas por la necesidad, las alianzas entre empresas pueden impedir ese tipo de absorciones unilaterales.

Así pues, por un lado podemos considerar que la fuerza de gravedad entre dos empresas se incrementa proporcionalmente a su tamaño: cuanto mayor es la empresa A, mayor la tentación de la empresa B de unirse a

ella (por ejemplo, tiene sentido que una pequeña empresa informática se ponga del lado de un gigante como Sun Microsystems). Pero la repulsión entre dos empresas está relacionada con la antipatía que existe entre ellas, que muy probablemente dependerá de hasta qué extremo se solapan sus productos y mercados. Dos empresas informáticas especializadas en la venta de PC en el mercado nacional de Estados Unidos se tendrán por rivales tan enconados como ambas podrían tener a una tercera empresa especializada en la venta de terminales o programas informáticos para grandes empresas. Y los rivales rara vez se tratan con cariño: la empresa A podría optar por incorporarse a una alianza no sólo porque ésta sea grande, sino porque, al ampliarla con su incorporación, aumentan las posibilidades de que otra alianza, la alianza a la que pertenece su rival B, pueda hundirse. Aunque B forme parte de una alianza mayor, A podría unirse al bando contrario por no contribuir a la causa de B.

Por lo tanto, en el modelo *paisajístico* de formación de alianzas desarrollado por Robert Axelrod y su equipo, cada empresa es como una partícula con una fuerza interactiva confeccionada a medida y ejercida sobre todas las demás partículas. La fuerza de atracción que A ejerce sobre B depende del tamaño de A. La fuerza de repulsión depende de la distancia existente entre A y B. Este modelo es como el de Van der Waals para los fluidos, salvo que en éste todas las partículas son distintas y, normalmente, sólo hay un puñado de ellas. El principio que gobierna su configuración final es el mismo que el de la mecánica estadística tradicional: ¿cuál es la disposición más estable? Es decir, ¿cuál es el estado de equilibrio?

Para hallar ese estado, Robert Axelrod y su equipo definieron una especie de "energía total" para un grupo de empresas y la calcularon sumando todas las fuerzas de atracción y de repulsión por pares de empresas cuando éstas forman parte de diversas coaliciones. Si los rivales más enconados forman parte de la misma alianza, la energía total es relativamente alta a causa de la repulsión mutua de las empresas. Una disposición más estable es la que sitúa a ambos competidores en bandos distintos. En la configuración con menor energía, o de mayor equilibrio, ninguna empresa puede dar pie a una situación más estable pasando de un bando a otro. Se trata de un equilibrio de Nash (página 311) y es lo que cabe esperar que suceda en la realidad.

Esto no quiere decir que todos estén satisfechos dentro de la configuración de menor energía. En realidad, es casi inevitable que algunos agen-

tes no lo estén. Normalmente, sólo hay dos grandes alianzas, pero puesto que todas las empresas consideran a las demás como rivales en mayor o menor medida, todas están obligadas a compartir cama con algunos adversarios, quizá con los más cercanos. No hay otra opción, aparte de la de proseguir a solas, lo cual, sin duda, no es lo más acertado. En el siglo V a. de C., Tucídides comprendió que la amenaza de aniquilación hace extraños compañeros de cama: "el miedo mutuo es la única base sólida de una alianza".⁴

Así pues, la situación más estable supone la *frustración* de los deseos de algunas empresas. Empleo el término con conocimiento de causa, lo saco de una situación análoga estudiada por los físicos. En el modelo magnético de Ising, todo átomo magnético se asienta sobre una retícula regular y apunta su aguja (su spin) en una dirección o en la contraria. En los materiales llamados ferromagnéticos, como el hierro, el estado más estable es aquel en el que todos los spins señalan en la misma dirección. Pero en algunos materiales magnéticos, las interacciones tienen ciertas características que hacen que los átomos vecinos prefieran no alinear sus spins, sino señalar en direcciones opuestas. Son los llamados materiales antiferromagnéticos.

Si los spins están dispuestos sobre una retícula regular, el requisito de los alineamientos opuestos sí puede cumplirse (véase figura 12.1a). Pero si, por el contrario, los spins están colocados sobre una retícula triangular, ya no es posible la satisfacción completa de ese requisito. Así configurados, se puede decir que los spins están agrupados en tríos en los que cada miembro del grupo equidista de los otros dos (véase figura 12.1b). Cada par de ellos puede tener los spins en direcciones opuestas, pero el tercero ha de estar alineado con el uno o con el otro. Esto es lo que denominamos "frustración": no hay forma de satisfacer a un tiempo las demandas contrapuestas de todos los átomos. Eso quiere decir que, dentro del modelo de Ising, en una retícula triangular no existe un estado estable único y definido, siempre hay algún grado de imperfección o desorden en la orientación de los spins, sin importar cómo los alineemos. A ese sistema se le llama "vidrio de spin".*

* En este contexto, el término "vidrio" se emplea por analogía con los materiales vítreos, en los cuales, a diferencia de lo que ocurre en los cristales, la posición de los átomos no es perfectamente ordenada y regular.

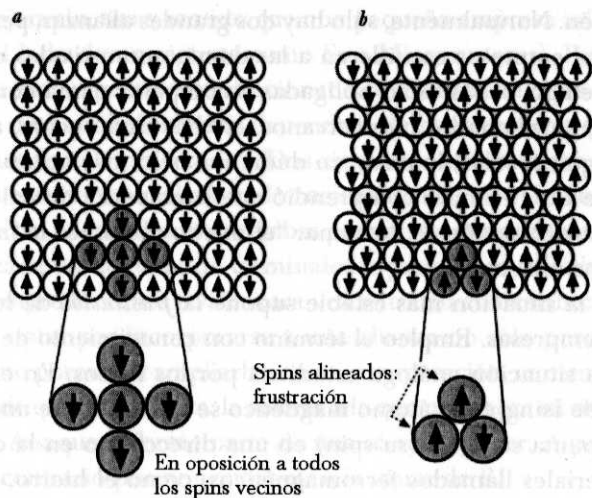


Figura 12.1. (a) En un material antiferromagnético, los spins de los átomos más próximos señalan en direcciones opuestas. (b) Si los átomos están dispuestos sobre una retícula triangular en vez de cuadriculada, es imposible que cada átomo oriente su spin para oponerse a los de todos sus vecinos, de ahí la *frustración*.

En lugar de poseer un solo estado de equilibrio, un vidrio de spin tiene multitud de configuraciones de spins distintas con energías muy similares. Se puede describir muy gráficamente lo que ocurre en ese sistema recurriendo al concepto de “paisaje de energías”: mapa de todas las posibles disposiciones de los spins y de sus energías respectivas. Se comprende con claridad mediante una analogía con un tablero de ajedrez. La belleza, el arte y el imperecedero atractivo del ajedrez residen en el hecho de que, sobre su retícula de ocho por ocho, con dieciséis piezas de cada color, el número de posiciones –de configuraciones– y de formas de desplazarse de una a otra posición, es astronómico, hasta el extremo de que ni siquiera los ordenadores más potentes del mundo pueden valorar la mejor jugada mediante la enumeración de todas las jugadas que podrían derivarse de ella. Y sin embargo, en principio podríamos enumerar todas las posiciones que podrían surgir en el curso de una partida, y, si trazásemos un gráfico, cada una de esas posiciones se correspondería con un punto de ese gráfico. Por ejemplo, un eje del gráfico podría representar la posición de la dama blanca, que se desplaza

desde el escaque número uno al número sesenta y cuatro –cada escaque tiene asignado un número–. (Para ser escrupulosamente precisos, habría que contar del cero al sesenta y cuatro, donde el cero señalaría que la pieza no se encuentra en el tablero.) Un segundo eje podría representar la posición del alfil negro de la izquierda. Así pues, una posición en la que la dama blanca se encuentre en el escaque cinco y el alfil negro en el escaque cuarenta y dos se corresponde con un punto concreto de nuestro gráfico de sesenta y cuatro por sesenta y cuatro (véase figura 12.2a). Por supuesto, no basta con eso: ¿qué hay de las demás piezas? Para reflejar totalmente el estado del tablero, necesitamos un gráfico con treinta y dos ejes, uno por cada pieza. Puesto que a partir de tres nos quedamos sin dimensiones espaciales, no es posible dibujar un gráfico así, pero, en principio y mientras nos despreocupemos de visualizarlo, nada nos impide pensar en términos de ese *cube* multidimensional. Cada punto de la retícula de ese *hipergráfico* se corresponde con una posición concreta de todas las piezas sobre el tablero.

Y lo mismo puede decirse de la disposición de los spins sobre un vidrio de spin o, en realidad, de cualquier modelo de Ising de un imán. Cada configuración de todos los spins –donde todos señalan *hacia arriba* o *hacia abajo*– puede representarse como un punto sobre la retícula de un hipergráfico con tantas dimensiones como spins haya. Y cada una de esas configuraciones tiene una energía total concreta que se calcula sumando todas las interacciones entre pares de spins –algunas favorables y otras contrarias.

Y ahora podemos añadir otro eje al gráfico que refleje las energías totales. Visualizar esto es pedir mucho, es verdad, pero la tarea se simplifica si simulamos que todo el abanico de las distintas configuraciones puede representarse no en un espacio multidimensional, sino sobre una superficie bidimensional (véase figura 12.2b). Cada punto de la retícula de esta superficie se corresponde con una posición particular de todos los spins. Y ahora podemos asignar a cada uno de esos puntos una *altura* que representa la energía de cada configuración en particular. Si unimos esos puntos, obtenemos un paisaje de energías (véase figura 12.2b), una especie de mapa topográfico que refleja las variaciones de energía cuando cambia la configuración de los spins. Cuanto más estable es una configuración, menor es su energía. Si una configuración no puede alterarse con un cambio menor (alterando unos cuantos spins) sin incrementar

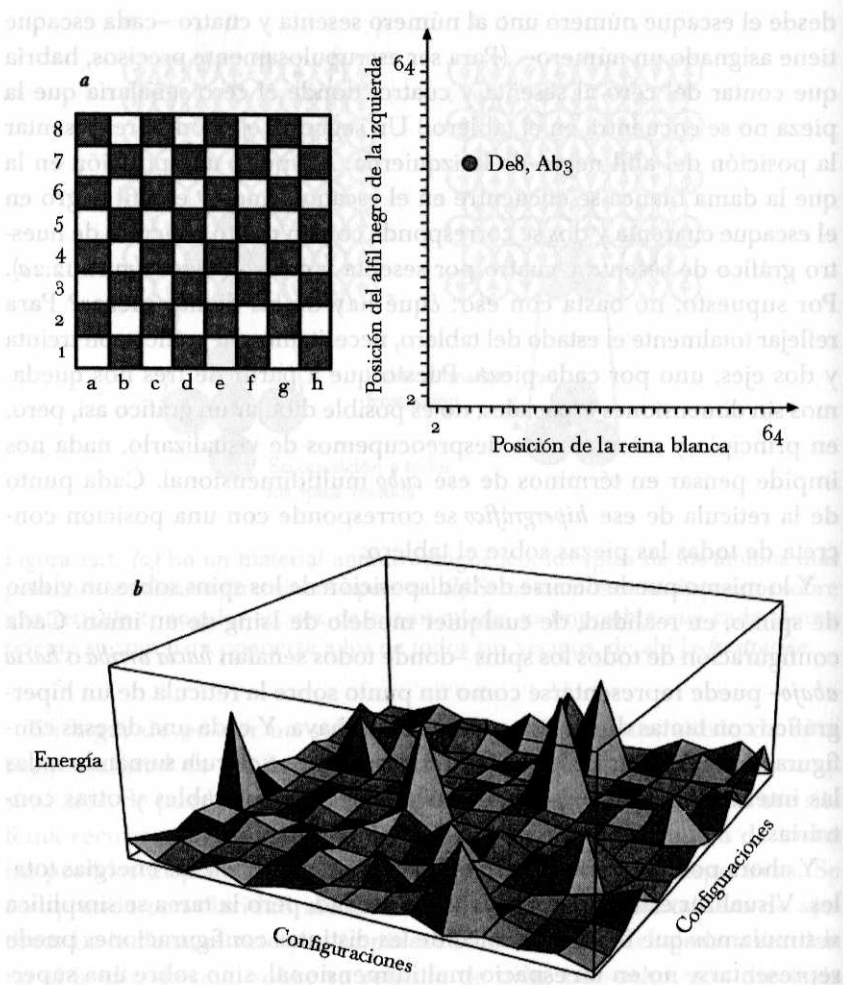


Figura 12.2. (a) Las posiciones de las piezas en una partida de ajedrez pueden estar representadas por los puntos de un gráfico. Un gráfico bidimensional como el de la figura vale para reflejar las posiciones de dos piezas. Para incluir las treinta y dos piezas nos haría falta un gráfico de treinta y dos dimensiones. (b) Si reducimos el gráfico multidimensional del estado de los spins de un vidrio de spin a una superficie de dos dimensiones, podemos visualizar un paisaje de energías en el que la altura se corresponde con la energía de cada estado.

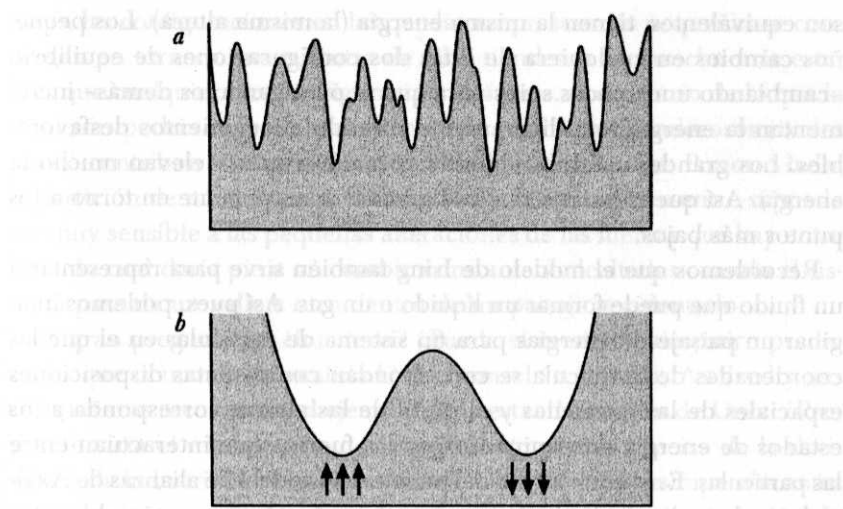


Figura 12.3. (a) El paisaje de energías de un vidrio de spin está lleno de crestas y valles, ninguno de los cuales es significativamente más pronunciado que los demás. En otras palabras, hay muchos *mínimos de energía local*. En la figura he representado las crestas y los valles sobre un sencillo gráfico bidimensional, que podría tomarse como un corte longitudinal del paisaje de energías –semejante al perfil topográfico de una cordillera montañosa. (b) Por el contrario, en un material ferromagnético sólo hay dos valles y tienen la misma profundidad. Corresponden a los estados de equilibrio en los que todos los spins señalan hacia arriba o hacia abajo.

su energía total, entonces es *localmente* estable y se corresponde con un valle del paisaje. Moverse en alguna dirección para salir de ese estado significa moverse hacia arriba.

El paisaje de energías de un vidrio de spin suele ser muy accidentado. Está lleno de valles, cada uno de los cuales corresponde a un estado de energías relativamente bajas (véase figura 12.3a). Hay valles más profundos que otros, pero a primera vista ninguno parece mucho más hondo que los demás. Para el modelo de Ising de un material ferromagnético normal, la situación es muy distinta. Sólo hay dos valles profundos: uno corresponde a la configuración en la que todos los spins están *hacia arriba*, el otro a la configuración en la que todos están *hacia abajo* (véase figura 12.3b). En ausencia de algo que decante una configuración u otra, ambas

son equivalentes, tienen la misma energía (la misma altura). Los pequeños cambios en cualquiera de estas dos configuraciones de equilibrio –cambiando unos pocos spins para que se opongan a los demás– incrementan la energía total ligeramente creando alineamientos desfavorables. Los grandes cambios –modificar muchos spins– elevan mucho la energía. Así que el paisaje se eleva gradual y suavemente en torno a los puntos más bajos.

Recordemos que el modelo de Ising también sirve para representar a un fluido que puede formar un líquido o un gas. Así pues, podemos imaginar un paisaje de energías para un sistema de partículas en el que las coordenadas de la retícula se correspondan con distintas disposiciones espaciales de las partículas y el perfil de las alturas corresponda a los estados de energía determinados por las fuerzas que interactúan entre las partículas. Es el equivalente del paisaje del modelo de alianzas de Axelrod, en el que las *partículas* se congregan en cúmulos que están obligados a soportar cierta cantidad de frustración a causa de su mutua *antipatía*.

EQUILIBRIO DE PODER

Para encontrar la configuración más probable de agentes aliados es su modelo, Axelrod y sus compañeros recorrieron el paisaje de energías buscando los valles. Los físicos hacen algo parecido cuando buscan la disposición más estable de muchas partículas en interacción de los modelos informáticos. Puesto que suelen tratar con millares de partículas, el número de configuraciones posibles es inmenso, lo cual les obliga a recurrir a técnicas de computación especiales que les permiten recorrer a ciegas el paisaje de energías en busca de los valles. Pero si el número de agentes es pequeño, la búsqueda se puede llevar a cabo exhaustivamente calculando las “energías” de todos los agregados posibles para llegar al de menor energía. Es lo que hizo el equipo de Axelrod.

A causa de la frustración en el modelo paisajístico, cabe esperar que el paisaje de energías sea accidentado, como el de un vidrio de spin. Pero la imagen se simplifica por el hecho de que no todos los agentes son idénticos, como ocurre en un vidrio de spin. Este desequilibrio implica que algunas alianzas tengan una configuración mucho más estable que otras. Por ejemplo, con dos empresas rivales particularmente grandes y pode-

rosas, las configuraciones en las que las empresas más pequeñas se congregan en torno a una o a otra de ellas tienden a ser mucho más estables que cualquier otra configuración. Así pues, al contrario de lo que la intuición podría sugerir, la existencia de pocos pero poderosos rivales puede contribuir a crear pautas muy estables de alianzas. Por otro lado, la partición de muchas empresas medianas que compiten entre sí puede ser muy sensible a las pequeñas alteraciones de las fuerzas que hay entre ellas, lo cual daría pie a un cambio constante de lealtades cuando el sistema pasa de un valle a otro dentro de un paisaje accidentado.

La gran pregunta es, ¿funciona? ¿Puede el modelo paisajístico predecir lo que ocurre en la realidad? Por ponerlo a prueba, Axelrod y sus compañeros recurrieron al ejemplo de la estandarización de Unix. ¿Proporcionaría el modelo una descripción *retrospectiva* precisa de la división de la industria informática a partir de la situación que imperaba antes de que se iniciaran las alianzas? En las coaliciones de finales de la década de 1980 intervinieron nueve empresas informáticas, todas ellas de variado tamaño y con distintos grados de rivalidad. Algunas, por ejemplo, eran especialistas en la fabricación de terminales gestionadas con el sistema operativo Unix, otras estaban especializadas en productos informáticos. Los investigadores dieron por supuesto que la rivalidad sería más intensa y, por tanto, que habría mayor *repulsión* entre dos empresas especialistas que entre una empresa especialista y otra generalista.

Se podrían emplear varias magnitudes para medir el *tamaño* de una empresa; por ejemplo, su cuota de mercado o sus activos netos. Axelrod y sus compañeros optaron por la cuota del mercado de terminales informáticos de 1987. En cuanto a la fuerza relativa de las fuerzas de repulsión entre rivales próximos o distantes... la verdad es que no había una manera evidente y única de decidirla, así que los investigadores optaron por un conjunto amplio de valores plausibles, porque se habían percatado de que, salvo en los valores extremos de este conjunto, el resultado no se veía demasiado afectado por la intensidad de las fuerzas.

Dieron por supuesto que se formarían dos alianzas. Pero, ¿quién se unía con quién? Hay doscientas cincuenta y seis formas posibles de dividir nueve empresas en dos bandos. Pero los cálculos del paisaje de energías demostraban que, en líneas generales, no había más que dos configuraciones estables, y la que tenía menos *energía* coincidía en gran medida con la división entre OSF y UII. En esta configuración, sólo una empresa

(IBM) estaba en el bando equivocado (con UII en lugar de con OSF). Según lo esperado, en ambas configuraciones estables, las dos alianzas eran de tamaño similar. Puesto que la probabilidad de acercarse tanto a la realidad histórica por puro azar es de uno entre quince, parece que el modelo paisajístico no funciona del todo mal.* Si en 1988 las empresas lo hubieran tenido a su disposición, podrían haberlo empleado de guía para predecir lo que ocurriría, y para ayudarlas a decidir hacia qué lado saltar.

Con frecuencia, las decisiones industriales se toman sobre la base de todo tipo de previsiones a largo plazo y de análisis de costes y beneficios. Pero el modelo paisajístico no apela a nada parecido. En vez de ello, las empresas actúan con una visión decididamente miope: en realidad, se limitan a mirar a sus competidores de uno en uno y a preguntarse: "¿Qué impresión me dan?". Y se supone que esa impresión no está influenciada por la compañía que tenga la empresa: la interacción entre A y B es la misma sin tener en cuenta si B se ha unido a C o no.** Además, se supone que los agentes convergen en su configuración final mediante una serie de pasos pequeños e independientes, cada uno de los cuales hace caer al grupo por la pendiente que conduce al equilibrio. En palabras de Robert Axelrod y de su colega Scott Bennett,

la idea de descenso no hay por qué justificarla apelando a un proceso de toma de decisiones inteligente y con vistas al futuro, sencillamente, puede ser resultado de otro proceso en el que cada actor reacciona ante la situación con un intento miope de lograr una mejora local.⁵

* Sin embargo, tiene que darse una importante condición previa. Los físicos franceses Razvan Florian y Serge Galam han demostrado que si el modelo no está programado para producir sólo dos alianzas, sino que se le permite formar cuantos cúmulos se quiera para las nueve empresas, ni las configuraciones identificadas por el grupo de Axelrod ni la que se produjo en la realidad histórica, surgen como claros aspirantes a la mejor configuración. En vez de ello, el promedio de coaliciones es de entre seis y siete, y esas configuraciones no son las preferidas sobre otra configuración en la que no se establece ninguna alianza. Queda por resolver, por tanto, la cuestión de si existen buenos argumentos para insistir en que escenarios como el del ejemplo tenderán, en efecto, a resolverse sólo con dos coaliciones, como comenté en la página 323. Ciertamente, el propio modelo no parece insistir en ello.

** Esto hay que aclararlo. El incentivo para que la empresa A forme una alianza con la empresa B depende de la suma de las interacciones de A con cada empresa de la alianza de B. En este sentido, que A y B se unan depende de las compañías de B. Pero la interacción entre A y B no se ve afectada por la alianza de la que forme parte B.

En realidad, a no ser que cambien de actitud con respecto a sus rivales, las empresas están a merced de lo inevitable. Es con esto en mente como nosotros apelamos por nuestra parte a una razón más dramática y de mayor alcance para concluir que merece la pena examinar el paisaje por ver lo que depara el futuro.

EUROPA DIVIDIDA

Si alguien ha defendido alguna vez que se podría jugar al ajedrez con más de dos juegos de piezas, la propuesta no ha cuajado. Tampoco una versión del fútbol con más de dos equipos en el campo. Ni un tenis en tres direcciones. Debe deberse más a una cuestión de los límites a la coordinación física y mental –por lo que sabemos que suele ocurrir en las competiciones en las que intervienen tres jugadores–. Antes o después, dos de ellos se confabularán para eliminar al tercero. Hay algo inherentemente inestable en las competiciones con más de dos jugadores o equipos, que es una de las quejas que a veces se hacen de los sistemas multipartidistas. Incluso en el Reino Unido, donde los partidos Conservador y Laborista llevan décadas sacándole un enorme terreno al Partido Liberal, se ha hablado a veces de coaligarse.

Esto adquiere un significado mucho más peligroso cuando el juego no es el ajedrez, sino la guerra. El ejército de Cromwell representaba una compleja combinación de intereses, pero sólo se desintegró cuando el enemigo común, los realistas, dejaron de ser una amenaza. Por dos veces en el siglo XX, muchos estados-nación europeos se coaligaron en dos grandes alianzas dispuestas a destruirse. Si los nervios o la suerte les hubieran fallado, las naciones de la OTAN y del Pacto de Varsovia habrían hecho el trabajo de forma más expeditiva en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial. El politólogo Kenneth Waltz resume la naturaleza bilateral de la guerra:

Quando se juega hasta sus últimas consecuencias, el juego de poder de la política fuerza a los jugadores a situarse en dos bandos enfrentados, aunque establecer y mantener alianzas es tan complicado que es posible que ese resultado sólo se obtenga bajo la presión de la guerra.⁶

Como he dicho anteriormente, a menudo se dice que la Segunda Guerra Mundial fue una consecuencia inevitable de la Primera. Una Alemania amargada, resentida por la indignidad de las enormes deudas de indemnización, fue espoleada por un dirigente que restauraría el poder y el orgullo teutones. Sin duda hay mucha verdad en ello, pero Alemania no combatió sola. No sólo Italia, sino también Hungría y Rumania se unieron al Eje de Hitler, que durante un tiempo breve pero peligroso pareció imponerse a los Aliados. ¿Tenía Europa que dividirse de esa manera? ¿Se edificaron ambas alianzas mediante una serie de negociaciones independientes y enteramente contingentes? ¿O había fuerzas mayores en juego?

En el mundo real debe de haber pocos ejemplos más exactos de un modelo de formación de coaliciones que el comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Diecisiete naciones implicadas; hay 65.536 formas de dividir las en dos bandos. Por supuesto, muchas de esas formas serían absurdos históricos (era imposible que toda Europa se uniera contra Estonia), pero no es en absoluto trivial anticipar las alianzas que surgieron a finales de la década de 1930.

Axelrod y su compañero Scott Bennett tuvieron la audacia de confrontar su modelo paisajístico con el comienzo de la Segunda Guerra Mundial. Lo más difícil era encontrar una manera de cuantificar las interacciones entre los distintos países, las fuerzas que los situaron en un bando o en otro. Tradicionalmente, los politólogos han adoptado un punto de vista *realista*, el de que todos los estados consideran a todos los demás como enemigos en potencia; es decir, creen que todos se *repelen* entre sí. Esta perspectiva tan desoladora tiene una amplia justificación histórica, pero, por supuesto, los estados también han tenido tendencia a responder o a anticipar amenazas muy concretas causadas, por ejemplo, por la competencia económica o por divisiones étnicas o ideológicas. De igual modo, podían hacer causa común con otros estados por idénticos motivos. El politólogo Glenn Snyder observa que las alianzas surgen de esta mezcla de "conflictos y afinidades".⁷

Traducido al lenguaje de la física, conflictos y afinidades quiere decir repulsiones y atracciones. Pero, ¿cómo les adscribimos cifras? La mayoría de los politólogos *neorrealistas* no lo saben. Sin embargo, en cuanto expresan el problema en términos generales más que de acuerdo a las concreciones de la contingencia histórica, se puede empezar a vislumbrar

un camino hacia adelante. Axelrod y Bennett clasificaron las interacciones entre cada pareja de estados sobre la base de seis factores derivados de las circunstancias políticas, económicas y demográficas de 1936: etnia, religión, disputas territoriales, ideología, economía y antecedentes históricos. Por ejemplo, en 1936 algunos estados eran predominantemente católicos, otros cristianos ortodoxos, otros ateos. Según ideologías, algunos eran democráticos, otros fascistas, etcétera. Los investigadores consideraban que la existencia de problemas fronterizos (por ejemplo, entre Francia y Alemania) contribuía a la repulsión, como lo hacía la reciente historia de conflictos armados entre dos estados.

Es fácil etiquetar esas casillas, pero también es necesario asignar un peso a cada factor. Axelrod y Bennett optaron por lo más sencillo: todos los factores tenían el mismo peso, y valían +1 si había afinidad y -1 si había diferencias o antagonismo. Esto es, por supuesto, enteramente arbitrario, pero por algún sitio había que empezar. En cuanto al *tamaño* de cada nación, una vez más se pueden emplear diversas magnitudes como la población o el PIB. Los investigadores decidieron usar el "índice de poder de las naciones", asignado a cada país por el proyecto *Correlates of War*, que llevan a cabo unos politólogos estadounidenses desde los años sesenta. Ese índice atribuye un grado de *poder* a cada nación basado en seis medidas de capacidad demográfica, militar e industrial. A continuación, sólo quedaba trazar el mapa de los 65.536 puntos, cada uno de los cuales se correspondía con una configuración de todos los países divididos en dos grupos. Estos grupos representaban a naciones que, cuando se rompieron las hostilidades, habían declarado la guerra o habían sido invadidas por uno o por más países del grupo contrario.*

Basándose en estos criterios, en la realidad, los países aliados fueron el Reino Unido, Francia, la Unión Soviética, Checoslovaquia, Dinamarca, Grecia, Polonia y Yugoslavia. Las naciones del Eje eran Alemania, Italia, Hungría, Estonia, Finlandia, Letonia, Lituania y Rumania. Portugal era una anomalía, formalmente neutral pero con un acuerdo de defensa firmado con el Reino Unido, razón por la cual habría que incluirlo en

* En otras palabras, ser miembro de una alianza no supone que haya ningún acuerdo formal para combatir junto a las naciones que pertenecen a ella. Los estados bálticos se unieron al Eje porque no les quedó otro remedio cuando el Ejército Rojo cruzó sus fronteras en 1940, lo cual convirtió a la Unión Soviética en su enemiga. En realidad, las masacres planificadas por el régimen estalinista hicieron que en Estonia, Letonia y Lituania muchos ansiaran la *liberación* de los nazis.

el bando aliado en lugar de excluirlo definitivamente como a Suecia y Suiza. Los resultados que ofreció el modelo paisajístico fueron notables. Es un paisaje con dos grandes hondonadas (véase figura 12.4). Una de ellas (la más profunda), se corresponde con una configuración en la que las alianzas coinciden con la enumeración que acabo de hacer casi con toda exactitud; las únicas asignaciones erróneas son Portugal y Polonia, que, en el modelo, pertenecen al Eje. La probabilidad de que se dé una coincidencia así por puro azar es de una entre doscientas.*

El valle que rodea esta configuración del paisaje de energías tiene más del doble de tamaño que la que conduce a la otra configuración de baja energía, así que es, claramente, el resultado más probable, al que se llega a partir de una mayoría de "puntos de partida". Pero, ¿cuál es la alternativa? Sorprendentemente, el segundo valle describe una guerra muy distinta, una en la que casi toda Europa, incluidas Gran Bretaña, Francia y Alemania, se une contra la Unión Soviética, que sólo se alía con Yugoslavia y con Grecia. (Estos países tenían una historia de antagonismos recientes con Alemania, lo cual incrementaba su tendencia a unirse al bando contrario.)

Ésta puede parecer una predicción absurda, pero no hay nada inherentemente absurdo en la idea de que, en la década de 1940, pudiera estallar una guerra entre Europa occidental y el Estado expansionista de Stalin. Al fin y al cabo, el pacto germano-soviético, que se prolongó hasta 1941 (una añagaza que de ningún modo redujo las mutuas intenciones agresivas de Alemania y la Unión Soviética), convirtió a Francia y a Gran Bretaña en enemigas de Stalin durante los años iniciales de la guerra. Hubo llamadas a la intervención en ambos países occidentales cuando la Unión Soviética invadió Polonia en 1939. Cuando Gran Bretaña declaró la guerra a Alemania, sólo su falta de capacidad militar le impidió hacerlo también contra la Unión Soviética. Finalmente, cuando Churchill y Stalin se aliaron por fin, la tensión fue inmensa (y creció con la entrada en guerra de Estados Unidos). Se formó una alianza que era, en palabras del historiador Eric Hobsbawm, "una asombrosa unidad de opuestos:

* De nuevo, prescindir de la restricción de que sólo haya dos coaliciones modifica estas conclusiones y debilita la capacidad del modelo para adaptarse a la imagen histórica. Pero por los motivos que he dado anteriormente, la condición de que sólo haya dos alianzas es defendible. Además, sin esta limitación, el modelo genera tres coaliciones, separando a la Unión Soviética de los otros aliados, una situación que, como argumentaré después, era muy probable de haber sido factible políticamente.

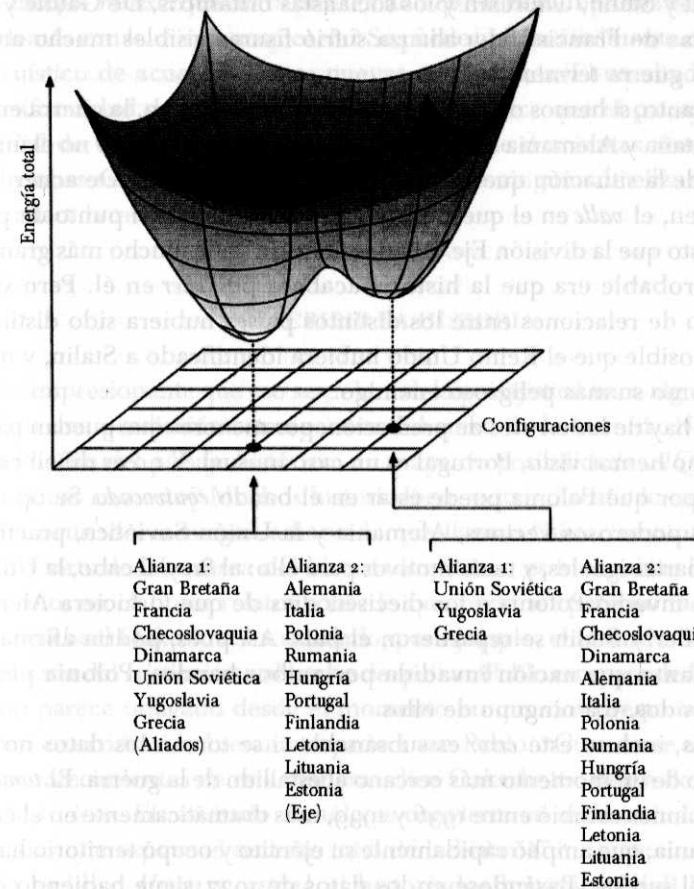


Figura 12.4. Las dos cuencas (energía mínima) en el paisaje de formación de alianzas inmediatamente anterior a la Segunda Guerra Mundial. La cuenca más profunda corresponde casi a la división exacta entre los poderes de los Aliados y el Eje, a excepción de Polonia y Portugal, que están ubicados en el campo "equivocado". La otra cuenca predice una historia muy diferente, con Europa unida contra la Unión Soviética.

Roosevelt y Stalin, Churchill y los socialistas británicos, De Gaulle y los comunistas de Francia".⁸ La alianza sufrió fisuras visibles mucho antes de que la guerra terminara.

Por lo tanto, si hemos de creer en el modelo paisajístico, la guerra entre Gran Bretaña y Alemania era el resultado más probable, pero no el único posible, de la situación que se vivía en la Europa de 1936. De acuerdo a esa imagen, el *valle* en el que Europa caería dependía del punto de partida. Puesto que la división Eje/Aliados tiene un valle mucho más grande, lo más probable era que la historia acabara por *caer* en él. Pero si el equilibrio de relaciones entre los distintos países hubiera sido distinto, es muy posible que el Reino Unido hubiera identificado a Stalin, y no a Hitler, como su más peligroso enemigo.

¿Y qué hay de los errores de predicción, por menores que puedan parecer? Como hemos visto, Portugal es un caso inusual. Y no es difícil comprender por qué Polonia puede estar en el bando *equivocado*. Se oponía a sus dos poderosos vecinos, Alemania y la Unión Soviética, prácticamente a partes iguales, y tenía motivos para ello: al fin y al cabo, la Unión Soviética invadió Polonia a los dieciséis días de que lo hiciera Alemania, y Hitler y Stalin se repartieron el país. Así pues, podría afirmarse que, en tanto que nación invadida por ambos bandos, Polonia pertenece a los dos, o a ninguno de ellos.

Además, incluso este *error* es subsanable si se toman los datos no de 1936, sino de un momento más cercano al estallido de la guerra. El *tamaño* de las naciones cambió entre 1936 y 1939, más dramáticamente en el caso de Alemania, que amplió rápidamente su ejército y ocupó territorio hacia el sur y el sureste. Basándose en los datos de 1937, sigue habiendo dos configuraciones posibles y muy parecidas a las que ya hemos visto. Pero en 1938 sólo hay una, la más realista. Y en 1939, poco antes del comienzo de la contienda, el aumento de *tamaño* de Alemania hizo crecer la repulsión de Polonia hacia ella hasta el extremo de que Polonia pasa al bando aliado. Por lo tanto, justo antes de que se declarase la guerra (y de que se sellaran las alianzas), el modelo predice exactamente cómo sucederían las cosas, un resultado que sólo tiene una probabilidad entre tres mil.

Los escépticos podrían preguntarse si la división Eje/Aliados no era una conclusión ya prevista de antemano, ajena a los detalles de lo que para nosotros son las relaciones internacionales. A pesar de su éxito aparente, ¿funciona mejor el modelo paisajístico que lo que pudiera ser

un enfoque *realista* que diera por sentado que todos los países ven a todos los demás con la misma suspicacia? Se puede aplicar fácilmente el modelo paisajístico de acuerdo a estas nuevas condiciones. El resultado es que la uniformidad de las fuerzas de interacción hace que el paisaje se asemeje al de un vidrio de spin con no menos de doscientas nueve configuraciones estables en lugar de sólo dos. Pero ninguna de ellas se parece en nada a la realidad histórica.

REESCRIBIR LA HISTORIA

Por impresionante que eso sea, el modelo paisajístico hace algo más que darnos una predicción retrospectiva del curso de la historia. Nos ofrece una imagen del paisaje histórico, un mapa de posibilidades. ¿Qué podemos hacer con esto? Muchos historiadores evitan discutir lo que podría haber ocurrido, se niegan a hacer lo que llaman "historias contrafactuales", o virtuales. La tarea del historiador, dicen, es interpretar lo que ha ocurrido, no elaborar relatos sobre lo que pudo ser pero no fue. El filósofo Michael Oakeshott ha señalado, por ejemplo, el absurdo de atribuir la difusión del cristianismo al hecho de que san Pablo escapara de Damasco, como parece obligado desde el momento en que nos preguntamos qué habría ocurrido si hubieran atrapado a san Pablo. "Cuando se examinan los acontecimientos de esta manera —dice Oakeshott—, dejan de ser sucesos históricos. El resultado no sólo se convierte en mala o dudosa historia, sino que supone el rechazo total de la historia".⁹

En su libro *Historia virtual*, el historiador británico Niall Ferguson defiende a la historia contrafactual de tales críticas. Algunos historiadores han sostenido que el pasado es un árbol que se ramifica constantemente, "una infinitud de Pasados, todos igualmente válidos",¹⁰ en palabras de André Maurois —como el jardín de senderos que se bifurcan de Borges—. Puede ser verdad, dirán los adversarios, pero una vez que se ha hecho una elección, las demás ramas dejan de crecer y no podemos decir nada más de ellas.

Algunos historiadores defienden una visión determinista que desecha el papel de la suerte en el curso de los acontecimientos. Los deterministas modernos se inclinan con frecuencia por el marxismo, con su tendencia a invocar la inevitabilidad de los asuntos humanos. Ellos y otros

materialistas históricos continúan los pasos de Kant y Comte, que consideraban que la historia seguía leyes análogas a las que gobiernan las ciencias naturales y, por lo tanto, se oponen en general a los escenarios contrafactuales sobre la base de que las leyes, no la voluble fortuna, los destierran. Podría parecer extraño emplear analogías de la física para argumentar en favor de la historia contrafactual. Pero la física a la que aquí me refiero es estadística, y se ocupa no sólo en saber cómo una cosa llevó a la otra, como una sucesión de bolas de billar que chocan, sino de la amplia gama de posibilidades y de la probabilidad de cada una de ellas.

El modelo paisajístico promete algo más concreto que fantasías históricas. No sólo puede ofrecer una racionalización objetiva del curso de los acontecimientos, sino que, potencialmente, puede cartografiar el terreno. Esto puede contribuir a que los historiadores contrafactuales limiten sus discusiones al reino de lo posible y no sucumban a la vana especulación. Da forma concreta a un abanico de influencias que, como todo historiador sabe, debe dar forma al curso de los acontecimientos reales. Como ha afirmado el historiador Hugh Trevor-Roper, “la historia no es sólo lo que ocurrió, es lo que ocurrió en el contexto de lo que podría haber ocurrido”.¹¹

Si aceptamos que los éxitos de la teoría paisajística no son pura casualidad, hemos de aceptar también que el paisaje que nos proporcionan esos éxitos puede servirnos para extraer consecuencias más generales. Podemos hablar en términos cuantitativos de los mundos que podrían haber sido e identificar los factores que contribuyeron a que las cosas sucedieran de este o de aquel modo. La posibilidad de hacer esto, dice Ferguson, puede dar validez a la historia contrafactual como modo de comprender el pasado. Debe preocuparnos, dice, no lo que *pudo* ocurrir, sino lo que era más probable que ocurriera, “las posibilidades que más probables parecían en el pasado”.

Si estrechamos las alternativas históricas, consideramos las más *plausibles* y sustituimos el enigma del “azar” por el cálculo de probabilidades, resolvemos el dilema de elegir entre un pasado determinista y un número infinito e inmanejable de pasados posibles.¹²

Ferguson parece sugerir que esos “cálculos” dependen sobre todo del buen juicio del historiador. Los escenarios contrafactuales, afirma, tam-

bién deben estar al corriente de “esas alternativas que se pueden considerar sobre la base de evidencias históricas que, en la época, también llegaron a tenerse en cuenta”¹³ (como el ataque británico a la Unión Soviética en los años treinta). De acuerdo, pero, ¿cómo asignar valores cuantitativos a esas alternativas? La teoría paisajística nos dice que, en el caso particular de la formación de alianzas, es posible hacer un cálculo real que arroja cifras cuyos valores, aunque son aproximativos (¿cómo no iban a serlo?), tienen cierto grado de validez.

EL FILO DE LA HISTORIA

Según el modelo paisajístico, a finales de los años treinta y a medida que se aproximaba la guerra, el terreno político europeo se dividió en dos reinos de posibilidad: uno en el que las naciones democráticas más fuertes se unían contra Alemania, otro en el que luchaban contra la Unión Soviética. Que uno llegara a concretarse y el otro no, se debe a las condiciones a partir de las cuales la historia empezó su “paseo por las colinas”. Por supuesto, este punto de partida se origina en la historia anterior del siglo xx, que a su vez dependió de los conflictos de la era victoriana. En cierto sentido, esto no es más que la afirmación banal de que el presente depende del pasado, salvo que con la teoría paisajística podemos imaginar que la historia ocurrió en forma de paisaje que fluctúa.

Como hemos visto, el modelo de Ising de un material ferromagnético o un fluido de muchas partículas también tendrían un paisaje de valles gemelos que se correspondería con configuraciones estables de estados con los spins hacia abajo o hacia arriba, o de estados líquido y gaseoso. Que prevalezca un estado u otro depende de cuál tenga menor energía en las condiciones existentes. Con la temperatura de ebullición o de condensación de un fluido, los *valles* líquidos y gaseosos son igualmente profundos y puede haber transición de uno a otro. Esto se corresponde con exactitud con la descripción de Van der Waals; que le demos forma de paisaje no es más que otra manera de considerarlo.

De ahí se deduce que algo parecido a una transición de fase es posible entre valles que reflejan la energía de distintas alianzas; que es posible, si dos valles tienen la misma profundidad, pasar de uno a otro, de

una configuración de alianza a otra totalmente distinta. De igual modo que, cerca de un cambio de transición gas-líquido, un pequeño cambio de presión o de temperatura puede suponer una profunda alteración en el estado de todo el sistema, pequeños cambios en las actitudes o en las circunstancias políticas pueden alterar significativamente la posición de los jugadores si dos valles “de energías” alternativos equivalen en profundidad. Por lo tanto, es importante saber no sólo qué valle es el más profundo (puesto que ése es el que se corresponde con el resultado previsto de “firma de pactos”), sino si cerca hay valles que son casi tan profundos como ése, en cuyo caso las alianzas pueden estar destinadas a cambiar bruscamente a una configuración muy distinta.

En un fluido con partículas en interacción, alterar la presión mientras la temperatura se mantiene constante modifica el paisaje de energías para alterar las profundidades relativas de los valles de *líquido* y de *gas*. En el punto de transición esas profundidades son iguales. Con una presión ligeramente más alta, el líquido se hace más estable que el gas: el gas tiene una configuración *metaestable* (véase la página 193). En el mismo sentido, la alianza anti-soviética era metaestable en 1936. Antes vimos que los estados metaestables se pueden dar si el sistema está debidamente preparado, incluso a pesar de que corran constantemente el riesgo de *caer* a un estado todavía más estable. Pero si continuamos aumentando la presión, el estado metaestable del gas se hace todavía menos estable que el estado líquido. El valle no sólo se eleva, sino que se hace menos profundo. En algún punto el pozo metaestable desaparece: una configuración gaseosa ya no es posible, ni siquiera en la teoría. A esto se le llama *punto espinodal* y representa el límite de la metaestabilidad (véase figura 12.5a).

En el modelo paisajístico de Robert Axelrod, alterar la “presión” podría equivaler a cambiar las actitudes o los “tamaños” de los distintos agentes, esto es, a cambios en la intensidad de las fuerzas de atracción y repulsión que hay entre ellos. Hemos visto que tales cambios alteran el paisaje histórico entre 1936 y 1939, que pasa de tener dos valles –que reflejan un estado estable– a tener uno solo. Esto implica la existencia de una especie de punto espinodal histórico: un conjunto de circunstancias en el que la alianza menos estable deja de ser viable. Entre 1937 y 1938, el paisaje político pasó, al menos eso parece, por ese punto (véase figura 12.5b). Después, cualquier guerra supondría la formación de las coaliciones del Eje y de los Aliados.

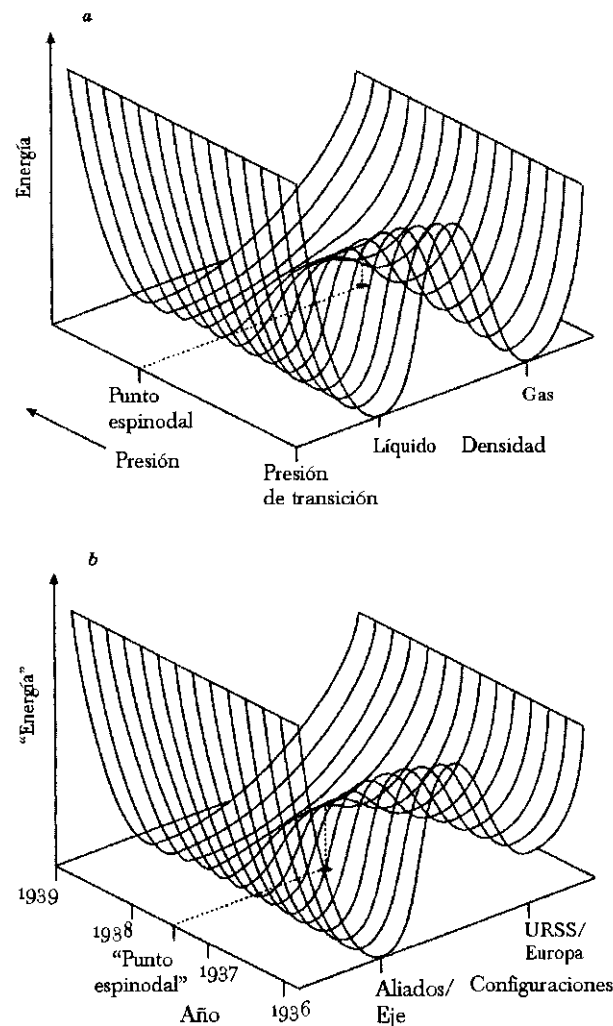


Figura 12.5. (a) En un punto espinodal, la menos estable de las dos configuraciones posibles de un fluido (el estado metaestable) se desvanece. (b) Algo análogo ocurre en el modelo paisajístico de alianzas nacionales entre 1936 y 1939: la historia parece pasar a través de una especie de punto espinodal donde la alianza antisoviética deja de ser viable.

No es difícil encontrar en la actualidad escenarios políticos con los que probar la teoría paisajística. En realidad, Robert Axelrod y sus compañeros la han utilizado retrospectivamente para *predecir* que, dados el equilibrio de poder y las relaciones internacionales en 1989, justo después de la unificación alemana, la defección de los aliados europeos de la Unión Soviética estaba escrita. Predijeron que sólo Bulgaria permanecería en el antiguo Pacto de Varsovia, al tiempo que los demás se alinearían con la OTAN. Cuando la Unión Soviética empezó a desintegrarse, sólo Rumania contradijo la predicción. Otros han aplicado el modelo paisajístico a la desaparición de la antigua Yugoslavia a principios de la década de 1990.

Mirar atrás está muy bien, pero el modelo podría tener mucho más valor para mirar hacia delante. ¿Qué puede decirnos de las futuras relaciones en el inestable Oriente Próximo, donde, por ejemplo, Israel, Siria, Irán y Jordania están inmersos en una antipatía mutua y frustrante? ¿Podrían la afinidad religiosa y el temor a la injerencia de Occidente saldarse con la creación de una alianza de estados islámicos? ¿Dónde quedaría entonces Turquía? ¿Cómo se ve afectado este escenario por la nueva situación política (y anárquica) de Irak?

No es ni probable ni deseable que nadie decida la política internacional sobre la base de un único y, afrontémoslo, simple modelo. Pero parecen existir muchas razones para creer que ese enfoque podría ayudarnos a prever la situación general. Podría incluso contribuir a identificar los mejores puntos de apoyo para urdir alianzas favorables y evitar conflictos, aunque ése es un reto de otro orden: lamentablemente, la mayoría de las alianzas internacionales se forjan en las intermediaciones de las guerras o cuando se está enfrascado en ellas, no con el fin de evitarlas.

Hay incontables oportunidades para explorar los factores que afectan al surgimiento de grupos, coaliciones y organizaciones en muchas áreas de la sociedad. Sería valioso saber si características como la raza, la clase social, la religión y la ideología permiten predecir qué grupos sociales pueden surgir (tanto los pequeños, como los círculos de amistades en una oficina, y los grandes, como los grupos y las comunidades nacionales). Por ejemplo, ¿cuáles de esas características tienden a dominar el proceso de agregación? Sin duda, en el seno de las organizaciones contribuiría a saber cuál es la mejor forma de subdividir a sus empleados. No siempre está claro, por ejemplo, a qué facultad universitaria hay que

asignar a un departamento en particular (¿es la geología una disciplina técnica o de las ciencias naturales?). Si se cuenta con algún medio para determinar cuál es el resultado *más natural*, esos dilemas se podrían resolver con mayor confianza.

El hecho de que se pueda hablar de estas cuestiones en la misma respiración en la que nos preguntamos acerca del destino de las naciones es un indicio de que algún principio fundamental debe regir todo esto. Que un mismo modelo prediga con éxito las alianzas de unas empresas informáticas y las que se formaron en las intermediaciones de una guerra global nos sugiere que hemos ido un poco más allá de la perspectiva compartimentada y casuística de una gran parte de las ciencias sociales y la ciencia política tradicionales y dado con una veta más profunda en el orden de las cosas.

XIII
MULTITUDES EN EL VALLE DE LA DECISIÓN
LA INFLUENCIA COLECTIVA Y EL CAMBIO SOCIAL

Sólo en un sentido muy limitado crea el individuo por sí mismo la forma de hablar y de pensar que le atribuimos. Habla la lengua de su grupo, piensa como piensa su grupo.

KARL MANNHEIM (1936)¹

Cuando he tomado el café esta mañana y he subido para vestirme y marcharme a trabajar, no se me ha pasado por la cabeza estar todo el día desnudo. Cuando he cogido mi coche para ir a la oficina, no se me ha ocurrido circular por la izquierda. Y cuando he bajado al restaurante con mis compañeros, no he pensado en comer con las manos; sin pensarlo, he cogido un tenedor.

JOSHUA EPSTEIN (1999)²

Observar detenidamente comportamientos complejos como fumar o el suicidio o el asesinato es darse cuenta de hasta qué punto somos influenciados por lo que vemos y oímos y lo agudamente sensibles que somos hasta con los detalles más insignificantes de la vida cotidiana. Ésa es la razón de que el cambio social sea tan voluble y a menudo inexplicable.

MALCOLM GLADWELL (2000)³

Quizás el mejor artículo sobre las elecciones presidenciales estadounidenses de finales de 2000 haya que buscarlo en la revista satírica *The Onion*, "La fuente de noticias más fina de Estados Unidos":

En una de las votaciones presidenciales más estrechas de la historia estadounidense, George W. Bush o Al Gore fue elegido 43^o presidente de Estados Unidos el martes y proclamó que logró “una victoria para el pueblo estadounidense y el alba de una nueva y audaz era para esta gran nación”.

“Compatriotas –dijo en el cuartel general de su campaña un triunfante Bush o Gore a una multitud de jubilados partidarios que no dejaban de agitar sus banderas–, esta noche, nosotros como nación estamos a punto de hacer frente a muchos y emocionantes retos. Y yo estoy aquí ante vosotros para deciros que estoy preparado para abordar esos retos.

“El pueblo ha hablado –prosiguió Bush o Gore– y con su voto ha lanzado un mensaje alto y claro, que nosotros somos el auténtico partido del pueblo”.

Con estas palabras, la multitud de republicanos o demócratas estalló en vítores y aplausos.⁴

No hay más farsa en esto que en lo que luego sucedería, porque el hombre que más tarde conduciría a Estados Unidos a dos guerras (y contando) debe su lugar en la Casa Blanca no a la Constitución de la nación o a una mayoría de votos populares, sino a una disputa legal. Mientras los medios lidiaban con el hasta entonces desconocido concepto de “redondelito colgante” (el que queda cuando se perforan mal las tristemente famosas “papeletas con forma de mariposa”, además de plagadas de errores, del estado de Florida), el Tribunal Supremo de ese Estado ordenó el recuento de los votos decisivos. Al invalidar esta decisión por un solo voto, el Tribunal Supremo de Estados Unidos decidió quién habría de liderar el país.

En diciembre de 2000, la preciada democracia estadounidense cayó presa de la variabilidad estadística. Si bien es cierto que algunos métodos de emisión y recuento de votos son evidentemente mejores que otros, todos incurrir en inevitables incertidumbres estadísticas. Los resultados de las elecciones de 2000 fueron tan estrechos que, sencillamente, esas incertidumbres no eran despreciables. Cuando la presidencia depende de un centenar de votos, no hay forma de saber si conseguirla no depende de un importante factor arbitrario. Atrapados en el margen de error, cualquier resultado es posible.

Se supone que la democracia consiste en elegir. La elección Bush/Gore puso de relieve hasta qué extremo depende de las contingencias la expresión de ese elegir (por ejemplo, de la claridad con que el votante marca el voto que luego deposita en la urna y la forma de resolver las ambigüedades), pero, por lo menos, los principios están claros. Todo buen votante participa en la elección de sus dirigentes y ningún voto cuenta más que otro. En la práctica, por supuesto, el poder de cada votante depende considerablemente de la forma en que están definidos los distritos electorales y de cómo se cuentan los votos; pero la imagen popular de un proceso democrático es la de millones de papeletas acumulándose en dos (o más) montones hasta que el candidato del montón más alto gana.

Sin embargo y dejando los tecnicismos del proceso de votaciones aparte, no es tan sencillo. Por una parte, ni el más ardiente defensor del individualismo podría afirmar razonablemente que nuestras decisiones son verdaderamente independientes. ¿Cómo, en una sociedad saturada de publicidad en masa, podemos pensar en tomar decisiones libres de las influencias del entorno? Hoy en día esto se aplica tanto a la política como a los detergentes. En la campaña electoral de 1999-2000, republicanos y demócratas gastaron trescientos millones de dólares entre ambos, más que el presupuesto de marketing de muchas empresas multinacionales.

Pocas piedras quedan por remover en los estudios acerca de nuestra forma de decidir porque, al fin y al cabo, nuestras instituciones políticas dependen de ello. Y sin embargo, sobre esta cuestión no hay consenso, y mucho menos sobre si hay métodos de predicción fiables. A causa de las encuestas de opinión, los votantes británicos llegaron a creer que el resultado de las elecciones generales de 1992 sería muy ajustado, que el candidato laborista, Neil Kinnock, podría acabar por estrecho margen con el reinado de trece años de los conservadores. Finalmente, no hubo *photo finish*: para descrédito de las encuestas, el Partido Conservador obtuvo una holgada mayoría.

El negocio del pronóstico electoral tiene un nombre: análisis electoral. Detrás de este respetable concepto se oculta un arte oscuro, comparado con el cual la teoría económica parece una ciencia de precisión infalible. Esto no tiene por qué ser culpa de los analistas, que se enfrentan a la naturaleza humana en una de sus facetas más escurridizas.

La gente manifiesta una intención de voto y luego, el día de las votaciones, cambia de opinión. Los cambios sustanciales en las filias de los votantes pueden venir impulsados por acontecimientos de última hora, como el discurso de uno de los candidatos. Las cuestiones más simples y a veces triviales pueden movilizar a una gran parte de la opinión pública.

Ante tanta volubilidad psicológica, ¿cabe esperar que los modelos de comportamiento social revelen algo útil acerca del proceso de decisión política que caracteriza a toda sociedad con algún grado de democracia? En el mundo de la empresa se corren riesgos, pero las decisiones no se toman a la ligera; las penalizaciones económicas, legales y sanitarias recortan la posibilidad de que los conductores tomen decisiones irresponsables; pero algunos votantes eligen a su presidente porque les gusta su corte de pelo. ¿Puede la ciencia abordar *eso*?

Lo que la física puede aportar a las ciencias sociales con respecto a la toma de decisiones no es una teoría concreta y precisa, sino una comprensión más profunda de un ingrediente que ha sido frecuentemente ignorado o gestionado con gran torpeza. Se trata de un ingrediente que ya conocemos: el efecto que una persona tiene sobre otra, la influencia de la interacción. Uno de los rasgos del comportamiento colectivo que surge de las interacciones locales es que se hace imposible deducir el estado global de un sistema con tan sólo inspeccionar las características de sus componentes a nivel individual. Es el mensaje más importante que la ciencia física puede aportar a las ciencias sociales: no caigas en la tentación de extrapolar de la psicología del individuo el comportamiento del grupo.

A lo largo del siglo XX, los sociólogos han hecho hincapié en que sus estudios han de concentrarse no en el individuo, sino en el grupo. Y sin embargo, con frecuencia han sido capaces de hacer poco más que incrustar sus temas dentro de un conjunto preexistente de normas culturales: el comportamiento grupal se postula a priori. En vez de ello, podemos empezar a examinar de qué forma, a través de la interacción de la elección personal y del intercambio interpersonal, esas normas surgen y cambian. Podemos empezar a comprender cómo crea una sociedad a sus dirigentes, sus costumbres, sus modas y sus problemas por medio de una masa de decisiones interdependientes.

VAYA A VOTAR

Uno de los temas que ha destacado el desastre electoral de Estados Unidos es el absurdo de discutir acerca de unos cientos de votos en unos comicios en los que más de la mitad del peso electoral permaneció en silencio. Y eso no es lo peor: normalmente, los ediles de los ayuntamientos y condados estadounidenses salen elegidos con los votos de menos del veinte por ciento del electorado.

Brasil no permite tanta apatía. Votar es obligatorio. En octubre de 1998, más de cien millones de votantes eligieron a su presidente y a los miembros de su Senado y Parlamento. (La estructura política del país está inspirada básicamente en la estadounidense.) Además, los votantes escogen a un gobernador y a la cámara de representantes de todas las regiones del país. El físico Raimundo Costa Filho y sus compañeros de la Universidad Federal de Ceará analizaron los resultados electorales. Puesto que los representantes estatales conforman el mayor grupo de candidatos, Costa Filho y sus compañeros se limitaron a estudiar las estadísticas de voto para la elección de los 10.535 representantes locales, concentrándose en la proporción de votos con respecto al total que cada candidato había obtenido.

¿Qué cabía esperar de un ejercicio como éste? Si votar fuera un proceso puramente aleatorio —esto es, si el voto de cada elector estuviera determinado, por ejemplo, por la tirada de un dado—, se obtendría una distribución gaussiana. Es decir, la mayoría de los candidatos recibirían un porcentaje promedio de votos, algunos recibirían algunos menos y otros algunos más. La distribución de probabilidades —el número de candidatos que recibiera una proporción p de votos en relación con una coordenada p — sería campaniforme. Por supuesto, la inmensa mayoría de los votantes no escogen a quien votan tirando unos dados. Pero podríamos imaginar que los factores que determinan el voto son tantos y tan diversos que el resultado final, cuando el censo es muy grande, no se diferencia del que saldría si los votantes escogieran al azar.

Pero los investigadores no vieron una distribución gaussiana. En vez de ello, observaron que las estadísticas de voto se correspondían con una ley de potencias (véase figura 13.1). Y lo que es más, esta ley de potencias en particular parecía tener un exponente cercano a -1, como la de la criticalidad autoorganizada (página 282), lo cual significa que el número

de candidatos que recibe una fracción p de los votos es inversamente proporcional a p . La misma relación de ley de potencias aparecía en un análisis de las tendencias de voto por provincias –que parecen reproducirse fidedignamente en subgrupos del conjunto del electorado.

Esto nos revela que el proceso de voto no consiste en millones de decisiones independientes que se toman básicamente al azar.* Como ya hemos visto, las leyes de potencias suelen ser la señal de identidad de algunos procesos gobernados por fuertes interacciones entre los agentes “de decisión” del sistema. En el punto crítico de un imán, una distribución de ley de potencias de los tamaños de islas de spins atómicos de orientación contrapuesta surge de la influencia de cada spin sobre sus vecinos. En un hipotético montón de arena, cada grano *escoge* si participa en una avalancha basándose en sus interacciones (por medio de colisiones y de la fricción) con otros granos. Así pues, cabe sospechar que la ley de potencias de las estadísticas de voto nos revela que los votantes están influidos por las decisiones de otros.

Esto es lo que Américo Tristão Bernardes y sus compañeros de la Universidad Federal de Ouro Preto creían cuando se propusieron explicar las observaciones de Costa Filho y de su equipo. Anteriormente, Bernardes y otros investigadores ya habían diseñado un modelo de voto en el que todos los electores influyen en la opinión de sus vecinos. Al electorado se le representa sobre una especie de retícula de spins en lugar de como un imán del modelo de Ising. Cada punto de la retícula representa a un votante y *su spin* puede apuntar en tantas direcciones como opciones electorales existan. De igual modo que existe una fuerza que tiende a alinear los spins de los átomos magnéticos, la influencia social puede alinear las opiniones de los votantes más próximos. Pero Américo Bernardes y sus compañeros dicen que esto ocurre sólo cuando hay consenso suficiente, esto es, cuando existe una *masa crítica* de opinión. Individualmente, los votantes no pueden persuadir a sus vecinos para que voten lo que ellos, pero un cúmulo de varias personas de ideas

* Las conclusiones que extraigo aquí de no aleatoriedad de los votos a causa de la interdependencia de la elección de cada votante no son del todo ciertas. Costa Filho y sus compañeros señalaron que, en ciertas condiciones, una concatenación de decisiones aleatorias e independientes de cada votante puede dar paso a un comportamiento que parece, dentro de ciertos parámetros, corresponderse con una ley de potencias. Esto hace hincapié en el hecho de que cualquier conjunto de datos es en realidad insuficiente para que podamos identificar excepcionalmente el mecanismo que lo produce.

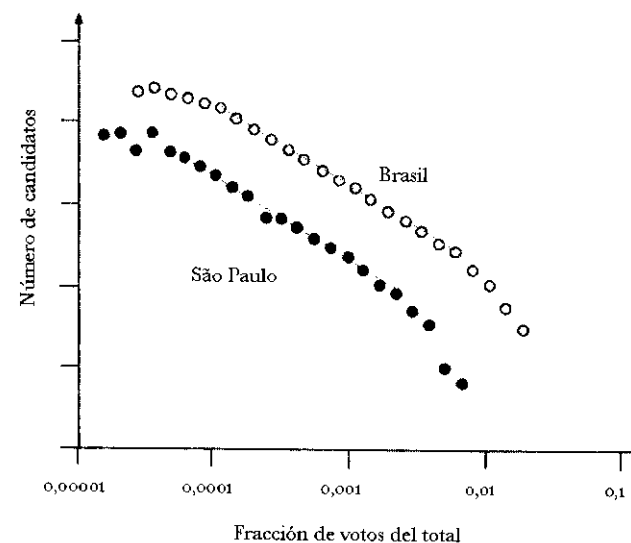


Figura 13.1. Estadísticas de voto de las elecciones brasileñas de 1998. La cifra de candidatos que reunió diversas fracciones de los votos totales se corresponde con una ley de potencias. Los círculos negros representan los resultados en São Paulo y los blancos los del conjunto del país. Ambas líneas son casi rectas y tienen una pendiente casi igual.

parecidas sí puede hacerlo. Cuando Bernardes y sus compañeros recurrieron a una simulación por ordenador de este modelo de voto, los investigadores se dieron cuenta de que de ella resultaba una distribución de votos entre los muchos candidatos que se correspondía con precisión con la ley de potencias de los resultados reales de las elecciones: incluso la pendiente del gráfico de la ley de potencias era la misma.* Al parecer, votar es, en gran parte, una decisión colectiva.

* Para obtener la pendiente correcta, sin embargo, Bernardes y su equipo tuvieron que establecer una particular “capacidad de persuasión” para cada candidato, esto es, en qué medida la capacidad de los votantes para convencer a sus vecinos dependía de a qué candidato votaban. Pero pudieron suprimir esta presunción dentro del modelo cuando representaron la red de interacciones sociales no como una retícula, sino en forma de árbol “fuera de escala” –fórmula que veremos en el capítulo XVI–, lo cual parece corresponderse mejor con una descripción de las interconexiones sociales reales. En este caso, el modelo concordaba con las estadísticas reales de voto sin que los investigadores tuvieran que asignar ninguna capacidad de convicción a cada candidato.

Por supuesto, no es nueva la idea de que nuestros amigos, compañeros y vecinos influyen en nosotros. Como la mayoría de la gente, he pasado mis vacaciones en lugares que me habían recomendado mis amigos y he ido a ver películas y obras de teatro que a ellos les habían gustado. Ni siquiera hace falta conocer a otras personas para sentir una influencia mutua. Es dudoso, por ejemplo, que los alimentos orgánicos se hayan hecho tan populares porque una fracción importante de la población haya decidido, de forma independiente, que los prefiere a los edulcorados. (Hay una retribución positiva adicional en esto, puesto que, como dice la ley de la oferta y la demanda, los precios bajan cuando el número de compradores aumenta, lo que hace que los alimentos orgánicos resulten más atractivos que otros más marginales.) No hay motivo para esperar que nuestra elección política sea ajena a influencias como las que en este caso se han puesto en juego.

Por otro lado, la idea encaja mal con nuestro sentido de democracia y libertad de elección. Es posible que no sepamos qué son exactamente unas elecciones democráticas, pero no parece que sean la suma de muchos millones de votos totalmente independientes. La interdependencia de las decisiones de los votantes significa que no es fácil predecir cómo reaccionará la opinión pública ante determinados alicientes o acontecimientos particulares. Por ejemplo, sobran razones para sospechar que los pequeños desequilibrios en la difusión de la imagen de los candidatos (que normalmente se deben a las diferencias de presupuesto de la campaña electoral) pueden no corresponderse con las pequeñas diferencias en la decisión de los votantes. Tengo la firme sospecha de que, al menos en parte, el resultado de las elecciones que tuvieron lugar en el Reino Unido en 1992 fue consecuencia del mismo comportamiento gregario colectivo que se da en los mercados financieros (página 256). Es posible que los votantes se confesaran los unos a los otros que, en realidad, el laborista Neil Kinnock no les inspiraba ninguna confianza o que, sencillamente, pensaran que ésa era la sensación que prevalecía en el conjunto de la nación, pero lo cierto es que la enorme diferencia entre los pronósticos de las encuestas y los resultados no parece que se deba a una coincidencia de muchas decisiones independientes y aleatorias.*

* Sin duda, también el alarmismo concertado de la prensa de derechas desempeñó un papel importante, pero tal vez sólo a la hora de inclinar el paisaje político para favorecer el gregarismo en una sola dirección.

Algunos politólogos han estudiado un modelo de campaña electoral que se asemeja a los modelos que se emplean en física. Es una especie de modelo paisajístico, afín al que desarrolló Robert Axelrod (véase el capítulo anterior), en el que, entre varios partidos políticos, los votantes dan su confianza a uno de ellos. La topografía del paisaje es definida por las preferencias de los votantes dentro de un amplio abanico de asuntos, y los partidos políticos recorren ese paisaje en busca de una cima atractiva en la que plantar su bandera, es decir, se esfuerzan por conquistar una posición dominante acerca de los asuntos más candentes. Por lo tanto, los partidos pretenden confeccionar su política para atraer tantos votos como sea posible, si bien están condicionados al mismo tiempo por las diversas posiciones del espectro de opiniones del que partieron.

Este modelo, el llamado "modelo espacial", fue desarrollado en los años cincuenta por los politólogos Anthony Downs y Duncan Black, que lo adaptaron de un modelo similar referido al proceso de decisión en las empresas. La idea central, que pretende analizar la toma de decisiones de acuerdo a parámetros cuantitativos, *científicos*, consiste en que todos los votantes adopten una posición particular dentro de un espectro de puntos de vista sobre cada cuestión. Es decir, si representásemos el abanico de opiniones posibles con una línea entre dos posiciones extremas, cada uno de los votantes ocuparía una posición sobre esa línea.

Lo cierto es que normalmente pensamos en las opiniones políticas en términos espaciales. Hablamos de puntos de vista que están a la izquierda, a la derecha, o en el centro del espectro político. Esta terminología se deriva de una división espacial real, la de la Asamblea Nacional (más tarde, Convención Nacional) de la República Francesa justo después de la Revolución. La Asamblea estaba dividida en dos bandos principales: los jacobinos, partidarios de Robespierre y defensores de un cambio político y social radical; y los girondinos, más poderosos, que apostaban por preservar el *status quo*. Ambos grupos se sentaban en el parlamento francés tan separados como podían: los jacobinos a la izquierda de la entrada de la cámara, los girondinos a la derecha. Los de opiniones más moderadas se sentaban entre ambos. Desde entonces, la izquierda política ha estado asociada al cambio, y la derecha al conservadurismo.

Pero las facciones políticas rara vez se pueden dividir con claridad en referencia a un solo eje. En las elecciones se dirime un conjunto de cuestiones, muchas de las cuales pueden abordarse desde dos puntos de

vista incompatibles y extremos. El modelo espacial de estudio de las votaciones amplía la imagen unidimensional de la izquierda y la derecha políticas y hace que, para cada asunto importante, exista un eje de opinión. En este modelo, cada votante puede situarse en algún lugar de esos ejes. En otras palabras, el *espacio* político tiene tantas dimensiones como asuntos importantes y, sobre ese espacio, cada votante puede estar representado por un punto que marque su posición –su postura– con respecto a cada uno de ellos.

Ésta es, por supuesto, una manera muy rudimentaria de abordar la forma en que la gente define su postura en política. Por lo pronto, no todo el mundo tiene bien articulada su opinión acerca de los asuntos que se tratan durante la campaña electoral. Ahora bien, sí puede esperarse que el enfoque capte algunas características básicas del proceso de elección. Ciertamente, parece acertado sugerir que los partidos políticos tratan de calibrar la forma del paisaje de la opinión pública y de adoptar políticas que, en su opinión, atraerán al mayor número de votantes. Con esto no se quiere sugerir que los políticos son tan cínicos que adoptan un punto de vista *cualquiera* con el fin de conseguir votos. En realidad, hay grandes zonas del paisaje características de una convicción o de otra (liberal o conservadora, por ejemplo) y límites que los políticos preferirían no traspasar. Pero es público y manifiesto que los partidos políticos intentan amoldarse a la opinión pública, un particular en el que abunda la reciente moda de los *focus groups*, o reuniones de grupo, a los que ya están recurriendo los partidos políticos. En muchos países europeos, los partidos de todas las ideologías han tenido que hacer ajustes de sus políticas con el fin de responder a la opinión pública en temas como la criminalidad y la inmigración, que, tradicionalmente, quedaban reservados para la derecha política.

El modelo espacial de estudio del voto se ha convertido en uno de los instrumentos básicos de la ciencia política, que trata de comprender el funcionamiento –y la quiebra– de la democracia. Se ha empleado, por ejemplo, para explorar los factores que impulsan la polarización o la convergencia de las posturas políticas, o para contrastar las diferencias entre los sistemas bipartidista y multipartidista, o para investigar las consecuencias de las políticas monotemáticas. Uno de los hallazgos más sorprendentes es que, en unas elecciones democráticas, no hay un ganador *mejor* que otro. Se podría pensar que, en un sistema de vota-

ciones ideal, el ganador sería el partido cuya política más se acercara a las preferencias de la mayoría. Pero con frecuencia, es imposible determinar dónde se encuentra ese punto en el espacio de las opiniones. Aristóteles ya se dio cuenta. Incluso en el caso más simple, en el que la opinión pública puede representarse sobre un solo eje, pueden surgir problemas cuando la distribución de la opinión tiene más de un pico. Aristóteles imaginó una sociedad en la que habría dos circunscripciones electorales dominantes con preferencias muy distintas: los ricos y los pobres. ¿El dirigente político ideal es el que, en cada momento, adopta la política del grupo cuya voz más se hace oír? ¿O lo mejor es elegir un gobierno cuya política reside en el punto medio entre esas dos polaridades, es decir, una política que no responde totalmente a las preferencias de ninguno de los dos grupos? Aristóteles llegó a la conclusión de que una sociedad así nunca puede ser estable. Para lograr una auténtica estabilidad, lo mejor es contar con una gran “clase media” de opinión centrista.

En su innovador tratado sobre estadísticas de voto y elecciones públicas, el marqués de Condorcet (página 68), identificó otro de los problemas de la democracia. ¿Y si los perfiles de preferencias, se preguntó, ni siquiera tienen un solo pico para cada individuo? Si, por ejemplo, consideramos cuánto debería gastar el gobierno en servicios públicos, es probable que tengamos en mente una cifra aproximada y consideremos con suspicacia cualquier política que proponga incrementar o reducir el gasto por encima o por debajo de esa cifra. Pero en algunas situaciones, si no podemos tener exactamente lo que queremos, nuestra segunda opción puede ser totalmente distinta de la primera. Cuando en los años noventa se debatía en Estados Unidos la posibilidad de intervenir en los conflictos étnicos de la antigua Yugoslavia, algunos estadounidenses tenían la sensación de que su país debía, bien apostar por una intervención masiva que pusiera fin a la guerra definitivamente, bien abstenerse de intervenir. Cualquier solución intermedia –como una fuerza de paz en la que los soldados estadounidenses corrieran riesgos, pero no pudieran acabar con la guerra– se consideraba menos deseable que esos extremos. Veinte años antes, muchos habían opinado lo mismo sobre la guerra de Vietnam.

En esas condiciones, decía Condorcet, el gobierno de la mayoría –que seguramente sea la piedra angular de la democracia– puede no ser esta-

ble. Condorcet describió unas elecciones en las que todos los candidatos se enfrentan entre sí por turno e individualmente. En las teorías modernas del voto, al participante que bate a todos los demás (o por lo menos que empatía con ellos) en ese tipo de competiciones electorales individuales, se le llama "ganador de Condorcet". Se puede demostrar que, en algunas elecciones, el ganador de Condorcet no es necesariamente el que mejor refleja los puntos de vista del electorado. En realidad, hay casos en los que es muy posible que el *perdedor* de Condorcet (el candidato que pierde esos combates individuales) sea el mejor ganador absoluto.

El procedimiento de voto de Condorcet no es ni mucho menos la única alternativa al principio del simple gobierno de la mayoría. La llamada "teoría de la decisión" explora las consecuencias de los distintos planes de voto. Por ejemplo, a finales del siglo XVIII, el politólogo francés Jean Charles de Borda propuso que, en las elecciones a la Academia Francesa de Ciencias, los votantes puntuaran a los candidatos, de donde saldrían los *menos* preferibles. Cuanta mayor puntuación, más deseable el candidato. El ganador sería el candidato que acumulase más puntos de todos los votantes. Se trata de una forma de representación proporcional, pero queda lejos del ideal, porque el "ganador de Borda" puede depender de las puntuaciones de candidatos que nadie quiere.

Un sistema de voto ideal no estaría plagado por absurdos lógicos aparentes como éste. Los teóricos de la decisión buscan cierta coherencia lógica en los métodos de votación. Por ejemplo, el resultado debería ser *transitivo*: si el electorado prefiere al candidato A en lugar de al candidato B, y al candidato B por encima del candidato C, entonces también debería preferir al candidato A en lugar de al candidato C. Otra característica deseable es que el resultado no debería cambiar si la elección se simplifica: si A es el elegido entre A, B y C, entonces, A también debería ser el elegido entre A y B. Etcétera.

El problema es que ningún mecanismo de voto satisface todos los criterios lógicos que razonablemente se podrían exigir. Esto no es porque todavía no hayamos encontrado el sistema adecuado, sino porque no puede ser sencillamente. Esta conclusión tan chocante la demostró el economista Kenneth Arrow con su "teorema de la imposibilidad". Arrow sostuvo que todo proceso de decisión verdaderamente democrático debería estar dotado de un conjunto particular de rasgos lógicos y demostró

que el único mecanismo de elección colectiva que satisface estos requisitos y permite que un conjunto de preferencias (es decir, un candidato) sea escogido sin ambigüedad por encima de los demás es la dictadura: el gobierno de una sola persona. Evidentemente, ino se trata de un proceso colectivo! Al parecer, Arrow se sintió obligado a llegar, por caminos muy distintos, a la misma conclusión a la que había llegado Thomas Hobbes tres siglos antes.

La paradoja de Arrow implica que no hay alternativa perfecta a la dictadura. O aceptamos que el gobierno de la mayoría tiene algunas consecuencias no deseables (incluida la inestabilidad) o encontramos una alternativa al gobierno de la mayoría. La teoría ha explorado esas alternativas exhaustivamente, pero es muy difícil encontrar las que sean transparentes, justas e inmunes a la manipulación. En otras palabras, "democracia" es un concepto escurridizo. Los políticos y la opinión pública occidentales se niegan a admitir que este detalle crucial: no se adopta un sistema democrático de gobierno porque sea el más perfecto o, en un sentido vago, el más *justo*, sino porque, probablemente, sea el menos susceptible a la corrupción.

Todo esto, recordemos, surge de modelos en los que todos los votantes efectúan una elección *independiente*. Los análisis estadísticos de voto que los físicos han llevado a cabo, minan esta asunción tan simplificada y abren el camino de una democracia viable y equitativa aunque algo turbia. Ya lo dijo Otto von Bismarck en la Herrenhaus de Prusia en 1863: "La política no es una ciencia exacta".⁵

¿HACIA QUÉ LADO HAY QUE TORCER?

Joshua Epstein, de la Institución Brookings, señala que, si bien muchos psicólogos y sociólogos han estudiado el proceso de decisión, la sociedad prefiere, en general, evitar precisamente la toma de decisiones. Hay muchas normas sociales que existen simplemente para que no haya que pensar en otras opciones. Si todos los días tuviéramos que revisar cada detalle de nuestra apariencia, conducta y actividad, nunca acabaríamos nada.

Por ejemplo, los habitantes de todas las naciones han llegado al acuerdo de conducir o por la derecha, o por la izquierda de la

calzada.* Es un acuerdo que salvaguarda la ley, por supuesto. En general, sin embargo, las leyes se limitan a consagrar normas sociales preexistentes. En Gran Bretaña, por ejemplo, conducir por la izquierda puede ser un legado de la preferencia de cruzarse por la izquierda con cualquier jinete o coche de caballos que viniera en dirección contraria para así poder blandir mejor la espada —con la derecha— frente a un ataque repentino. En la Europa continental, por el contrario, los postillones (jinetes que guiaban, a lomos de uno de los caballos, la reata que tiraba de un carronato) iban montados en el caballo más atrasado y a la izquierda y, por lo tanto, preferían cruzarse mostrando su costado izquierdo (esto es, iban por la derecha del camino). Por supuesto, hoy en día estas convenciones evitan accidentes, pero también nos sirven para liberarnos de la necesidad de adivinar, cada vez que nos subimos al coche, por qué lado irán los demás conductores.

Esto no es más que puro sentido común, pero consideremos de qué modo el mismo tipo de convenciones que afectan a toda la colectividad se aplican a muchos aspectos poco importantes de nuestras vidas. En la Inglaterra barroca, por ejemplo, a nadie se le ocurría aparecer por la corte sin peluca; en los años veinte, sólo los maleducados y de mala reputación caminaban por las calles de Nueva York sin sombrero. No hay leyes (que yo tenga noticia) en contra de salir de compras en ropa interior o de estrechar la mano con la izquierda, pero a pocos de nosotros se nos ocurriría algo así. Epstein sugiere que estructuramos nuestra sociedad de forma que tengamos que pensar lo menos posible. Estamos obligados a tomar una decisión sólo cuando no hay convención social que la prescriba. Cuanto más firme la norma, menos tenemos que pensar en ella. Esta urgencia por adaptarse existe no sólo en la sociedad en su conjunto, sino en el seno de subgrupos particulares cuyas convenciones, por extrañas que sean para los extraños, son observadas sin pensar por los miembros del grupo.

Pocas normas sociales, si es que hay alguna, están consagradas por la naturaleza. Hay que aprenderlas. Por eso en la calle, los niños y los turis-

* ¡Ojo con las excepciones! Por ejemplo, en la Autoroute 20 que discurre al sur de Montreal, Canadá, hay un tramo de entre diez y veinte kilómetros en el que se debe circular por la izquierda. Otro ejemplo: alrededor de 1929 se emitió un decreto para que en el corto tramo de acceso al teatro Savoy de Londres, se circulara por la derecha a fin de que los taxis que hacían cola para dejar a sus clientes a las puertas del teatro no bloquearan el paso al hotel Savoy.

tas se tropiezan más con los viandantes (página 159), todavía no han aprendido por qué lado hay que cruzarse con quien viene en sentido contrario. Cuando las personas nos familiarizamos con las normas, dice Epstein, también aprendemos *cuánto* hay que pensar en nuestra forma de comportarnos. A no ser que hayamos nacido en el seno de la aristocracia, lo normal es que pensemos con esmero qué tenemos que ponernos si nos invitan al palacio real. Joshua Epstein sostiene que este proceso de aprendizaje supone fijarse en lo que los demás están haciendo. Si nos damos cuenta de que todos hacen lo mismo, es evidente que es lo que tenemos que hacer. Si su comportamiento varía, es posible que necesitemos observar más y a más gente antes de decidirnos por lo que parece “normal”. Pero, en cualquier caso, nuestro campo de observación es limitado: no podemos preguntar a todos los habitantes de Manhattan si pasear por el Lower East Side es seguro o cuánta propina hay que dar a los taxistas.

Para estudiar cómo surgen las normas en un sistema así, Joshua Epstein imagina una línea de agentes (individuos) colocados en círculo. Cada uno de esos agentes toma una decisión a partir de dos opciones (una decisión binaria) basándose en un censo de sus vecinos. Con el círculo lo que se pretende es reproducir cualquier situación social concreta. No es más que la disposición más sencilla posible: una línea o, como dirían los físicos, una configuración unidimensional. Unir la línea por los extremos evita anomalías precisamente en los extremos, donde de otro modo, los agentes tendrían menos vecinos.

En este modelo, las decisiones individuales se toman siguiendo normas muy sencillas. La filosofía subyacente es que los agentes quieren pensar lo menos posible: quieren adaptarse, cumplir la norma, pero con el menor esfuerzo. Por eso buscan la muestra de estudio más pequeña posible, siempre y cuando les enseñe lo que tienen que hacer. Todos los agentes revisan y actualizan su decisión después de cada *ronda*. Esa decisión se suma a las de los vecinos que tiene a cada lado hasta cierta distancia y se adapta a la de la mayoría. Luego comprueba la decisión ampliando la muestra de estudio con un agente más en cada dirección para ver si le devuelven la misma recomendación. Si no es así, el agente concluye que la primera muestra no era representativa y continúa ampliando su campo de visión hasta que el consenso que obtiene dentro de una muestra coincide con el que obtiene en la siguiente muestra más amplia.

Puesto que los agentes son perezosos, buscan la forma de reducir el tamaño de las muestras. En cuanto perciben que hay consenso, miran a ver si consiguen el mismo consenso a partir de una ligera contracción de su campo de visión. Si lo hay, lo vuelven a contraer y lo siguen haciendo hasta que la muestra es lo más reducida posible, es decir, siga reflejando el punto de vista del “ancho mundo”. En palabras de Epstein, la idea es la siguiente: “Cuando vayas a Roma, haz lo que hacen la mayoría de los romanos, pero que la definición de Roma sea lo más pequeña posible”.⁶ Cuando una norma en particular abarca una gran parte del círculo, los agentes se convierten en personas “de mente estrecha”: sólo se fijan en quien está a su lado. Podría decirse que dejan de pensar en nuevas decisiones.

Epstein se ha percatado de que, cuando las preferencias iniciales se asignan aleatoriamente a un gran número de agentes dispuestos en círculo, ese círculo se segmenta rápidamente en zonas en las que prevalece una u otra preferencia. Es lo que muestra la figura 13.2a, donde ambas preferencias vienen marcadas en blanco y gris. Para que sea más sencillo ver los resultados, en este caso, el círculo está aquí estirado y aparece como una línea horizontal, cuyos cambios sucesivos se presentan de arriba abajo. Las franjas verticales indican las zonas del círculo en las que las preferencias de los agentes permanecen fijas con el paso del tiempo. En la figura 13.2b, una escala de grises denota las correspondientes “amplitudes de búsqueda” de los agentes. Lejos de los límites de esas zonas, *pensar* se contrae cada vez más.

Si este sistema recibe una *sacudida* con la introducción de un elemento aleatorio (ruido) en la toma de decisiones, de manera que todos los agentes tomen sus decisiones de forma puramente aleatoria durante una ronda, el círculo se estabiliza en una nueva configuración (véase figura 13.3). Podríamos imaginar que una nueva revelación ha sacudido momentáneamente las preconcepciones de los agentes, obligándoles a reconsiderar sus posturas. En cierto sentido, el resultado no puede sorprendernos, pero sí es un valioso recordatorio de la veleidad de la naturaleza humana: algunas personas que están sin pensar en la zona *gris* antes de la sacudida acaban, también *sin pensar*, en el bando *blanco*. Epstein sospecha que muchas normas y creencias sociales se determinan de este modo. ¿Quién dudaría de que muchos de los que en los años sesenta se opusieron furiosamente a la moda masculina del pelo largo se habrían opuesto

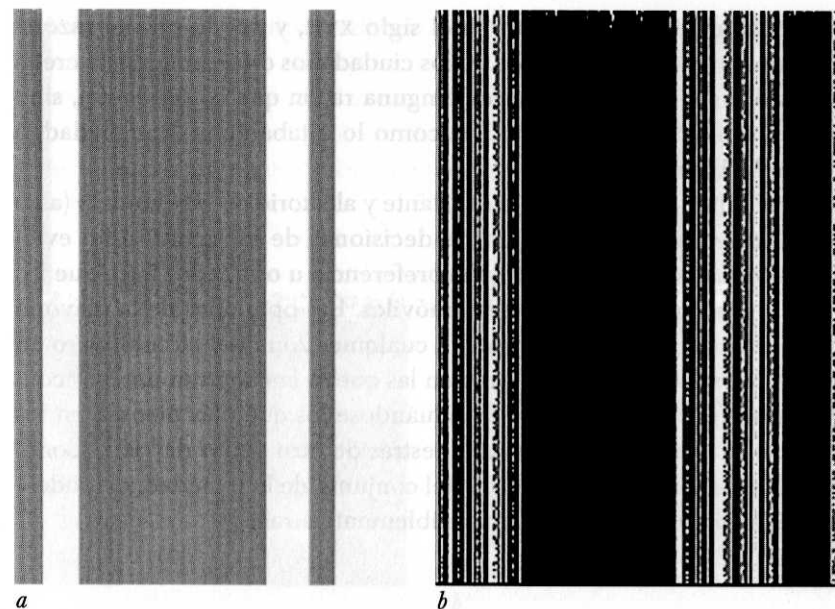


Figura 13.2. La conformidad a una norma elimina la necesidad de pensar demasiado en las decisiones. De acuerdo con el modelo de Joshua Epstein, los agentes, situados en un círculo, consultan con sus vecinos de ambos lados hasta cierta distancia, con el fin de escoger entre dos cursos de acción: por ejemplo, si hacerse *grises* o *blancos*. Continúan ampliando su muestra de opiniones hasta que confían en llegar a un consenso local. En las figuras (a) y (b), cada franja horizontal muestra las filiaciones y la actividad de cada agente a ambos lados del círculo en cada momento (de modo que, en realidad, los bordes derecho e izquierdo de las líneas están adyacentes). El tiempo avanza de arriba abajo. La distribución inicial aleatoria de votantes *grises* y *blancos* (apenas visible aquí en la parte de arriba de (a) se convierte rápidamente en una pauta global estable de anchos dominios de grises y blancos. Dentro de cada dominio el consenso es claro y la muestra de estudio de todos los agentes se reduce a cero. Es lo que muestra la figura (b), donde la amplitud de la muestra viene indicada por una escala de grises. Las zonas en negro denotan que esa amplitud ha caído al valor mínimo (sólo se consulta a los vecinos de al lado): aquí, los agentes no necesitan *pensar* más en sus decisiones. Sólo los agentes que están cerca de los límites de los dominios blancos y grises necesitan estudiar el terreno que queda más allá del de sus vecinos inmediatos con el fin de decidir a qué bando sumarse.

con igual ardor al pelo corto en el siglo XVII, y por la misma razón? Epstein sugiere que la mayoría de los ciudadanos estadounidenses creen que la Tierra es redonda no por ninguna razón que comprendan, sino porque es una idea tan extendida como lo estaba en la Antigüedad la de que la Tierra era plana.

Introducir un pequeño ruido constante y aleatorio en este modelo (algo de *confusión* o arbitrariedad en las decisiones de los agentes) no evita que se formen dos bloques de una preferencia u otra, pero hace que los límites entre ambos bloques sean móviles. Las opiniones de la mayoría se pueden alterar con el tiempo en cualquier zona del círculo, pero en todo momento hay amplias zonas en las que se encuentran muchos conformistas del *pensamiento mínimo*, situándose los que más piensan en los extremos, donde pueden tomar muestras de otro punto de vista. Como metáfora del proceso de decisión del conjunto de la sociedad, el modelo es ridículamente simple... e irresistiblemente atractivo.

MUNDOS APARTE

Este tipo de polarización entre individuos de mente ostensiblemente abierta la exploró hace más de dos décadas Thomas Schelling, politólogo de la Universidad de Maryland. En 1978, Schelling publicó un innovador estudio en el que demostró con cuánta frecuencia pueden ir en contra de la intuición las consecuencias colectivas de muchas decisiones individuales. Su libro, titulado *Micromotives and Macrobehavior* [*Micromotivos y macroconducta*], es uno de los pilares del tipo de física social de la que me estoy ocupando. Schelling carecía de los instrumentos de la física estadística moderna, pero a pesar de ello observó con claridad las analogías de las leyes físicas con las ciencias sociales.

Por ejemplo, en física es normal hablar de sistemas no sensibles, como si dieran señales de una conducta intencional —decir que una burbuja de jabón *trata* de minimizar su superficie o que la luz *trata* de encontrar el camino más corto—. Lo que los físicos quieren decir es que las leyes que gobiernan esos procesos están determinadas por la tendencia del mundo a maximizar o minimizar una cantidad. No hay teleología alguna en esto, sólo similitud (y afinidad formal) con el modo en que, como ya hemos visto, la entropía se incrementa con los procesos de cambio.

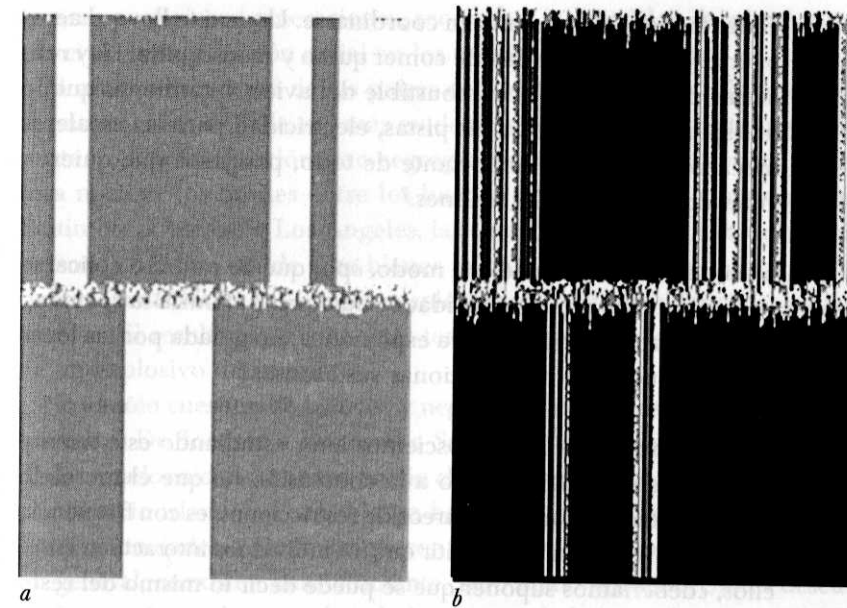


Figura 13.3. Las zonas que se forman en el modelo de Joshua Epstein son arbitrarias pero estables. Como en la figura 13.2, aquí *a* muestra las zonas de agentes *grises* y *blancos*, mientras que *(b)* muestra las correspondientes variaciones de amplitud de las muestras de estudio. Cuando el modelo recibe una *sacudida*, introduciendo la aleatoriedad en la filiación de los agentes durante algunos pasos (hacia la mitad de las figuras), el modelo se estabiliza en una nueva configuración. Agentes que antes de la *sacudida* adoptaban, confiadamente, el color gris (es decir, que no se *planteaban* su filiación) se decantan ahora, con la misma confianza, por el blanco.

Por supuesto, el conductor de un vehículo *sí trata* de encontrar el trayecto más corto al atravesar una ciudad (aunque le falte la aparente omnisciencia de la luz). La conducta social puede, por lo tanto, estar guiada por el impulso de minimizar (el esfuerzo, el tiempo, la distancia, etcétera) o maximizar (los beneficios, la felicidad, etcétera), en definitiva, de optimizar. Ésta es la base del “principio de mínimo esfuerzo” de George Kingsley Zipf (página 28g).

En economía se suele decir que la “mano oculta” de Adam Smith optimiza el mercado, lo hace más eficiente mediante la oferta y el intercambio de productos. “De alguna forma”, dijo Schelling,

Todas las actividades parecen coordinarse. Un taxi te lleva al aeropuerto. En el avión te dan de comer queso y mantequilla. Hay refinerías para elaborar el combustible del avión y camiones que lo transportan, asfalto para las pistas, electricidad para las escaleras mecánicas y, lo más importante de todo, pasajeros que quieren volar donde vuelan los aviones.⁷

Y si la economía funciona de este modo, ¿por qué no podrían aplicarse los mismos principios a otras actividades humanas? ¿Podría la sociedad tener alguna capacidad organizativa espontánea, no guiada por las leyes de la coerción, que le permita gestionar sus asuntos?

Si los economistas llevan doscientos años estudiando este tema y muchos de ellos han llegado a la conclusión de que el mercado libre, que, en comparación, carece de restricciones, es con frecuencia una forma ventajosa de permitir que los individuos interactúen entre ellos, ¿deberíamos suponer que se puede decir lo mismo del resto de las actividades sociales, de éstas que no entran en el terreno de la economía, en el que las personas interactúan con las demás por lograr la consecución de sus propios intereses?⁸

Al decir esto, Schelling estaba pensando en todo tipo de decisiones: cuándo apagar las luces del coche, si vacunar a los niños o no, si practicar deporte con casco, si llevar cadenas por si hay nieve, si violar la ley, si sentarse en un auditorio, si jugar al golf los viernes. Lo importante en todas esas actividades es que al realizarlas nos afectan y nos influyen las decisiones de los demás. Por otro lado, tenemos que tomar nuestras propias decisiones sobre la base de un conocimiento imperfecto de lo que otros hacen o quieren hacer. Esta interdependencia es lo que impide decir que la conducta colectiva es una extrapolación superficial de la conducta individual.

Con su enfoque, Schelling apela a los instrumentos y saberes de la física estadística. De hecho, recurrió a conceptos basados en la física de una forma cualitativa, pero sin saber que lo estaba haciendo: presentó modelos que muestran transiciones de fase entre distintos tipos de conducta, aunque no llegó a emplear el término de forma explícita. Pero es posible que el escenario más memorable e influyente que Schelling legó a los

que, en posteriores generaciones, recurran a los modelos *de micromotivos* sea el de la segregación racial en los estudios demográficos.

El multiculturalismo de los países occidentales fue muy celebrado en el pasado, pero es cada vez más evidente que tras esta etiqueta tan optimista no hay integración sino segregación. Con frecuencia, raza y cultura marcan los límites entre los barrios de las grandes ciudades. En Baltimore, Chicago y Los Ángeles, las ciudades interiores habitadas por personas que no son de raza blanca se han convertido en guetos, aunque del *éxodo blanco* han surgido espléndidos barrios residenciales en las afueras. El resultado es conocido: tensiones raciales, recelos y la receta de un explosivo descontento.

No es sólo cuestión de blancos y negros, ni de blancos y aceitunados, o hispanos. De Toronto a Boston y a San Francisco, buen número de ciudades estadounidenses tienen barrio chino; Londres tiene su barrio griego y un barrio irlandés; Grenoble un barrio judío; Berlín un barrio turco. Las comunidades étnicas enriquecen la cultura en la que se inscriben y, en general, coexisten amistosamente. Pero como el Reino Unido descubrió en 2001 con las revueltas de las comunidades musulmanas asiáticas en algunas ciudades del norte, el racismo y el resentimiento arden a veces por debajo de la superficie. Merece la pena recordar que esta segregación no tiene nada de *moderno*. Antes de que la raza delimitara fronteras, lo hizo la clase social o, aunque con menor frecuencia, la religión. (Es posible, por otro lado, que la segregación racial siga siendo una segregación entre ricos y pobres.) “La preferencia por relacionarnos con personas parecidas a nosotros es tan vieja como la humanidad”, afirma Paul Ormerod.⁹

Schelling se preguntó a qué se debía la segregación. A veces se piensa que puede reflejar un elevado grado de intolerancia racial. Pero, ciertamente, no es justo imputar a todos los ciudadanos estadounidenses cierta, llamémosla, desgana ante la idea de tener por vecino a una persona de otra raza o color. Por otro lado, por lamentable que pueda parecer, hay personas que no quieren vivir en un barrio en el que podrían estar en minoría desde un punto de vista racial o cultural (suponiendo que puedan trasladarse a otro barrio).

Sin embargo, la gente cambia de domicilio por razones de todo tipo; de lo cual podría deducirse que, del movimiento cultural que esto genera, y también a raíz de un grado razonable de tolerancia, la población debería conservar cierta homogeneidad. Schelling diseñó un modelo —que

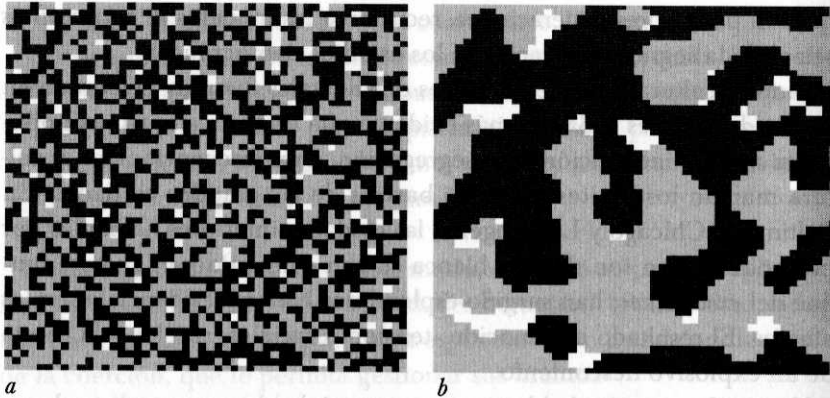


Figura 13.4. En el modelo de Thomas Schelling de interacciones entre vecinos, todos los agentes prefieren que la mayoría de sus vecinos sean de su mismo color (aquí, gris o negro), pero sólo marginalmente, es decir, se trasladarán a los cuadros libres (blancos) sólo si más del cuarenta y cinco por ciento de sus vecinos son de otro color. Por lo tanto, estos agentes tienen prejuicios, pero no son extremistas. (Aquí, “color” equivale a diferencia de clase, raza, religión o lo que sea.) La distribución aleatoria inicial de los dos tipos de agente (a) se convierte rápidamente en una disposición mucho más segregada (b) de la que, a primera vista, parece deducirse que el nivel de prejuicios es mucho mayor. La configuración (b) es el resultado del promedio de tan sólo dos movimientos de cada agente a partir de la configuración (a). Adviértase que los cuadros vacíos tienden a quedar hacia el exterior, aliviando la *tensión* existente entre áreas adyacentes. Esto se produce porque las relaciones son relativamente inestables, es decir, existe una especie de “tensión superficial”. (Estos resultados, basados en el modelo de Schelling original, corresponden a los estudios de Paul Ormerod.)

en la actualidad se considera un modelo de agentes interactivos como los que hemos visto en capítulos anteriores— que demostraba que, por el contrario, existe una especie de fuerte impulso *colectivo* hacia la segregación racial. El modelo contaba con dos tipos distintos de agente, dos *colores*, que podían representar la raza, la etnia o alguna diferencia de otro tipo. Schelling estableció la siguiente norma: en un barrio mixto, una familia se muda cuando más de una tercera parte de sus vecinos son de otro *color*. Adviértase que esto es coherente con un deseo de huir del fanatismo y, al mismo tiempo, de ponerlo de manifiesto. Pero también permite cierto grado de tolerancia: a nadie le importa que, por ejemplo, una cuarta parte de sus vecinos sean de otro *color*.

Schelling observó que una sociedad de ese tipo desarrollaba rápidamente enclaves segregados a pesar de que, inicialmente, existiera una mezcla uniforme de dos tipos de agente (figura 13.4). Esta situación encuentra su equivalente en la física: dos sustancias combinadas cuyas moléculas sólo tienen una ligera preferencia por las de su tipo se irán separando gradualmente (en una transición de fase), como el aceite y el vinagre de la ensalada.* El proceso de segregación es producto de la interacción colectiva porque cuando un agente se marcha de un barrio, se reduce la probabilidad de que los que tienen su mismo *color* se queden.

Pocas cosas ilustran mejor hasta qué punto puede ser difícil y polémico distinguir los pronósticos de una descripción física de la sociedad, con frecuencia tan rotundos, de las interpretaciones y consecuencias que extraen los políticos. Una forma de interpretar esos resultados es decir que no deberíamos preocuparnos demasiado por la segregación racial (o cultural o de clase), porque es prácticamente inevitable. O considerarla desde otro punto de vista, no podemos inferir que una sociedad segregada es una sociedad llena de prejuicios (y, por tanto, proclive a los conflictos). Sin duda, estas conclusiones agradecerían a los que preferirían preocuparse por otras cosas —a principios de los años setenta, el senador Daniel Patrick Moynihan aconsejó a Richard Nixon que tratara con “benigno desdén” las relaciones raciales—. Pero ¿no sería más útil preguntarse de qué forma, puesto que existe una gran probabilidad de que surja, se podría contrarrestar la segregación? Por ejemplo, parece muy posible que la separación de culturas puede promover una creciente ignorancia de otras formas de vida, y por lo tanto miedo y hostilidad frente a ellas —y que simples preferencias se pueden convertir en arraigados prejuicios—. (El modelo de Schelling no se ocupa de ese tipo de interacciones entre la conducta de los agentes, pero se podría pensar en la forma de que lo hiciera.) En efecto, podría ser muy provechoso con-

* Con un enfoque similar al de Schelling, los modelos de segregación más recientes tienen más que ofrecer al ojo experto de un físico. El modelo *Sugarscape* de Robert Axtell y Joshua Epstein (véase el próximo capítulo) genera distribuciones de segregación que sugieren una relación clara con los puntos críticos. En ciertas condiciones, la segregación produce zonas de tamaño *típico*, como ocurre en la transición de fase en física. En otras condiciones, las zonas segregadas tienen diversos tamaños, sin que domine ningún tamaño en particular, lo cual implica que se hallen más cerca de un punto crítico. En este caso, la mezcla es más íntima: la mayoría de las zonas son muy pequeñas, pero un pequeño número de ellas son bastante grandes. Así pues, se puede alentar la integración si uno encuentra la forma de que el sistema demográfico esté “más cerca de la criticalidad”.

centrar los recursos disponibles no en intentar suprimir la segregación, sino en fomentar interacciones más estrechas entre las diversas comunidades. Por la misma razón, podría resultar muy beneficioso saber que la introducción de la libre elección en algunos entornos (como los colegios) que anteriormente se caracterizaban, por imposición, por su diversidad cultural, puede conducir muy rápidamente a una segregación extrema. En cuestión de servicios públicos, la “libre elección del consumidor” se ha convertido en un mantra para algunos gobiernos occidentales. ¿Estarían tan dispuestos a promoverla si supieran que la posibilidad de elección sin restricciones fomenta la segregación entre, por ejemplo, ricos y pobres, o de los más y los menos capaces? En otras palabras, si bien es verdad que este tipo de modelos puede servir para defender el *laissez faire*, la defeción ante lo inevitable no tendría por qué ser necesariamente así. Al contrario, nos podrían obligar a pensar con mayor cuidado qué clase de sociedad nos parece más deseable y ayudarnos a identificar medios realistas (y no idealistas ni ingenuos) de conseguirla.

Es posible que la lección más importante que podamos extraer de los trabajos de Schelling sea que una gran segregación no tiene por qué implicar un grado elevado de intolerancia. Dicho de otro modo, de las tendencias individuales *no se extrapola necesariamente la conducta del grupo*. Nunca se hará suficiente hincapié en esto, sobre todo por parte de esos científicos que pretenden que la sociología sea más científica. El biólogo de Harvard Edward O. Wilson sostiene que habría que tener más en cuenta las predisposiciones de la naturaleza humana, que ha determinado la evolución: en lugar de limitarse a postular formas de conducta individual, habría que buscar las tendencias fundamentales que el cerebro ha integrado por selección natural. Se trata de un objetivo importante: demasiados modelos, incluidos muchos de los que he descrito en este libro, parten de presupuestos (o preconcepciones) sobre la conducta humana que aparentemente dicta el sentido común, pero que, en última instancia, son arbitrarios. Pero Wilson no llega a admitir que el comportamiento colectivo puede no ser una versión a mayor escala del comportamiento individual. Porque lo cierto es que en el grupo se manifiestan características que no se pueden predecir únicamente a partir de la naturaleza de los instintos cerebrales. La ligera tolerancia de los agentes de Thomas Schelling no les vale para organizarse en barrios de moderada diversidad cultural, y en vez de ello dan muestras de un alto grado

de segregación. Si miramos de arriba abajo, juzgándolas por su forma de distribuirse, podemos malinterpretar la naturaleza de las personas.

Michael Lind, politólogo de la Fundación Nueva América, lo expresa muy bien:

Un amigo mío que cría perros me ha dicho que es imposible entenderlos si no se tienen media docena o más. Cuando se reúne un número suficiente de ellos, el comportamiento de los perros experimenta un cambio asombroso. Forman por instinto una jauría indisciplinada. Tradicionalmente, los politólogos han sido estudiantes de veterinaria que sólo hubieran observado el comportamiento de los cachorros por separado.¹⁰

Ha llegado la hora de estudiar a la jauría.

CRIMEN Y CASTIGO

Otra razón de que las personas cambien de casa es para huir de la delincuencia. Esto puede inspirar una conocida espiral negativa, porque es indiscutible que delincuencia y privaciones están ligados. Nadie que no sea un delincuente desea vivir en un barrio con un alto índice de delincuencia (y de hecho, es muy posible que ni siquiera los delincuentes quieran), pero sólo quienes puedan pagar una vivienda más cara pueden mudarse. Esto empobrece todavía más los barrios con un alto índice de delincuencia, lo que redundará en un aumento de los delitos. Pero la ecuación no es tan simple. Hay zonas rurales pobres con índices de delincuencia más bajos que zonas urbanas ricas. En el pasado, los periodos de alto nivel de desempleo y bajo nivel de vida no se vieron necesariamente acompañados de un aumento de la delincuencia, que es lo que sucede en la actualidad. Lo cierto, sin embargo, es que no se puede afirmar que exista una relación predecible entre privaciones y delincuencia.

Debido a esto, resulta muy difícil identificar las mejores soluciones. La moda política imperante a ambos lados del Atlántico es “tolerancia cero con la delincuencia” –con endurecimiento de las penas, incluidas condenas de cárcel más largas–. Esto complace a ciertos sectores del electorado, pero no hay pruebas de que reduzca los índices de criminali-

dad. En realidad, podría tomarse como una reacción frente a las actitudes liberales de los años setenta, cuando la delincuencia se consideraba una enfermedad cuya cura residía más en la comprensión y la compasión que en el castigo. No hay razón, sin embargo, para creer que este enfoque diera mejores resultados.

La dureza en el control de la delincuencia recibe el apoyo de un modelo económico de criminalidad que en la década de 1960 avanzó el economista estadounidense Gary Becker. Becker sugirió que igual que se puede hablar de mercado del aluminio o mercado del plátano, se puede hablar de mercado del delito. Los agentes de ese mercado son los delincuentes, que efectúan sus transacciones (delitos) tras hacer un análisis de costes y beneficios. Cuando te sales con la tuya, el delito rinde beneficios; en caso contrario, resulta muy costoso —económicamente por un delito menor, o con una pena de privación de libertad por el tiempo que Su Majestad guste, como decimos en el Reino Unido—. En el modelo de Gary Becker, los delincuentes hacen una valoración racional de los pros y los contras y deciden en consecuencia. Si es esto lo que ocurre, no hay motivo para que no se puedan reducir los delitos mediante un incremento de los costes —un aumento de los castigos—. Es un punto de vista muy hobbesiano: el deseo de poder del hombre sólo puede subvertirlo un poder mayor, al que el hombre no se atreve a retar.

Sin embargo, muchos criminólogos convencionales consideran que este proceso de decisión racional es pura fantasía. Por el delito, afirman, rara vez se opta tras sopesar fríamente sus ventajas e inconvenientes. La mayoría de los delincuentes no piensan en las consecuencias de que los cojan. Si esto es así, el endurecimiento de las penas sirve de muy poco y habrá que buscar cura en otro lado. Raskólnikov, el personaje de Dostoyevski, conocía las penalidades del sistema penal al que tenía que hacer frente, reconocía incluso que “casi todos los crímenes se descubren con facilidad”, pero eso no le impidió cometer un enloquecido asesinato —y por razones que ni siquiera podía articular.

Dostoyevski nos ha legado algunas de las intuiciones más reveladoras de la mente criminal. Si sus descripciones se acercan a la realidad (y como criminal convicto que tuvo que soportar un simulacro de ejecución en Siberia, sabía de qué hablaba), no es fácil identificar los factores que disuaden o espolean al delincuente. Pero un elemento que tal vez no haya recibido la atención que merece es la presión social: el efecto de las personas

cercanas al delincuente. Japón no se libra de la delincuencia, pero la notable seguridad que se respira en sus calles y parques debe sin duda derivarse del bochorno y exclusión social que caen sobre los delincuentes. En una cultura dominada por la etiqueta social y la presión de nuestros iguales, es posible que ése sea un factor disuasorio más poderoso que cualquier pena draconiana que las leyes puedan imponer. Lo mismo puede decirse de algunas comunidades pequeñas de Occidente. Si los delincuentes conocen a sus vecinos, no sólo se sienten menos capaces de despersonalizar a sus víctimas, lo cual parece una parte necesaria de la mayoría de los delitos aleatorios, sino que corren el riesgo de sufrir la desaprobación de todo aquel con quien se encuentren.

Los economistas Michael Campbell y Paul Ormerod han propuesto un modelo de actividad criminal que debe mucho al enfoque de Thomas Schelling como, por ejemplo, la interacción entre sus agentes. Dicho en pocas palabras, dan por supuesto que el delito conlleva un *coste* que depende de lo mucho o lo poco que se desvíe de las normas sociales. Si casi todos tus vecinos son ladrones, es poco probable que te arriesgues a la exclusión social cuando tú también eres un ladrón. De hecho, más te vale serlo, o de otro modo te encontrarás entre una minoría de perdedores. Si, por otro lado, todos tus vecinos son pilares de la sociedad, pende sobre ti una enorme presión para que cumplas la ley.

En este caso, lo mejor es considerar las decisiones desde el punto de vista de los riesgos calculados. Se podría argumentar que las personas con inclinaciones criminales tienen mucho que ganar si viven entre ciudadanos respetuosos de la ley, puesto que sacan provecho de sus delitos sin sufrir los de sus vecinos. Por otro lado, esa misma tentación tienen los demás. Éste es el tipo de escenario para el que fue diseñada la teoría de juegos, de la que nos ocuparemos en el capítulo XVII. Pero Campbell y Ormerod adoptan el siguiente punto de vista: a causa de la presión social, lo más probable es que un criminal en potencia se adapte a sus vecinos si estos cumplen las leyes.

No hay razón para suponer a priori que estas presiones influyen decisivamente en los índices de criminalidad. Campbell y Ormerod se limitan a preguntarse qué efecto tienen en sociedades sometidas a unos regímenes penales y a unas condiciones sociales concretas. Dividen la población en tres grupos. El primero es inmune a la tentación del delito, sea el que fuere. Lo más probable es que la mayoría de las mujeres y

de los pensionistas pertenezcan a este grupo. El segundo lo componen los delincuentes. Al tercero pertenecen los “votantes flotantes”, susceptibles de convertirse en delincuentes si las circunstancias les empujan a ello, pero que, en su lugar, optan por vivir de acuerdo con la ley. Los individuos pueden cambiar de grupo y lo hacen a raíz de una especie de presión de nuestros pares: cuanto más altas sean las proporciones relativas de cada grupo de población, más probable es que otros se unan a él.*

Campbell y Ormerod dan por supuesto que existe una relación directa entre las privaciones y la propensión a convertirse en un delincuente activo. Las privaciones pueden ser una especie de “fuerza impulsora” general de la criminalidad y son la expresión de diversos factores sociales como los niveles salariales y la tasa de paro –cabe imaginar que están vinculadas a un índice económico estándar–. Aparentemente, lo normal es que un aumento de las privaciones redunde sencillamente en un aumento de la proporción de criminales activos en el seno de una población. Pero a causa de las interacciones entre individuos –el grupo presiona para que se adapten–, la relación entre privaciones e incidencia real de la criminalidad no es sencilla. Para un amplio abanico de niveles de privación, el modelo genera dos índices posibles de criminalidad: uno alto y otro bajo (figura 13.5a). En otras palabras, no existe un único estado estable para un amplio abanico de condiciones; depende de la historia del sistema.

Si empezamos por un nivel bajo de criminalidad y pocas privaciones (la curva inferior, a la izquierda del gráfico), empeorar las condiciones sociales sólo conduce a un pequeño incremento en la proporción de criminales. Sólo cuando la curva termina con un repentino giro hacia arriba *debe* producirse un cambio hacia la línea superior. Por lo tanto, en este punto, sólo un ligero aumento de las privaciones puede llevar a un brusco y grande incremento de la delincuencia. De igual modo, si empezamos por la línea superior (hacia la derecha del gráfico), incluso una mejora sustancial de las condiciones sociales (al desplazarse hacia la izquierda) no conduce más que a un pequeño descenso de la delincuencia, hasta

* Los cambios del grupo no susceptible al grupo susceptible vienen motivados no por los individuos que cambian de opinión, que contradirían la misma idea de no susceptibilidad, sino por cambios demográficos de la población.

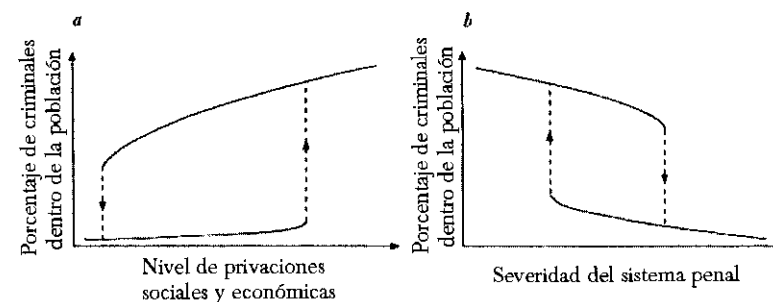


Figura 13.5. La incidencia de la criminalidad en una sociedad puede depender de factores sociales de formas que no son evidentes ni fáciles de predecir. El modelo de Michael Campbell y Paul Ormerod refleja cambios súbitos entre estados de *alta* y *baja* criminalidad que sólo pueden ser impulsados por pequeños cambios de las condiciones sociales. Los cambios de la criminalidad aparecen en relación con (a) el grado de privaciones y (b) la severidad de las penas. En ambos casos se producen bruscas transiciones de fase entre dos estados distintos: deben producirse en los extremos de ambas líneas (si no se producen antes).

que se llega al final de la línea superior. Aquí se produce un salto a la curva inferior: de pronto, mejoras que anteriormente parecían ineficaces se saldan con un cambio espectacular a mejor.

Paul Ormerod señala que, a pesar de la evidente simplicidad del modelo, este resultado tiene una importante consecuencia que probablemente sea generalizable: una política social concreta puede tener distintos efectos en la delincuencia, dependiendo de las condiciones iniciales. Según el punto de vista liberal, se puede reducir la delincuencia combatiendo las privaciones. Si a un barrio le corresponden la línea alta de criminalidad y la zona de grandes privaciones de la escala, es poco probable (de acuerdo al modelo) que las medidas anti-privaciones tengan, por sí solas, gran efecto; en tal caso, los conservadores tacharán de estúpido ese punto de vista. Pero si uno se encontrara cerca del extremo de la línea superior, incluso una pequeña mejora podría inclinar el sistema hacia la línea inferior, con un descenso espectacular de la delincuencia.

El mismo tipo de conducta se genera cuando se considera de qué forma, para ciertas condiciones sociales establecidas, la proporción de criminales cambia cuando se modifica la fuerza disuasoria. En el modelo, esto supone una simple modificación en la probabilidad de que los individuos

susceptibles de ello se conviertan en criminales de acuerdo a la presunción de que el endurecimiento de las penas tiene un efecto proporcional sobre esta probabilidad. Surge de nuevo un conjunto de soluciones de dos líneas. Incrementar la fuerza disuasoria podría tener un efecto pequeño o más grande, dependiendo del punto de partida (véase figura 13.5 *b*). Así pues, una vez más, dependiendo de las circunstancias, las observaciones podrían sustanciar argumentos bien a favor bien en contra de atajar los delitos con dureza.

Pero de los resultados del modelo de Ormerod se pueden extraer más conclusiones. Hace tiempo pasé tres años elaborando gráficos muy parecidos a los de la figura 13.5. Pero no estaba investigando la delincuencia, sino las condiciones en las que un líquido y un gas se transforman. Cuando se altera la presión del fluido, nos encontramos con el mismo tipo de dualismo (véase figura 13.6); es decir, con algunas presiones, el fluido puede adoptar bien el estado gaseoso, bien el estado líquido. Las dos líneas tienen la misma pendiente suave exactamente y terminan en un giro súbito hacia arriba o hacia abajo, igual que el del modelo de Ormerod. Es evidente que el modelo que estudia la delincuencia está representando una transición de fase de primer orden. Recordemos que una transición de fase se produce bruscamente al modificar la fuerza impulsora. En una transición de primer orden, como la congelación o la evaporación de un líquido, la transición viene marcada por un salto súbito de alguna propiedad del sistema como el volumen o la densidad. Y sin embargo, a primera vista parece que el modelo de Ormerod da por supuesto que existen dos saltos de ese tipo que tienen lugar con distintos valores de la "fuerza impulsora" (la severidad del régimen penal o el nivel de las privaciones). Se produce un salto cuando se alcanza el extremo de la línea superior; el otro, en el extremo de la línea inferior.

Sin embargo, en las transiciones de fase de primer orden reales, sólo hay un estado de equilibrio del sistema con un conjunto de condiciones fijadas y sólo un punto en el que puede producirse un salto entre estos estados de equilibrio. He marcado ese punto en la figura 13.6; se encuentra hacia la mitad de la zona en que ambas líneas se solapan. Más allá de ese punto —a la derecha de la línea inferior (la del gas)—, el gaseoso deja de ser el estado más estable: no se trata de un estado de equilibrio. En vez de ello, se sitúa en un estado *metaestable*: provisionalmente estable, pero sólo mientras no ocurra nada que precipite la licuación. En teo-

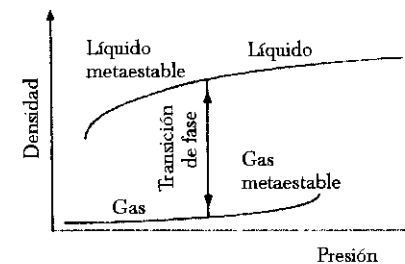


Figura 13.6. La transición de primer orden entre un líquido y un gas (evaporación y condensación) se puede inducir de pronto únicamente con un ligero cambio de la presión. Cada uno de los estados puede seguir metaestable más allá del punto de transición, hasta que la línea termina en un punto espinodal.

ría, un estado metaestable siempre se convertirá al estado más estable si se espera el tiempo suficiente (véase página 193). Cuánto haya que esperar dependerá de lo cerca que nos encontremos del final de la línea. En la práctica, los estados metaestables pueden prolongarse mucho tiempo. Para presiones que estén por encima del extremo de la línea del gas, el estado metaestable es insostenible. Como hemos visto en el capítulo anterior, al extremo de la línea se le llama punto espinodal.

Estoy seguro de que todos estos detalles se corresponden también con el modelo de delincuencia. Es decir, el punto *de equilibrio* en el que se produce el cambio entre los estados de mucha o poca criminalidad se encuentra hacia la mitad de la zona en la que las dos líneas se solapan. Una vez que hemos pasado este punto *sin* que se haya producido el cambio, la posibilidad de que se produzca siempre está presente. En la práctica, lo que acaba con el estado metaestable es el fenómeno de la *nucleación*. Si una región suficientemente grande del estado más estable se forma por casualidad en el estado metaestable, se puede expandir rápidamente para abarcar todo el sistema. Por lo tanto, en un líquido enfriado por debajo del punto de congelación (sobreenfriado), un pequeño cristal del sólido proporcionará la semilla a partir de la cual se congelará todo el líquido (véase la página 193). Por analogía, podríamos esperar por ejemplo que, hacia el extremo de de la línea de baja criminalidad, un barrio local con un alto índice de delincuencia podría proporcionarnos un núcleo a partir del cual la criminalidad se extiende por la pobla-

ción circundante. Este comportamiento hace que discernir causa y efecto de las políticas de reducción de la delincuencia sea incluso más difícil. Puede interpretarse correctamente, sin embargo, cuando se reconoce la analogía con las transiciones de fase.

Pero, ¿de verdad existen esos saltos súbitos en los índices de delincuencia? En *El punto clave*, Malcolm Gladwell cita el caso de Nueva York: peligroso y temible Gotham en los años ochenta y orgullosa, segura y acogedora ciudad a finales de los noventa. Los guetos de Brownsville e East New York eran zonas vetadas después de la puesta de sol a principios de los noventa, pero en el curso de cinco años, en el conjunto de la ciudad los asesinatos han descendido un sesenta y cinco por ciento y el total de los delitos la mitad. Normalmente, el cambio se atribuye a la celebrada política de “tolerancia cero” del alcalde Rudolph Giuliani, pero no hay acuerdo acerca de qué implicaba y cómo se manifestaron sus efectos. ¿Se debió todo a una mejor política policial? ¿Al descenso en el consumo de drogas? ¿Al incremento en la edad media de la población? ¿A la mejora de la economía? ¿A la determinación de quitar los *graffiti* de los vagones del metro?

Malcolm Gladwell sostiene que deberíamos pensar en la mejora repentina de los índices de delincuencia, y también en fenómenos sociales como la difusión de modas e ideas o la popularidad de los libros de éxito, como en una especie de epidemias. Esto podría ser verdad, aunque, como veremos en el capítulo XVI, hay en el contagio de las epidemias más de lo que biólogos y epidemiólogos tradicionalmente han visto. Pero las epidemias de difusión exponencial no son el único modelo científico de cambio brusco. Las transiciones de fase son otro instrumento, de alguna forma más sutil. Una transición de fase de primer orden representa un cambio entre dos estados globales de un sistema alternativos. La física nos demuestra que tales cambios no siempre se producen bajo un conjunto único de condiciones (esto es, que el estado metaestable puede perdurar) y que lo que de verdad importa es la historia del sistema. Como la epidemia de Gladwell, las transiciones de fase son grandes cambios causados por pequeñas causas: “Entre todas las razones que explican por qué el índice de delincuencia de Nueva York descendió tanto están los cambios marginales; fueron cambios evolutivos”.¹²

Por su parte, las transiciones de fase críticas ofrecen otra perspectiva del cambio rápido: dos opciones se fusionan en una sola. Y los puntos

espinodales crean otro escenario, uno en el que un salto de primer orden en el estado de un sistema viene impulsado por la desaparición de un estado metaestable. Por lo tanto, al punto clave de Malcolm Gladwell se puede llegar de varias formas. Y la distinción importa, porque nos dice cosas diversas sobre cómo se produce el cambio y qué puede hacerse para inducirlo o evitarlo.

LAZOS QUE UNEN

Hasta hace relativamente poco, en la sociedad occidental, el matrimonio no era tanto una elección como una obligación social. George Bernard Shaw dijo una vez: “Por mucho que todos suframos en nuestro matrimonio, la mayoría de nosotros pensamos tan poco en él que lo consideramos una parte inalterable del orden de las cosas, como la gravedad”.¹³ Pero ya no es así. La media de edad de las parejas casadas, la proporción de personas que no se casan y el número de divorcios se han incrementado paulatinamente en la sociedad occidental a lo largo de todo el siglo XX. Más y más gente parece preguntarse, ¿para qué casarse?

Shaw proseguía: “La idea de que las formas de matrimonio existentes no son invenciones políticas, sino obligaciones sagradas [...] influye, o se cree que influye, en muchos votantes, así que ningún gobierno tocará la cuestión del matrimonio si puede evitarlo”.¹⁴ En fin, los tiempos cambian. Hoy en día algunos gobiernos, alarmados por el descenso de las cifras y su presunta consecuencia: el declive de los “valores familiares”, se toman como un deber la revitalización del matrimonio. Pero, ¿cómo se hace? Es posible, en efecto, pagar a la gente para que se case por medio del mecanismo de los incentivos fiscales. Puede que incluso sea posible articular un clima social que sonría ante las familias vinculadas por el matrimonio (a costa, normalmente, de desaprobación a las familias que no lo están). Introducir ciertas mejoras laborales podría facilitar la creación de más familias —por ejemplo, reforzando el derecho a una maternidad generosa y al permiso de paternidad—, con la esperanza de que criar a los hijos, o la idea de criarlos, aumente las probabilidades de que haya más matrimonios.

Pero, al final, no llegaremos muy lejos si no comprendemos *por qué* se casa la gente. No hace falta decir que no hay criterio que valga para todos pero, presumiblemente, hay motivos más comunes que otros. Si es así,

¿cuáles son esos motivos? Gary Becker ha aportado a la cuestión la perspectiva de un economista. A finales de los años setenta propuso que una pareja con cohabitación gana en eficiencia con respecto a los hogares unipersonales gracias a la especialización –de igual modo que Adam Smith señaló las ventajas de la división del trabajo en las fábricas–. En la familia tradicional, uno de los cónyuges se dedicaba a los deberes domésticos mientras el otro salía a ganar un salario. De este modo, las parejas maximizaban su utilidad, como los agentes del mercado cumplidamente racionales.

Esto puede parecer un modo espantosamente frío de desentrañar el misterio que une a dos personas. En el ya clásico análisis que hace Becker de la economía familiar (que le ayudó a ganar el premio Nobel en 1992), el amor romántico y familiar ocupa un papel secundario mientras los interesados evalúan fríamente qué pueden ganar de sus cónyuges (potenciales o reales), sus hijos y sus padres. “Los participantes en el mercado matrimonial”, sostiene Becker, afrontan una elección difícil porque cuentan con “información limitada sobre qué utilidad pueden esperar de sus potenciales parejas”.¹⁵ Las personas se casan atravesando los límites de la raza, la religión y la clase cuando “no esperan obtener mejores resultados buscando y esperando”.¹⁶ Demos gracias que Shakespeare no hiciera que Romeo y Julieta lo plantearan así.

Resultaría fácil despreciar el análisis de Gary Becker, tomándolo como un caso de racionalismo enloquecido según el cual todas las decisiones que se toman en el seno de la familia se expresan mediante complejas ecuaciones diferenciales que describen análisis de costes y beneficios. Aplicar las ideas económicas a la vida familiar podría parecer una caricatura de cientificismo que da pie a consideraciones como esta:

En consecuencia, sin costes de supervisión ni costes fijos por distribución de tiempo entre los distintos sectores, la producción de un hogar multipersonal dependería únicamente de las aportaciones agregadas de bienes y tiempo efectivo.¹⁷

Sin embargo, con esa forma de expresarse tan rotunda, Gary Becker capta la esencia de muchos de los asuntos que rodean la vida familiar. Al fin y al cabo, las costumbres y las normas sociales existen por algo. Es posible que a veces sean injustas, opresivas o estén desfasadas, pero en un principio se establecieron porque la sociedad se dio cuenta (o creyó)

que las necesitaba. Una fría valoración de la *utilidad* potencial de la pareja resulta coherente con una práctica muy común en Japón que consiste en intercambiarse los currículos para que les eche un vistazo la familia del cónyuge, o con el empleo de agentes matrimoniales en algunas comunidades judías y de Europa oriental. Muchas sociedades han utilizado la edad de merecer como un medio para regular la tasa de natalidad: en las comunidades católicas irlandesas tradicionales el matrimonio se suele retrasar más que lo que es normal en Inglaterra.

Además, el análisis de Gary Becker puede arrojar luz sobre ciertos hábitos y costumbres cuya explicación no es ni mucho menos obvia. Este economista sostiene que la poliginia –tomar muchas esposas– es más corriente en el mundo que la poliandria –tomar muchos maridos– porque “la contribución marginal de las mujeres a la producción excedía significativamente la de los hombres”.¹⁸ Dicho de otro modo, las mujeres son más útiles –no sólo para los hombres, sino las unas para las otras–. En ciertos casos, un hogar con varias esposas mejora las condiciones de vida de sus miembros, que están mucho mejor que si vivieran solos, mientras que lo normal es que, al tomar muchos esposos, una mujer gane poco. Esto no es defender la poliginia (ni tampoco condenarla); más bien se trata de centrar la atención en las condiciones socioeconómicas que la sustentan. De acuerdo con este modelo, es posible que ciertos aspectos del patriarcado no constituyan la condición previa, sino la consecuencia de un tipo particular de sociedad.

Lo mismo podría ser cierto de las desigualdades que continúan existiendo entre los salarios de hombres y mujeres. En general, los hombres siempre han ganado más que las mujeres, que es lo que sucede hoy en día y sucedería incluso si recibieran el mismo sueldo por hacer el mismo trabajo, porque, de media, las mujeres tienden (o quizá se ven obligadas) a aceptar empleos peor pagados. Es posible que esta disparidad se esté reduciendo, pero en el pasado ha sido enorme. Suele pensarse que esto se debe a que, tradicionalmente, la discriminación ha sido enorme y a que los hombres siempre se han quedado con los trabajos mejor pagados. Eso al menos es lo que pueden pensar los liberales; los conservadores pueden tener la tentación de afirmar que, sencillamente, es cuestión de biología y que los hombres se adaptan mejor a ese tipo de trabajos.

Gary Becker demuestra que no tiene por qué ocurrir ninguna de las dos cosas, siempre y cuando los hogares mixtos quieran maximizar su

utilidad: hacer las cosas con la mayor eficacia posible y con el máximo beneficio. En estas circunstancias, la división del trabajo siempre es beneficiosa para los dos. Lo normal es que las parejas se dividan las tareas y que sólo pequeñas diferencias, como un ligero sesgo biológico hacia la madre en el cuidado de los hijos cuando éstos son pequeños, inclinen la balanza. “Incluso una pequeña discriminación del mercado contra las mujeres o pequeñas diferencias biológicas entre hombres y mujeres pueden motivar enormes diferencias entre las tareas que desempeñan esposas y maridos”.¹⁹ No deberíamos esperar que los efectos siguieran la misma proporción que sus causas.

Por lo tanto, afirma Becker, las desigualdades sociales pueden surgir de una conducta puramente racional: “Una división del trabajo eficaz es perfectamente coherente con la explotación de las mujeres por sus padres y maridos –un sistema *patrimonial*– que reduce su bienestar y el control sobre sus vidas”.²⁰ A Becker le han criticado porque de su tesis parece deducirse una especie de determinismo –así es como son las cosas y más nos vale aceptarlo– o algo peor: una justificación de las desigualdades. Pero en realidad, la obra de Becker no tiene nada que ver con esto. Por el contrario, coincide con el espíritu de una *física de la sociedad* asegurar que, para comprender las razones de que las cosas sean como son, no podemos basarnos únicamente en la intuición y los prejuicios. Más bien deberíamos buscar modelos que ilustren de qué forma pueden surgir ciertas circunstancias cuando se siguen ciertas normas. Lejos de defender la inevitabilidad, este análisis puede revelarnos lo que necesitamos cambiar si queremos que las cosas sean distintas y puede ahorrarnos muchos errores empíricos motivados por poco más que deseos ilusorios que, en última instancia, se saldarán con un resultado contrario al deseado.

Algunas de las conclusiones a que llega Gary Becker resultan incómodas para muchas personas de mentalidad liberal como yo; por ejemplo, su sugerencia de que las ayudas a las madres solteras pueden en realidad ir en su contra, porque entonces, desde un punto de vista *racional*, lo que más les interesa es tener más hijos y no casarse. Pero una vez más, lo que cabe deducir de esto no es que las ayudas sociales sean malas, sino que no podemos valorar sus efectos aislándolos de un panorama socioeconómico más amplio.

El gran valor de la obra de Becker es que ha identificado la falacia de los modelos de la economía neoclásica, que consideran que los índices

de natalidad y de matrimonios *vienen dados*. Tradicionalmente, los economistas no se han interesado en ese tipo de estadísticas más que para tomarlas como un dato más del contexto socioeconómico. Por el contrario, Becker ha demostrado que la economía incide en este tipo de factores sociales y que éstos, a su vez, la modifican. Las desigualdades no sólo son resultado de la codicia humana sino que

dependen de la relación entre fertilidad y renta familiar;* de la subinversión de las familias pobres en el capital humano de sus hijos; de la tendencia a que el emparejamiento esté determinado por la educación, los antecedentes familiares y otras características; de los índices de divorcio y del apoyo que reciban los hijos de las mujeres divorciadas; y de cualquier desigualdad en la distribución del legado familiar y social entre los niños.²¹

Por otro lado, los fundamentos de su análisis son de corte neoclásico, se basan en la presunción de que los agentes económicos son racionales y maximizan su utilidad de forma independiente. Nadie se atrevería a negar que muchas decisiones sobre la concepción, el matrimonio y el divorcio van en contra de los *intereses* de la persona considerados objetivamente. Por fortuna, no existen cálculos precisos que atañan al enamoramiento o al desamor. Pero lo más significativo es que lo que decidimos acerca de nuestra pareja o de nuestros hijos no sólo depende de nuestra relación con ellos en tanto que individuos, sino de los modelos que la sociedad en general ha establecido. El enfoque neoclásico sólo puede ofrecernos una verdad parcial, porque, una vez más, desprecia un factor crucial: la interacción.

LA DECISIÓN DE CASARSE

Cuando lo consideramos desde un punto de vista económico, el matrimonio se desestabiliza cuando, por circunstancias, es menos *rentable*. Por ejemplo, a medida que las mujeres van encontrando empleos mejor

* Becker emplea el término “fertilidad”, de forma peculiar pero coherente, para denotar no la capacidad biológica de quedarse embarazada, sino el número real (y con frecuencia determinado conscientemente) de niños que una mujer o una pareja tienen –su *productividad infantil*, si se quiere.

pagados, el matrimonio no sirve para mejorar, sino para poner en peligro su utilidad en el trabajo. De hecho, los cambios en la demografía de género del empleo se han citado como causa del declive en el número de matrimonios. Pero, al parecer, el corolario –que un *boom* económico con un elevado nivel de empleo y salarios altos es un obstáculo para el índice de matrimonios– no se tiene lo bastante en cuenta. Algunos países europeos (como Dinamarca y el Reino Unido) tienen índices de divorcio más altos que otros (es lo que sucede en Francia y Alemania), pese a que sus economías son comparables. Según parece, la actitud social frente al matrimonio también desempeña un gran papel en la apuesta por el matrimonio y en su continuidad.

Thomas Schelling se ha dado cuenta de que el matrimonio es el prototipo de muchas situaciones sociales en las que tomamos decisiones interdependientes, binarias. O nos casamos o no nos casamos. (O, mejor, en un momento determinado, o estamos casados o no lo estamos.) Una persona casada influye en las opciones de las personas que no lo están reduciendo las posibles opciones y, además, ejerciendo una enorme influencia en las normas sociales. “Las consecuencias sociales del matrimonio –dijo Schelling– hacen de esta actividad uno de los fenómenos centrales del panorama de las ciencias sociales”.²²

Paul Ormerod y Michael Campbell vieron en este tema una nueva oportunidad para aplicar su modelo de agentes interactivos. Al igual que sucede con la delincuencia, es más probable que las personas tomen cierta decisión si nuestros vecinos han tomado esa misma decisión. A continuación, se puede investigar de qué forma las distintas fuerzas que impulsan el matrimonio modifican la proporción de personas casadas y no casadas de una sociedad interactiva mientras otros factores se mantienen en un nivel constante. En su modelo poblacional, Ormerod y Campbell vuelven a dividir a la población en tres grupos: solteros, casados y divorciados. En esta división, estar soltero se parece a la virginidad: en cuanto has dejado de serlo, no hay vuelta atrás. Pero los agentes pueden remedar a Liz Taylor y, tras abandonar la soltería, casarse y divorciarse cuantas veces quieran. Dos factores influyen en estas opciones: los incentivos económicos (potencial de ingresos, exenciones fiscales, oportunidades de empleo, etcétera) y la actitud de la sociedad (que la opinión pública desapruuebe la cohabitación entre solteros, que el matrimonio esté pasado de moda).

Si la actitud de la sociedad no tiene bastante fuerza, del modelo se deriva una proporción de personas casadas que, sencillamente, aumenta a medida que las condiciones económicas para casarse y seguir casado mejoran. Pero si la actitud de la sociedad es otra, el resultado es distinto (véase figura 13.7a). Una vez más, encontramos dos líneas: un estado en el que hay muchos matrimonios y otro en el que hay pocos. En realidad, señala Ormerod, las dos líneas están unidas por una curva continua (la línea de puntos). Esto parece implicar que para cierto abanico de intensidades de los incentivos económicos, hay *tres* estados posibles –una línea vertical intersectaría la onda en tres puntos–. Sin embargo, se puede mostrar que más allá de los puntos de giro de las curvas superior e inferior, los estados que representa la línea de puntos no son ni estables ni metaestables, sino inestables: se transforman de inmediato en otra cosa. Esto es precisamente lo que genera la teoría de Van der Waals de la transición de fase de líquido a gas: una sola curva enroscada y dividida en partes estables, metaestables e inestables (véase figura 13.7b).

Por lo tanto, cabe esperar que el modelo para los matrimonios tenga las mismas características que el modelo para la delincuencia: una transición de equilibrio entre las líneas superior e inferior más allá de la cual la nucleación del estado más estable dentro del estado metaestable puede precipitar el cambio en cualquier momento. Y nos encontramos, otra vez, con una dependencia de la historia: los incentivos económicos podrían no incrementar significativamente la proporción de individuos casados si esta proporción es inicialmente baja, aunque, con el mismo nivel de incentivos, en otro sistema social el índice de matrimonios podría ser muy alto. El giro de la onda sólo se produce si la influencia de las actitudes sociales tiene fuerza suficiente. Un gráfico tridimensional que muestra la dependencia del matrimonio de éste y otros factores económicos se parecería, por tanto, a la figura 13.8a. Las líneas de la figura 13.8 trazan una *superficie* que describe una onda. Ormerod compara esta onda con un colchón doblado.

No creo que al lector le sorprenda saber que ésta también es una imagen familiar para la física estadística. Josiah Willard Gibbs tenía un molde en escayola de esta extraña onda. Lo hizo James Clerk Maxwell. Es la curva que muestra la transición de líquido a gas de primer orden disipándose en el punto crítico. El propio punto crítico se corresponde con el lugar en el que empieza (o termina) la onda –donde la superficie

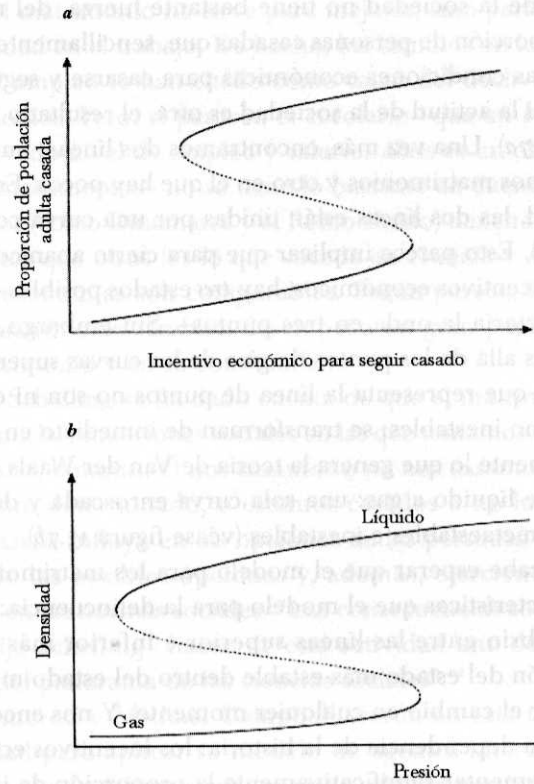


Figura 13.7. En un modelo que describe de qué forma la proporción de personas casadas de una población depende de las presiones sociales y los incentivos económicos, unas condiciones sociales y económicas idénticas pueden conducir a dos resultados posibles: una sociedad con muchos matrimonios o una sociedad con pocos matrimonios (a). Esos dos estados están vinculados por una curva continua (la línea de puntos); pero entre las dos curvas de la onda, los estados que surgen del modelo no son estables. Esto es análogo al lazo que une los estados líquido y gaseoso en la teoría de las transiciones de fase de Van der Waals (b). Van der Waals demostró que no hay estado estable en la parte discontinua (la línea de puntos) de la onda.

superior se enrosca tanto que cuelga sobre la superficie inferior—. En la superficie de Gibbs, “la fuerza de las actitudes sociales” es sustituida por la temperatura, “los incentivos económicos” por la presión y la “proporción de personas casadas” por la densidad (véase figura 13.8b). En

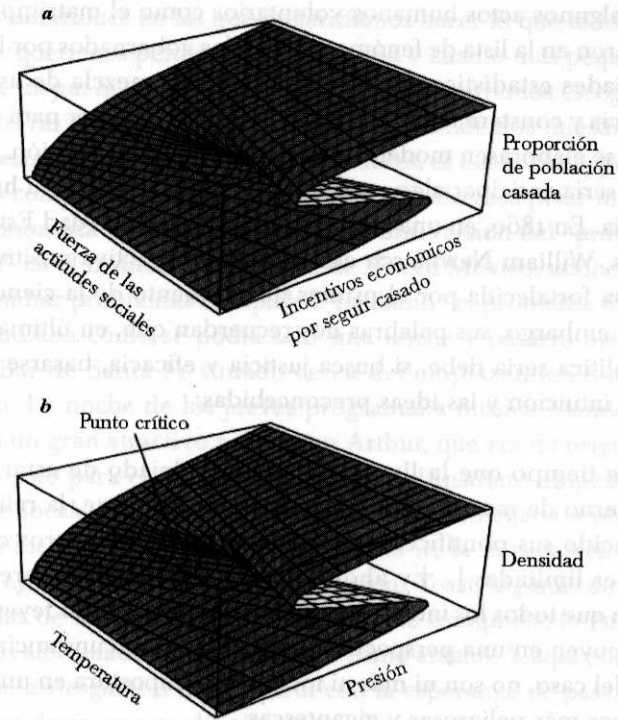


Figura 13.8. La dependencia de la tasa de matrimonios sobre *ambos* factores del modelo —las presiones sociales y los incentivos económicos— puede representarse como una superficie de tres dimensiones (a). Esta superficie tiene un pliegue: fuera de ese pliegue, un conjunto determinado de condiciones sociales nos permite sólo un estado del sistema, mientras que dentro del pliegue hay dos estados posibles. El pliegue termina en una especie de punto crítico. El mismo comportamiento se corresponde con exactitud en la dependencia de densidad de un fluido (líquido o gas) de su temperatura y presión (b).

otras palabras, el modelo de los matrimonios de Ormerod y Campbell tiene un punto crítico. En ese punto deja de haber dos estados posibles de la sociedad, con una proporción de matrimonios alta y baja, porque esos estados se fusionan en uno. Así pues, esos agentes interactivos, influidos por las opciones que unos toman frente a otros, despliegan todo el abanico de conductas que caracteriza a las partículas de un fluido, influidas por sus fuerzas de atracción y repulsión mutuas.

Cuando algunos actos humanos voluntarios como el matrimonio o el delito entraron en la lista de fenómenos sociales gobernados por las leyes y regularidades estadísticas, la respuesta fue una mezcla de asombro, complacencia y consternación. Los intentos de Gary Becker para que con esos temas se elaborasen modelos suscitaron la misma reacción. Lo más inteligente sería anticipar algo parecido si la física imprime su huella en la sociología. En 1860, en una intervención ante la Sociedad Estadística de Londres, William Newmarch esbozó una perspectiva positivista sin duda alguna fortalecida por el primer florecimiento de la ciencia estadística. Sin embargo, sus palabras nos recuerdan que, en última instancia, una política seria debe, si busca justicia y eficacia, basarse en algo más que la intuición y las ideas preconcebidas:

Hace tiempo que la lluvia y el sol han dejado de estar bajo el gobierno de magos y adivinos; en su mayor parte, la religión ha reducido sus pontífices y prelados a simples ministros con funciones limitadas [...] y ahora, poco a poco, los hombres averiguan que todos los intentos de elaborar o administrar leyes que no se apoyen en una perspectiva precisa de las circunstancias sociales del caso, no son ni más ni menos que impostura en una de sus formas más peligrosas y gigantescas.

“El delito –añadía William Newmarch– ya no se reprime con pura severidad”.²³ Lo cierto es que en la actualidad se puede comprobar que hay razones para esperar que los efectos (sobre la conducta promedio y no individual) de la “pura severidad” pueden ser difíciles de prever o valorar si no admitimos que las decisiones que tomamos, sobre esto y sobre muchas más cosas, son consecuencia de nuestras relaciones con los demás y de los pactos a los que llegamos con ellos.

EL GOBIERNO DE LA MINORÍA

Evidentemente, los votantes esperan acabar en la mayoría. De igual modo, el tipo de interacciones sociales que hemos considerado para el delito y el matrimonio suelen conducir a formas normativas de comportamiento: si el matrimonio es *lo normal*, habrá más personas que se casen. Pero hay

muchas situaciones en las que preferiríamos hacer lo que todos los demás *no hacen*: queremos pertenecer a la minoría y cuanto más pequeña sea esa minoría, mejor. Si vamos en coche a trabajar queremos escoger una ruta que otros no cojan para evitar el tráfico. Si vendemos nuestra casa, queremos esperar a un mercado de vendedores, es decir, hasta que haya más posibles compradores que vendedores. Así podremos pedir más por ella.

El economista Brian Arthur descubrió una versión del “problema de la minoría” en el Instituto de Santa Fe de Nuevo México, adonde se dirigió para estudiar problemas complejos. La llamó “el problema de El Farol”, que estudiaba cómo se podía salir una noche y pasarlo bien. El Farol era un bar de Santa Fe situado cerca del emplazamiento original del Instituto. La noche de los jueves programaba música irlandesa, lo cual suponía un gran atractivo para Brian Arthur, que era de origen irlandés, pero no sólo para él. Los investigadores del Instituto empezaron a acudir a ese local en tales cantidades que, a veces, llegaba a resultar incómodo. Finalmente, la gente empezó a no ir; la música era estupenda, pero la aglomeración no merecía la pena. Y así, algunas de las noches irlandesas de El Farol fueron relativamente tranquilas, lo cual permitió a algunos afortunados disfrutar del bar como antaño. Y aquí está el dilema: ¿hay que arriesgarse a ir a El Farol con la esperanza de pasar una *buena* noche (es decir, una noche sin aglomeraciones) o es mejor quedarse en casa? En ambos casos, a la minoría le va mejor que a la mayoría. Si quienes acuden al bar son minoría, lo pasarán en grande; si por el contrario son minoría los que se quedan en su casa, pasarán una velada tranquila, y los demás estarán agobiados en el atestado bar.

¿Cómo, se preguntó Brian Arthur de forma retórica en la conferencia que sobre el problema de El Farol dio en 1994, cabe esperar que varíe la asistencia a ese bar con el paso del tiempo? “¿Convergerá? Y en tal caso, ¿a qué? ¿Será caótica? ¿Cómo podemos efectuar predicciones?”²⁴ El problema, señaló, es que no hay una elección *correcta*: ninguna “solución que se pueda deducir racionalmente”. Ningún individuo tiene forma de saber qué es lo mejor, porque no tiene forma de saber qué harán los demás. Sólo pueden hacer conjeturas basadas en las intuiciones o presentimientos que puedan tener. Su elección la hacen basándose en cuál sea su *creencia* de lo que harán los demás.

A un economista como Brian Arthur, esta situación le resultaba familiar. Los agentes del mercado compran y venden basándose en sus creencias

acerca del mercado: si impera el optimismo (de modo que los demás compren) o el pesimismo (y todo el mundo quiera vender). Pero que los precios suban o bajen depende de lo que todo el mundo decida, en gran parte ignorando lo que los demás se proponen hacer. Brian Arthur señaló que si bien es verdad que tradicionalmente los economistas han dado por supuesto que los economistas emplean una racionalidad *deductiva* –toman decisiones basándose en soluciones a problemas bien definidos–, en general se enfrentan a problemas difusos. No existe una respuesta correcta, salvo en retrospectiva, lo cual sirve de poco. En estas circunstancias, lo único que se puede hacer es recurrir al razonamiento *inductivo*, basado en la subjetividad y la experiencia.

“Como economistas, hemos de prestar gran atención al razonamiento inductivo”,²⁵ sostiene Brian Arthur, y sugirió que el problema de El Farol ofrecía el modelo perfecto para estudiarlo. Elaboró una descripción simplificada e idealizada de la situación en la que todos los agentes emplean un amplio abanico de reglas para prever la afluencia al bar y, por lo tanto, decidir si acudir o no. Estas reglas se basan en la afluencia de días anteriores; por ejemplo, algún agente se dirá: “irán las mismas personas que la semana pasada” o “irá una media de las personas que han ido las cuatro últimas semanas”. Cada uno de los agentes aplica varias de esas reglas y decide basándose en la que mejor resultado le haya dado.

Según este modelo, las cifras de asistencia no dejan de fluctuar y de ellas no se deriva ningún patrón. Algunas noches va a El Farol sólo el treinta por ciento de los agentes; otras, el noventa por ciento. No obstante, la asistencia media es del sesenta por ciento. En otras palabras, si bien la afluencia no se estabiliza en una cifra regular, ni existe un patrón con altibajos regulares, el promedio de afluencia al bar es constante. Brian Arthur comparaba esto con un bosque cuyos límites se quedan fijos mientras sus árboles crecen y mueren. Ahora bien, ¿por qué el sesenta por ciento? Porque ése es el número que, de manera arbitraria, Brian Arthur escogió para designar el límite tolerable. Si la afluencia al bar superaba el sesenta por ciento, el bar estaba demasiado lleno y era mejor quedarse en casa. Por lo tanto, de media, los agentes *encuentran* automáticamente el nivel óptimo de asistencia, aunque no haya norma que lo garantice.

En 1997, los físicos Damien Challet y Yi-Cheng Zhang, de la Universidad de Friburgo, elaboraron un modelo mejor definido del problema de El Farol que llegó a ser conocido como “el juego de la minoría”, un

juego en el que el agente *gana* cuando termina en minoría. En el modelo de Arthur, las estrategias que cada agente emplea para llegar a una decisión eran más o menos arbitrarias. En el juego de la minoría, su definición es más sistemática. Todos los agentes llevan un registro de cuál de las dos opciones (ir al bar o quedarse en casa) fue la que la mayoría escogió en las *rondas* previas (es decir, en las noches previas). Este registro –que puede escribirse como una hilera de dígitos binarios como los unos y los ceros de la lógica informática– se tiene en cuenta en el diseño de una estrategia de toma de decisiones para la siguiente ronda. Por ejemplo, una estrategia podría decir que si quienes fueron al bar la vez anterior eran minoría, el agente debía ir a El Farol al día siguiente, pero todos los agentes cuentan con varias estrategias a su disposición y en cada momento emplean la que hasta el momento ha sido más fructífera.

Challet y Zhang observaron que el promedio de afluencia era del cincuenta por ciento: de media, la mitad de los agentes iba al bar y la otra mitad se quedaba en casa.* De modo que, a primera vista, parece que los agentes se organizan muy bien por sí solos. Aunque los agentes no puedan idear ningún plan colectivo, de media, la *minoría* es todo lo grande que puede ser –que es básicamente lo mismo que decir que tiene el mismo tamaño que la *mayoría*–. Pero en realidad, ¿qué *eficiencia* tiene el juego? Una vez más, las cifras de afluencia varían constantemente por encima o por debajo de la media (véase figura 13.9a). En realidad, cada fluctuación supone que *podrían* haber *ganado* (estado en minoría) más agentes de los que lo han hecho. Cuanto mayores las fluctuaciones, mayor *ineficiencia* tiene el juego.

Los investigadores se percataron de que las fluctuaciones son cada vez más pequeñas a medida que las estrategias tienen en cuenta un número mayor de rondas anteriores –esto es, a medida que la memoria de los agentes mejora, o, también, a medida que se hacen más listos–. Además, la eficacia del juego aumenta –el tamaño de las fluctuaciones decrece– si se permite que los agentes *evolucionen* de una forma darwiniana, de modo que los que más éxito tienen se multipliquen y los peores jugadores (los que más veces acaban en la mayoría) desaparezcan (véase figura 13.9b). En este caso, la población es capaz de *aprender* a jugar bien.

* En este modelo, las dos opciones tienen el mismo peso. Básicamente, lo que todo agente quiere es pertenecer a la minoría, esto es, al grupo al que pertenecen menos de la mitad de los agentes.

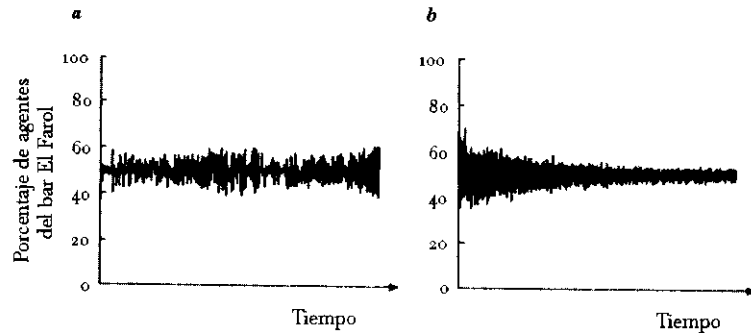


Figura 13.9. En el juego de la minoría, la proporción de agentes que toma una de las dos opciones que se les plantean (ir a El Farol o quedarse en casa) fluctúa en torno a un cincuenta por ciento (a). En un mundo ideal, la minoría siempre sería lo más grande posible –esto es, lo más cerca del cincuenta por ciento como se pueda–. Pero a causa de las fluctuaciones, la minoría suele ser más pequeña; es decir, el juego no es *eficiente*. Si, pese a todo, los agentes que peores estrategias siguen son eliminados del juego en un proceso paulatino, las fluctuaciones se hacen cada vez más pequeñas; es decir, la eficiencia del juego mejora (b).

El juego de la minoría guarda sólo un parecido superficial y metafórico con los mercados económicos. En realidad se podría argumentar que los agentes del mercado se esfuerzan muchas veces por ser *mayoría*, tal como evidencia su inclinación a las conductas gregarias (página 256). No obstante, incorpora bastantes características de los mercados reales –competencia y conducta *egoísta*, comprobación empírica y el uso de una amplia gama de estrategias, la necesidad de tomar decisiones basándose en datos limitados– para que resulte tentador aplicar el juego de la minoría a los fenómenos económicos. Damien Challet y Yi-Cheng Zhang han modificado su modelo para que reproduzca más estrechamente las condiciones del mercado de trabajo y yo lo he usado para, por ejemplo, investigar los efectos de los llamados *noise traders* (agentes que toman sus decisiones basándose en las tendencias de los índices bursátiles) y del uso de información privilegiada. Han observado, por ejemplo, que el abanico de estrategias se reduce cuando se dispone de “información explotable” (información privilegiada o *interna*); lo que quiere decir que hay *mejores* formas de jugar a este juego, formas que no existen cuando todos los agentes disponen de la misma información.

Uno de los hallazgos más notables de la física de la sociedad es que, entre agentes que en realidad no son más que autómatas, puede surgir una conducta que parece extrañamente *humana*. En el capítulo VI hemos visto que es posible que a tales agentes les entre el pánico cuando intentan dejar una habitación atestada. Los israelíes Shahar Hod y Ehud Nakar han demostrado que el juego de la minoría puede reflejar otra característica humana: la indecisión. Han trabajado con una versión del juego en la que, tras sopesar los resultados de rondas pasadas, todos los agentes recurren a los mismos cálculos para escoger su siguiente movimiento. Pero la cuestión es que esos agentes no siguen necesariamente esos cálculos: lo hacen con una probabilidad que puede variar entre 1 (siempre lo siguen) y 0 (el agente siempre hace lo contrario de lo que los cálculos sugieren). La estrategia *personal* de un agente, por lo tanto, se suma a la probabilidad con la que sigue las lecciones que en apariencia dicta la historia pasada. En rondas sucesivas, todo agente aprende de la experiencia para que esa probabilidad aumente o decrezca.*

En la forma usual del juego este proceso conduce a una conducta decisiva: los agentes acaban polarizados en dos grupos extremos que, invariablemente, eligen bien prestar atención o bien hacer caso omiso de la historia. Dicho de otro modo, finalmente hay dos estrategias: o se sigue siempre lo que recomiendan los cálculos o siempre se hace lo contrario. Pero Hod y Nakar se percataron de que la situación cambia cuando los dividendos de las *buenas* y las *malas* elecciones no se corresponden: si, por ejemplo, duele más perder (pertenecer a la mayoría) de lo que agrada ganar. Este podría ser el caso cuando, por ejemplo, se escoge la mejor ruta al trabajo. Una mala elección que te lleva a un atasco y te hace llegar tarde puede suponer que te pierdas una reunión crucial o, incluso, que te despidan, mientras que una buena elección sólo significa que el día será normal. De igual manera, los agentes de un mercado deprimido pierden mucho más con un mal trato de lo que ganan con uno bueno.

Cuando los resultados arrojan esta especie de desigualdad –cuando las apuestas son muy desfavorables–, la cautela es la mejor estrategia, y las

* Que un agente haga caso omiso a las lecciones de la historia podría parecerse extraño, pero no hay garantía de que el procedimiento que un agente emplea para orientarse en futuras decisiones a partir de experiencias pasadas vaya a ser beneficioso. En el momento en que ese procedimiento parezca conducir a malas recomendaciones, el agente le atribuirá menos validez.

decisiones conservadoras mejores que las extremas. Hod y Nakar se percataron de que, en tales circunstancias, los agentes del juego de la minoría tienden a quedarse indecisos: en lugar de escoger una estrategia concreta y seguirla sin variaciones (esto es, con una probabilidad de uno o de cero), escogen una u otra de las opciones con la misma probabilidad. En general, esto significa que, con el tiempo, las recompensas son pequeñas, pero que también los peligros lo son. Los agentes que se adscriben a las conductas extremas pierden, de media, más de lo que ganan.

La conducta indecisa puede ser la mejor para cada individuo, pero hace que el conjunto de la población sea ineficiente: el tamaño medio de la minoría ganadora es menor del que podría ser. Supondría, por ejemplo, que el número medio de clientes del bar El Farol es considerablemente menor que su capacidad ideal. De hecho, el conjunto de la población consigue un promedio peor del que conseguiría si cada agente tomara su decisión de forma puramente aleatoria: los intentos de tomar decisiones por razonamiento inductivo destruyen la eficiencia global del grupo.

Ciertamente, el juego de la minoría es psicológicamente ingenuo. En realidad, no tiene en cuenta ningún tipo de psicología individual, más allá de una tosca capacidad de razonar a partir de la experiencia. Y sin embargo, de él surge un abanico de conductas grupales extraordinarias, sutiles y, con frecuencia, impredecibles. No tenemos por qué creer que, en realidad, tomamos nuestras decisiones de este modo. Basta con admitir el valor del mensaje central del modelo, que seguramente sea el siguiente: que no deberíamos imputar tan a la ligera motivaciones psicológicamente complejas a las decisiones tomadas por un grupo sin primero valorar cuánta complejidad puede surgir incluso de la descripción del proceso más básica. Nuestra forma de tomar decisiones tiene poco de obvio.

XIV LA COLONIZACIÓN DE LA CULTURA GLOBALIZACIÓN, DIVERSIDAD Y SOCIEDADES SINTÉTICAS

Hoy ya no hay franceses, alemanes, españoles, ingleses... hoy sólo hay europeos.

JEAN-JACQUES ROUSSEAU (1772)¹

Odian ser indios. Quieren ser canadienses y estadounidenses [...] Nadie nos dijo nunca que con la televisión vendría todo esto. Es como una especie de invasión del espacio exterior o algo así. Primero vino el Estado, luego las empresas petrolíferas y ahora la televisión.

CINDY GILDAY²

Director de comunicaciones
de la nación dene del Territorio
del Noroeste, Canadá

Hay demasiada gente que todavía cree en eso que decía Margaret Thatcher: NHA, No Hay Alternativa; pero deberíamos decir HMA: Hay Miles de Alternativas.

SUSAN GEORGE (2002)³

Entre los muchos y vívidos recuerdos que me ha dejado viajar por Japón está el de los anuncios en el metro de fastuosas bodas al estilo occidental con trajes de novia de color blanco. En Japón, lo que se ha impuesto, siempre que los novios puedan costearlo, es combinar una boda tradicional con kimono y una boda al estilo occidental. “Más imperialismo cultural”, mascullaba al ver esos anuncios.

En el pasado, la difusión de las creencias y los valores culturales ha estado ligada a los sueños del imperio. Hoy en día sigue un imperativo comercial. La convicción victoriana de que, sencillamente, las culturas *primitivas* no habían encontrado la forma *correcta* de comportarse, hablar y rezar está, espero, al menos, muerta y enterrada, pero ha sido sustituida por la convicción multinacional de que todavía quedan en el mundo algunos rincones que tienen que beneficiarse de las ventajas de la Coca-Cola y las hamburguesas. Pero, sin duda, la transmisión de los valores culturales de una sociedad a otra no siempre ha sido mala cosa. La arquitectura islámica del sur de España es un bello monumento a la corriente de saberes que el mundo musulmán legó al Occidente medieval. De la plaga que fue la esclavitud en el Nuevo Mundo surgió el sublime consuelo del jazz, que ha enriquecido la cultura estadounidense. Las pinturas de Van Gogh y Matisse revelan la influencia de los grabados japoneses; hoy, las discotecas de Europa entera vibran con los ritmos llegados de la India y América Latina.

Cuando una cultura se subsume en otra o las dos se fusionan en una monocultura, el mundo pierde cierto grado de diversidad y riqueza de experiencias. Por otro lado, compartir creencias y tradiciones disminuye la posibilidad de conflictos. Compartir el idioma lubrica la comunicación. Es difícil decir hasta qué punto hay decisión consciente o imposición. A veces, las naciones conquistadoras adoptan las costumbres de sus súbditos, ¿no abandonó Roma a sus dioses por el monoteísmo judeocristiano? Siempre que dos culturas se fusionan, hay intercambio de valores, de artes, de ciencia y tecnología, de costumbres y creencias, de idiomas. En el seno de estos procesos reside la historia del mundo humano, desde el asedio de Troya a la ampliación hacia el este de la Unión Europea. La historia no puede ser únicamente el estudio de las huellas dejadas por grandes hombres y mujeres, sino que, siempre, debe examinar las interacciones entre grupos numerosos de personas.

Elaborar modelos sobre cómo imitan las personas los hábitos criminales de sus vecinos o sucumben a las influencias sociales de amigos y familia es, sencillamente, intentar describir un pequeño microcosmos de los altibajos de los valores sociales y culturales. Algunos científicos quieren ampliar la visión: cómo influye la transmisión cultural en el trazado de las fronteras demográficas, políticas y lingüísticas de nuestro mundo. Es, no hace falta insistir, un objetivo formidable, pero la primera

etapa de su consecución puede ser muy sencilla. Esos investigadores abordan grandes interrogantes. ¿Qué determina la diversidad de una cultura? ¿Por qué sobreviven algunas minorías o rasgos culturales (como los idiomas vascuence y galés) y otros desaparecen? ¿Por qué, en general, dos culturas no convergen completamente cuando interactúan?

A principios del siglo XXI, estas preguntas han sido más urgentes. Las últimas guerras en los Balcanes reflejan una persistente falta de convergencia de valores y creencias que convirtieron a una nación creada *ad hoc* como Yugoslavia fatalmente volátil. En la división de Checoslovaquia, un proceso comparable resultó incruento, pero la caída de la Unión Soviética sigue teniendo dolorosas consecuencias en Chechenia y en Georgia. Una nación no puede sobrevivir sin un sentido de identidad nacional y esa identidad no puede surgir sin al menos algún grado de uniformidad cultural.

La mayoría de las guerras civiles modernas tienen un origen no muy distinto al que impelió a Hobbes a buscar un cálculo en el orden social. Estallan a partir de conflictos no resueltos que causan grietas tan profundas que lleva décadas o incluso generaciones de esfuerzo resolver. En la Inglaterra del siglo XVII, esa grieta separaba, en la superficie, a los que creían que el soberano tenía que ceder su poder absoluto y a quienes querían ver al rey convertido en un servidor del pueblo y del Parlamento. Pero detrás de esta disputa subyacía la vieja y enconada división religiosa, la misma herida que había desangrado a Europa un siglo entero. Una herida que hasta hace bien poco todavía se cobraba vidas en las calles de Irlanda del Norte.

No parece que haya nada inevitable en la convergencia de valores culturales, sociales o políticos. La cohesión de las Naciones Unidas fue puesta a prueba por las diversas actitudes de sus miembros con respecto a Kosovo y a Irak —si el bombardeo de Belgrado destacó las divergencias, la conquista de Bagdad por las tropas estadounidenses y británicas las estiró casi hasta la ruptura—. Incluso el grado, sin precedentes, de unidad internacional acerca de la guerra de Afganistán a finales de 2001 podría desaparecer antes de que de las cenizas de Kabul surja una nación estable.

Y sin embargo, por mucho que el mapa mundial parezca fragmentarse, vemos también esfuerzos por tejer nuevas uniones. La Unión Europea es un experimento ambicioso que apuesta por valores técnicos y económicos compartidos, al tiempo que intenta conservar y respetar las diferencias cul-

turales. En enero de 2002 se embarcó en su mayor experimento con la unificación de casi todas las divisas de Europa. Y el interés por los problemas medioambientales y el comercio y la salud mundiales ha impulsado la creación de grupos y organizaciones internacionales que comparten creencias que poco tienen que ver con las nacionalidades.

La estabilidad de esas uniones puede depender, a largo plazo, de que sus miembros puedan unificar puntos de vista y objetivos y de su capacidad para modificar la conducta por medio de la interacción. El tira y afloja resultante plantea cuestiones difíciles para los defensores de la diversidad. Muchos tenemos la impresión de que demasiada homogeneidad es algo lamentable, pero abogamos por unos derechos del hombre *universales* y esperamos que las naciones suscriban ciertos códigos de conducta —una tendencia que algunos han llamado “imperialismo liberal”—. La diversidad cultural nos puede complacer, pero al mismo tiempo podemos lamentar la segregación que algunas minorías étnicas creen necesaria para evitar la erosión de sus tradiciones e identidad. Si existe una división demasiado marcada entre culturas, el resultado es la persecución de los grupos minoritarios, la alienación y el descontento. Todos estos asuntos apuntan a una cuestión candente: ¿pueden las distintas culturas y credos coexistir de manera estable o es inevitable que unas engullan a otras?

CHOQUES CULTURALES

Los sociólogos han realizado una larga lista de factores para explicar por qué hay diferencias culturales que persisten mientras otras se disuelven. Parece existir una tendencia natural a buscar una identidad colectiva, lo cual depende de hasta qué punto se pongan de relieve las diferencias con el *exterior* y, a veces, puede alentar los extremismos. La difusión de ciertos hábitos y modas, por el contrario, puede provenir de un deseo de adaptarse. Las lenguas evolucionan y llegan a diferenciarse, en parte, a causa de una inevitable deriva aleatoria que resulta de una acumulación de pequeños cambios: el equivalente de las mutaciones aleatorias darwinianas. Por su parte, la compatibilidad tecnológica y lingüística facilita en gran parte el intercambio de ideas, que el aislamiento geográfico puede coartar.

Estas consideraciones sugieren que la transmisión de ideas culturales depende del territorio común que ya se comparta. Compartir un idioma

facilita el intercambio enormemente, aunque, por sí solo, no garantiza la convergencia —me viene a la cabeza un comentario apócrifo atribuido a George Bernard Shaw: Gran Bretaña y Estados Unidos están “divididos por una lengua común”.*


Robert Axelrod ha elaborado un modelo basado en la interacción que pretende esbozar un perfil general de la difusión de las culturas y las costumbres. El presupuesto central de este modelo es que la semejanza fomenta la semejanza: a Axelrod no le preocupan los detalles del intercambio cultural, se limita a decir que es más probable cuanto más se ha producido. En otras palabras, existe una retroalimentación positiva en la convergencia cultural de los agentes interactivos.

Robert Axelrod imagina un mapa dividido en una retícula regular con un *agente* en cada celda. Esos agentes no son individuos, sino subpoblaciones que habitan una región geográfica —un pueblo, tal vez, o un barrio—. Todos ellos poseen determinados *rasgos* culturales: una artesanía común, por ejemplo, o un método propio de cultivo, o un dialecto local. Puede haber muchos rasgos de ese tipo y, en realidad, lo normal es que sean muy numerosos y difíciles de definir y desentrañar. No obstante, parece razonable suponer que, en cierto sentido, toda cultura puede identificarse mediante una relación cuidadosamente elaborada de esos atributos.

A cada rasgo cultural, Axelrod le adscribe cierto número de variaciones. Por ejemplo, su modelo del mundo podría incluir cinco idiomas distintos: cinco “valores” distintos del “rasgo lenguaje”. A las distintas versiones de un solo rasgo las llamaré “modalidades”. Axelrod da por supuesto que entre dos modalidades cualesquiera de un mismo rasgo existe la misma diferencia. Evidentemente, se trata de una simplificación. Por ejemplo, las bases tecnológicas de las sociedades británica y japonesa son diferentes, pero, obviamente, más parecidas de lo que cualquiera de las dos se parece a la base tecnológica de Bhután. Italianos y españoles casi pueden entender su idioma entre sí; ambos sufren una desventaja comparable y considerable a la hora de comprender el alemán. Pero, al fin y al cabo, se trata de un modelo simple, mínimo.

* Aunque es posible que el mérito sea de Oscar Wilde: “Realmente tenemos todo en común con Estados Unidos excepto, por supuesto, el idioma”. Oscar Wilde, *El fantasma de Canterville* (1877).

74741	87254	82330
01948	09234	67730
49447	46012	42628



74741	87254	62330
01948	09234	67730
49447	46012	42628

Figura 14.1. En el modelo de diseminación cultural de Robert Axelrod, cada celda de una retícula regular representa a una cultura local con un número concreto de rasgos (en este caso, cinco). Cada rasgo recibe uno de diez “valores” (0-9). Si dos celdas adyacentes comparten uno o más valores, pueden converger por alineamiento de uno de los valores distintos existentes. Es el paso que aparece aquí en las dos celdas sombreadas en gris.

Todas las celdas de la retícula del modelo están etiquetadas con un conjunto de valores para cada rasgo. La figura 14.1 muestra una pequeña parte de una retícula para una versión del modelo con cinco rasgos culturales, cada uno de los cuales puede tomar uno de diez valores (etiquetados del 0 al 9; no obstante, recordemos que los números no tienen significado cuantitativo). La transmisión de valores culturales, por tanto, tiene lugar por iteración del siguiente procedimiento:

1. Escoger una celda al azar y escoger una de las celdas vecinas aleatoriamente. (En una retícula cuadrada hay cuatro vecinos.)
2. La probabilidad de interacción entre las dos celdas depende de su similitud cultural. Si no comparten rasgos con el mismo valor (esto es, si no comparten modalidades), no habrá interacción. Si comparten un rasgo, interactuarán con una probabilidad de, digamos, uno entre diez. Si dos rasgos son iguales, la probabilidad podría ser de uno entre cinco.
3. La “interacción” consiste en igualar un rasgo –escogido al azar– de la celda escogida con el rasgo correspondiente de la celda vecina. En otras palabras, las dos culturas se hacen todavía más parecidas.

La figura 14.1 describe un paso sencillo como éste. La consecuencia, evidentemente, es que las dos celdas se asemejen cada vez más. Podría

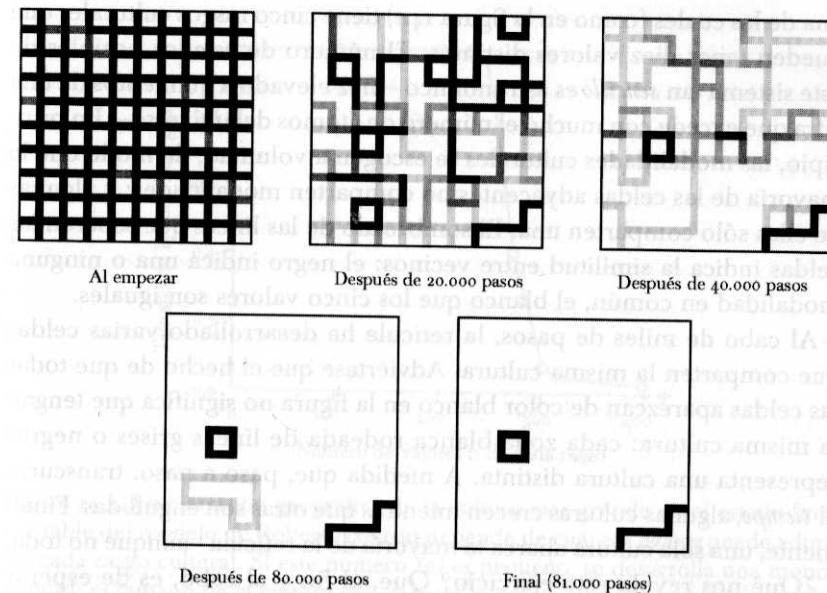


Figura 14.2. Simulación de una difusión cultural en una retícula de 10 x 10. Cada celda aparece en blanco y las líneas negras y grises separan regiones cuyos rasgos culturales difieren en al menos un aspecto. El color de la línea define el grado de diferencia; el negro representa la diferencia total en los cinco rasgos. A medida que la simulación avanza, las diferencias se van perdiendo hasta que sólo quedan tres *islas* culturales: dos pequeñas rodeadas de una grande. Seguir cambiando se hace imposible porque las culturas que son distintas en todo no pueden interactuar.

parecer, por lo tanto, que el resultado final está condicionado: la erosión gradual de las diferencias y la difusión de una monocultura. A veces es esto lo que se observa, pero no siempre. El modelo puede alcanzar estados estables en los que regiones culturalmente distintas persisten hasta que ya no son posibles más cambios. Si, por ejemplo, una región de celdas de una cultura apareciera en mitad de otra cultura con la que no tiene rasgos en común, las dos no pueden interactuar, de modo que la *isla* cultural se mantiene, por mucho que la cultura que la rodea siga extendiéndose hasta dominar el resto de la retícula.

La figura 14.2 muestra la aparición de dos islas de diversidad en una monocultura *global*. Aquí, la retícula está compuesta por cien celdas, cada

una de las cuales (como en la figura 14.1) tiene cinco rasgos culturales que pueden tener diez valores distintos. El número de estados posibles de este sistema tan *sencillo* es astronómico —diez elevado a quinientos da una cifra que excede con mucho el número de átomos del universo—. En principio, las modalidades culturales se escogen a voluntad, de modo que la mayoría de las celdas adyacentes no comparten modalidades; y algunas de ellas sólo comparten una. El sombreado de las líneas que separan las celdas indica la similitud entre vecinos: el negro indica una o ninguna modalidad en común, el blanco que los cinco valores son iguales.

Al cabo de miles de pasos, la retícula ha desarrollado varias celdas que comparten la misma cultura. Adviértase que el hecho de que todas las celdas aparezcan de color blanco en la figura no significa que tengan la misma cultura: cada zona blanca rodeada de líneas grises o negras representa una cultura distinta. A medida que, paso a paso, transcurre el *tiempo*, algunas culturas crecen mientras que otras son engullidas. Finalmente, una sola cultura abarca la mayoría de la retícula —aunque no toda.

¿Qué nos revela este ejercicio? Que, al fin y al cabo, es de esperar que la retícula desarrolle mayor homogeneidad solamente del modo en que se establecen las reglas. Pero comprobamos que esto no tiene por qué llevar a la completa erradicación de la homogeneidad cultural. Además, podemos utilizar el modelo para deducir algo de la dependencia de la diversidad persistente con respecto a la diversidad inicial. Supongamos, por ejemplo, que quisiéramos incrementar el número de valores de un solo rasgo cultural, permitir, por ejemplo, que un rasgo tenga quince modalidades en lugar de diez. ¿Qué consecuencia tiene esto en el número de zonas estables (el número de *países*, dialectos locales o lo que sea) de la retícula final e inmutable?

Pero, ¿qué podíamos esperar? Lo razonable era esperar que incrementando el potencial de diversidad de esta manera, se incremente la diversidad del mapa final, que habrá más regiones estables. Y eso es todo lo que se encuentra. Con diez valores por rasgo, el número medio de regiones estables en una retícula de diez por diez y puesto que muchos modelos funcionan a partir de muchas configuraciones, es de 3,2. Con quince valores por rasgo, este promedio se eleva a veinte. Si, por otro lado, reducimos el número de modalidades a cinco, el número medio de regiones estables será de sólo uno: creamos las condiciones para una monocultura.

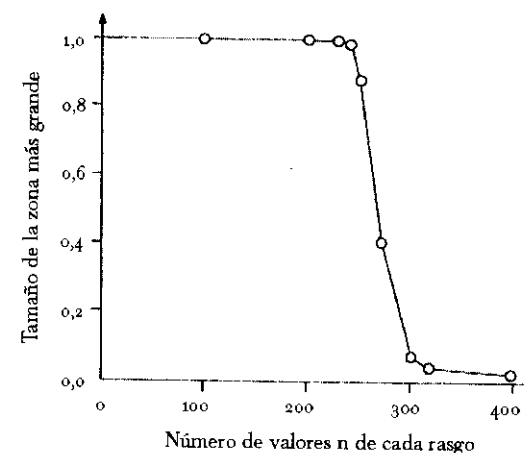


Figura 14.3. La extensión geográfica de la cultura más grande en el estado final y estable del modelo de Robert Axelrod depende de cuántos *valores* puede adoptar cada rasgo cultural. Si este número (*n*) es pequeño, se desarrolla una monocultura: el tamaño de la cultura más grande es más o menos igual al tamaño de toda la retícula. Si *n* es grande, incluso la cultura más grande parece insignificante en relación con toda la retícula —hay una gran diversidad cultural—. El cambio entre esos dos extremos no es gradual, sino súbito, tiene las características de una transición de fase. En este ejemplo, la transición de fase se produce cuando *n* tiene un valor en torno a doscientos cuarenta.

Hasta aquí, todo predecible. Pero Alessandro Vespignani y sus colegas del Centro Internacional de Física Teórica Abdus Salam de Trieste examinaron con más detalle si, en el modelo de Axelrod, la diversidad final depende del número de modalidades (llamémoslo *n*). Descubrieron algo inesperado: el paso de una monocultura (para un *n* pequeño) a una policultura (para un *n* grande) no es gradual sino brusco. Para ilustrar esto, midieron el tamaño de la zona más grande cuando *n* varía. Para un *n* pequeño, esta zona abarca más o menos toda la retícula. Para algún valor crítico de *n*, la región más grande se hace espectacularmente más pequeña hasta que ocupa una proporción insignificante de la retícula que en realidad no es muy distinta de todas las otras regiones (véase figura 14.3). Este cambio repentino tiene las características de una transición de fase genuina entre un estado fragmentado y otro uniforme, parecido a la transición de un sólido, ordenado, a un líquido, desordenado.

Cerca de la transición de fase, las ligeras diferencias en la diversidad cultural de un territorio (esto es, en n) pueden tener un importante efecto en el número de culturas distintas que puede respaldar.*

Además, estos investigadores observaron que, dentro del alcance de N donde se produce el cambio rápido —esto es, dentro de la zona de transición—, la distribución de tamaños de las regiones estables sigue una ley de potencias. Es el mismo comportamiento que encontramos para la distribución de tamaños de distintos dominios (por ejemplo, gaseosos y líquidos) en un punto crítico (capítulo X). Así pues, el modelo de Axelrod tiene varias características en común con algunos sistemas físicos simples de partículas en interacción. Y estas características no son obvias: no podríamos predecirlas sólo con observar las reglas del juego.

Pero hay más sorpresas. Supongamos que introducimos mayor diversidad de otro modo, aumentando el número de rasgos culturales distintos. Así, cada celda estará caracterizada no por una hilera de cinco números, sino, por ejemplo, de diez. ¿Incrementará esto la variación cultural del estado final? Ni mucho menos. En una retícula de diez por diez con diez rasgos cada uno, de los cuales puede tomar diez valores, la media de zonas estables es uno. Recordemos que para cinco rasgos es de 3,2. Para quince modalidades por rasgo, un modelo de cinco rasgos da una media de veinte regiones, mientras que un modelo de diez rasgos da una media de sólo 1,4, y un modelo de quince rasgos da una media de sólo 1,2. Al contrario de lo que dice la intuición, incrementar la diversidad potencial de este modo *reduce* la resistencia del modelo a la absorción monocultural.

¿Cómo puede ser? La respuesta no es difícil de averiguar. Recordemos que las celdas adyacentes sólo pueden interactuar si comparten uno o más rasgos. Esas interacciones fomentan la homogeneización. Cuanto mayor el número de rasgos, mayor la oportunidad de que uno de ellos coincida con los de un vecino, de ahí que aumente el potencial

* Konstantin Klemm y sus compañeros del Instituto Niels Bohr de Copenhague han examinado con detenimiento la transición de una policultura a una monocultura y hallado que está modificada por la aleatoriedad. Si existe alguna oportunidad de que algún rasgo cultural cambie sin que nadie provoque ese cambio —un efecto que los antropólogos llaman “deriva cultural”—, el tapiz policultural corre el riesgo de convertirse en una monocultura incluso para un n alto. Esto es lo mismo que decir que la policultura puede ser metaestable y que una monocultura es el estado más estable. Así pues, el comportamiento del modelo depende muy sutilmente de las condiciones en que se desarrolla.

de interacción. Por el contrario, como el número de *modalidades* permitidas se incrementa para cada rasgo, la oportunidad de que coincidan disminuye —igual que dos personas tienen menos probabilidades de escoger el mismo número entre uno y quince que entre uno y cinco. Así pues, incrementar el número de versiones de cada rasgo cultural disminuye la oportunidad de interacción. La comunicación verbal puede ser más difícil en la India, por ejemplo, donde hay muchos dialectos locales, que en Estados Unidos, donde predomina el inglés por encima de las demás lenguas.

Las cifras del modelo no se corresponden en absoluto con las del mundo real, pero, a pesar de su simplicidad, el modelo arroja dos conclusiones que se pueden generalizar. En primer lugar, no está claro de qué hablamos cuando hablamos de la “complejidad” de una cultura. Es posible que las culturas más sofisticadas tecnológicamente de Occidente tengan mayor diversidad que las culturas de los países en desarrollo en términos de número de *modalidades*: nos identificamos por un buen número de trabajos especializados, el tipo de coche que conducimos, los muchos tipos de música que escuchamos, el amplio abanico de rentas, etcétera. Pero no está claro que en la vida real las culturas difieran en el número de *rasgos* que las caracterizan. La mayoría de los rasgos de la cultura occidental, como la música, el transporte, el arte, la religión y la lengua, tienen análogos directos en Bangladesh y Camboya. En primer lugar, es relevante que un abanico de modalidades tenga distintas consecuencias que un abanico de rasgos. Y, segundo, el modelo de Robert Axelrod nos dice que no tenemos por qué confiar necesariamente en la intuición cuando valoramos cuán fácil le resulta expandirse a una cultura.

El modelo también puede ayudar a explorar la influencia del tamaño del territorio global. ¿Qué ocurre si ampliamos la retícula de diez por diez a cien por cien o la encogemos a cinco por cinco? La intuición sugiere que el número de zonas estables se incrementará a medida que la retícula se expanda: si podemos encajar 3,2 zonas en una retícula de diez por diez, ¿no cabe esperar que ese número se multiplique por cien en una retícula de cien por cien? Una vez más, el sentido común nos despierta. En efecto, el número de zonas estables desciende cuando la retícula se hace más grande. Para una retícula de doce por doce con cinco rasgos y quince modalidades por rasgo, hay un promedio de veintitrés regiones estables. Para una retícula de cincuenta por cincuenta, el número

desciende a seis y para una retícula de cien por cien no hay más que dos. Esto contrasta, por ejemplo, con los efectos del tamaño en la biodiversidad: por ejemplo, en una isla hay menos especies que en un continente porque el número de nichos evolutivos es menor.

En la figura 14.2 pudimos ver cómo surgen las regiones estables de una especie de *descongelación* gradual del modelo. Las dos culturas pequeñas que quedan en ese ejemplo están congeladas por la imposibilidad de interactuar con sus vecinos a través de los límites. Pero, ¿y si hubiera zonas distintas, no congeladas, con las que interactuar, más allá de la retícula? Esto podría extender su influencia a la retícula de diez por diez, recomponiendo las celdas que la forman y resucitando la posibilidad de interacción con las zonas *isla*. Esto es lo que ocurre en las retículas grandes: las interacciones no paran, así que hay menos probabilidades de que el mapa se congele y quede una configuración con muchas regiones. Pero las retículas más pequeñas también son presa de las monoculturas, porque, como en las islas oceánicas, no hay sitio suficiente para acomodar tanta diversidad. Al parecer, existe un tamaño territorial *óptimo* que apoyará un gran número de regiones estables, como si existiera un número ideal de naciones-estado que un continente pudiera acomodar.

Un mapa del mundo es un tapiz peculiar e irregular. La mayoría de las naciones africanas son más grandes que la mayoría de los países europeos; ¿es coincidencia que dos de las más pequeñas, Ruanda y Burundi, hayan sufrido hace poco la mayor agitación? Asimismo, los países de Europa occidental, más grandes, han gozado de más estabilidad que los de Europa oriental, más pequeños. ¿Y por qué los países de África occidental son más pequeños que los del este y el sur del continente? Aunque se puede responder que por motivos históricos, parece que el modelo de Axelrod podría expresar algún principio más general acerca de la probabilidad que continentes o regiones geográficamente distintas tienen de trazar sus fronteras nacionales y las consecuencias que esto pueda tener.

LA TIERRA DEL AZÚCAR Y LAS ESPECIAS

Se podría objetar que este modelo es demasiado (absurdamente) simple para que pueda guardar alguna relación con lo que ocurre en el mundo

real. Pensemos en lo que omite: las influencias geográficas, los efectos del cambio tecnológico, los medios de comunicación, los distintos sistemas organizativos y de gobierno, el turismo... Se puede pensar en la forma de que el modelo incluya algunas de esas influencias (y es algo que, probablemente, se hará con el tiempo), pero queda por contestar una pregunta más general: puesto que cualquier asunción que se haga siempre estará teñida de cierta arbitrariedad, ¿por qué íbamos a confiar en las conclusiones que se deriven? Es una objeción justa, y para abordarla, Robert Axelrod ha observado si las predicciones generales del modelo se pueden transferir a otros modelos culturales elaborados sobre otro conjunto distinto de presunciones. Con este fin se ha aventurado en el mundo de *Sugarscape*.

Desde su lanzamiento al mercado a principios de los años noventa, *SimCity* se ha convertido en un juego de ordenador de culto. El objetivo del jugador es erigir y mantener una ciudad entera. Se tiende una red eléctrica, se alimenta a sus habitantes, se llevan a cabo reparaciones y labores de mantenimiento. Juegas a ser Dios sólo para descubrir qué mundano, exasperantemente intrincado y totalmente compulsivo es. *Sugarscape* es como un *SimCity* del siglo XVIII. Lo idearon Robert Axtell y Joshua Epstein, de la Institución Brookings, como banco de pruebas multipropósito de las teorías sociales. Supongamos que alguien afirma que, aplicadas en determinada sociedad, esta ley o aquella normativa se resolverán con un resultado en particular. Pues bien, se puede simular el proceso en *Sugarscape* y ver si la predicción se cumple. "Nuestras normas erigen los acantilados contra los que nos estrellamos -afirman los investigadores-. Programas informáticos como *Sugarscape* pueden ser los faros que nos permitan proyectar, si bien toscamente, las consecuencias a largo plazo de ciertas normas".⁴

Sugarscape es otro mundo reticular, pero su retícula está impresa sobre un objeto en forma de donut, un "toro". Esta forma tan peculiar tiene por objeto eliminar los límites, lo que facilita la computación y elimina los efectos *de borde*.* Las celdas de la retícula están habitadas por agentes, pero en general de forma dispersa -en *Sugarscape* sobra espacio-. Los agentes tienen un impulso básico: buscar azúcar. La caña de azúcar es

* A veces sería deseable conservar los efectos *de borde* en modelos como éste, por ejemplo para comprender mejor cómo cambian las culturas en una frontera.

distribuida de una forma determinada sobre la retícula y los agentes se mueven hacia la celda que, dentro de su campo de visión, más contenga. Allí la cortan y la consumen. En el mismo lugar, con el tiempo, crecerá más azúcar. Los agentes también interactúan, ¡vaya que si interactúan! Unas reglas concretas les permiten luchar, comerciar, trabajar, intercambiar rasgos culturales y mantener relaciones sexuales (al fin y al cabo, ¿qué más hacemos en la vida?). En cierto modo, las interacciones culturales se parecen a las del modelo de Robert Axelrod. Los agentes tienen un conjunto de atributos culturales que pueden equipararse durante la interacción a través de un proceso de selección aleatoria. Con frecuencia, los agentes formarán alianzas tribales (*naciones*) en las que las características culturales se fusionan según la norma de que todos adoptan el atributo más común.

Se trata de un modelo extremadamente complejo y sirve para simular todo tipo de escenarios. Se pueden observar los efectos de una escasez de azúcar: ¿precipitará la guerra o la cooperación *internacional*? Joshua Epstein afirma: “Pensamos en nuestro modelo como en un laboratorio de ciencia social [...] Podemos examinar el aumento de la población y las migraciones, el hambre, las epidemias, el desarrollo económico, el comercio, los conflictos y otras cuestiones sociales”.⁵ Los investigadores pueden incluso examinar la evolución y cómo las fuerzas sociales dan forma a los patrones de apareamiento. *Sugarscape* es como una fantástica elaboración del ajedrez donde las piezas toman sus propias decisiones y tienen sus propios miedos y deseos.

Un escenario, por ejemplo, se ocupa del desarrollo del comercio. Aquí, Axtell y Epstein introducen un segundo recurso: la especias. Los agentes pueden tener distinto apetito de azúcar y especias, así que unos comercian por un producto y otros por otro. Están programados para obedecer ciertas reglas de puja e intercambio, a partir de las cuales quedan fijados los precios según la interacción de la oferta y la demanda. Si los agentes se *humanizan* dándoles una vida finita y preferencias en desarrollo, los mercados nunca alcanzarán el equilibrio, sino que fluctuarán constantemente.

El comercio hace cosas muy interesantes con el paisaje cultural. Permite que sobrevivan más agentes: los individuos pueden adquirir lo que necesitan donde, de no haber comercio, se habrían muerto de hambre. Pero también fomenta una distribución desigual de la riqueza, de modo que la mayoría de los agentes sean pobres mientras un pequeño número

de ellos acumula grandes riquezas. Es la ley de Pareto (página 290) evocada por un juego de ordenador. Algunos economistas han afirmado que esta distribución de ley de potencias emergente representa una especie de propiedad inmutable para una sociedad que fomenta el intercambio. *Sugarscape* puede ayudar a estudiar hasta qué punto es inmutable frente a condiciones sociales y económicas cambiantes. El modelo podría, por ejemplo, emplearse como banco de pruebas donde investigar una redistribución de la riqueza más equitativa.

Es posible que *Sugarscape* encarne el mundo brutal que vislumbró Thomas Hobbes: se puede aproximar a su temible Estado Natural. Axtell y Epstein simulan la guerra permitiendo que un agente tome la posición que otro ocupa —básicamente para matar a su adversario y hacerse con los despojos—. Esto podría ocurrir, por ejemplo, si el agente victorioso es *mayor* o más poderoso que el agente derrotado. Normalmente, *Sugarscape* manifiesta esa superioridad mediante una mayor acumulación de azúcar, lo cual significa que el agente más fuerte está mejor alimentado y aprovisionado. Si en el mundo de Hobbes todos los hombres tienen que mirar por sus intereses, puesto que cada uno se sitúa frente a todos sus vecinos, a los creadores de *Sugarscape* les ha interesado más simular contiendas entre grupos rivales en las que se enfrentan ejércitos enteros de agentes. En tales circunstancias la acumulación da seguridad, de modo que la guerra se lleva a cabo mediante la cooperación de grupo. Dependiendo de las reglas del combate, los investigadores se percatan de que pueden generar rápidos *blitzkrieg* para tomar territorios y librar guerras de desgaste en las trincheras.

Axtell y Epstein no afirman que el suyo sea un modelo de la sociedad industrializada; en vez de ello sugieren que es una nueva forma de hacer ciencia social. A veces, los comportamientos que surgen de *Sugarscape* son extraordinariamente complejos, pero las reglas generativas que guían el comportamiento de los agentes son bastante simples. ¿Es posible, se preguntan Axtell y Epstein, que en el mundo real suceda lo mismo? ¿Podrían las conductas enormemente diversas que estudian las ciencias sociales estar basadas en principios muy sencillos? “Imaginemos”, dicen,

que hemos iniciado la discusión tras poner en marcha un modelo que muestra a un montón de agentes que se dirigen a las montañas de azúcar y que, de pronto, les preguntamos: “¿Qué pasa aquí?”

¿Alguien habría adivinado que todos los agentes siguen una regla muy sencilla? Nos parece que no habríamos podido adivinarlo. Pero, en realidad, no ocurre nada más que eso. No es posible que algo comparablemente más sencillo sea “todo cuanto ocurra” en otros sistemas complejos como los mercados de valores o los sistemas políticos?⁶

En 1996, Robert Axelrod y su compañero de la Universidad de Michigan Michael Cohen se pusieron en contacto con Axtell y Epstein para ver si podían *alinear* su modelo de difusión cultural con *Sugarscape*. Se preguntaban si, en el caso de equiparar ambos modelos lo más posible, generarían los mismos resultados. Esto suponía, por ejemplo, que el número de rasgos y modalidades culturales tuviera que ser el mismo en ambos modelos, que, además, debían tener el mismo tamaño y la misma forma. Esto nivelaba el terreno de juego, pero no convertía en idénticos a los modelos, porque las normas de interacción diferían. Y, sin embargo, el resultado del ejercicio confirmó lo esperado: *Sugarscape* tenía el mismo número de regiones estables que el modelo de Axelrod, cuando la diversidad cultural (el número de rasgos y modalidades) y el tamaño de la red se acomodaban.

Para *Sugarscape* se están planeando cosas muy ambiciosas. En una colaboración llamada Proyecto 2050, en la que intervendrán el Instituto Brookings, el Instituto de Santa Fe y el Instituto de Recursos Mundiales de Washington, el modelo se empleará para elaborar recomendaciones políticas sobre crecimiento de población, empleo de recursos, migración, desarrollo económico y otros asuntos sociales, con el fin de identificar caminos hacia el desarrollo sostenible del mundo. Cuestiones tan difíciles requieren un modelo complejo y multifactorial. Cuando se alcanza ese nivel de complejidad, cualquier analogía directa con los modelos de interacción de partículas de la física es difícil de sostener. Sin embargo, cabe esperar –y el estudio de *alineación* de modelos de Axelrod apoya la idea– que incluso en las sociedades artificiales más complejas hay un núcleo de lo que podríamos considerar como “la inevitable física”: formas de comportamiento colectivo sólidas, como las transiciones de fase y las leyes de potencia, que surgen a partir de un amplio abanico de condiciones plausibles. En los modelos sencillos es más fácil ver estas cosas, y con mayor claridad.

Muchos sociólogos cifran en ello sus esperanzas. *Sugarscape* es un ejemplo más de un amplio abanico de modelos por ordenador cuyo objetivo es proporcionarnos una mayor comprensión de la forma en que surgen las estructuras, instituciones, conductas y tradiciones sociales desde la base, cuando se considera de qué forma interactúan los individuos a escala local. A estos modelos se les llama modelos de agentes, y en capítulos anteriores hemos visto que se aplican a fenómenos como el comercio, el crecimiento empresarial y el tráfico peatonal. Se han empleado también para predecir el avance de los trayectos en balsa (*rafting*) por el río Colorado en el Parque Nacional del Gran Cañón, a fin de elaborar un horario más racional y eficiente.

Thomas Schelling fue uno de los pioneros modernos de este enfoque y Herbert Simon cree que puede encerrar la clave de una sociología más rigurosa. En principio, los modelos de agentes deberían permitir que algunas de las grandes cuestiones sociales y políticas de nuestro tiempo, como si la globalización económica conducirá a una mayor armonía o al aumento de los conflictos culturales, fueran accesibles al experimento racional. Hay sociólogos, sin embargo, que mantienen su escepticismo, porque sospechan que cualquier modelo de un fenómeno social basado en agentes particulares se arriesga a extraer conclusiones que dependen de los presupuestos subyacentes del propio modelo. ¿Cómo saber si un conjunto de reglas o presunciones dará como resultado una conducta verdaderamente representativa y no a una caricatura excesivamente tosca de la situación real? En pocas palabras, esos modelos no podrían proporcionarnos una base sólida para la política hasta que distingamos lo contingente de lo relevante, qué nos ofrece un modelo en particular con respecto a los modelos anteriores. Es algo que la física ya conoce. Es la diferencia entre un modelo de partículas en movimiento que se congelan a 0°C y la conciencia de que hay estados sólidos y líquidos de la materia separados por una transición de fase. Es la distinción entre un modelo de la sociedad y una física de la sociedad.

XV
QUÉ PEQUEÑO ES EL MUNDO
ENTRAMADOS QUE NOS UNEN

Considero extraordinariamente fructífera esa idea de que habría que explicar la vida social, no a partir de las ideas de quienes participan en ella, sino de las causas más profundas que no percibe la conciencia, y creo también que esas causas habría que buscarlas sobre todo en la forma de acuerdo a la cual se asocian los individuos.

ÉMILE DURKHEIM (1879)¹

Esta historia tiene varias moralejas. Quizá la más importante sea que, sencillamente, sus amigos no son normales. Los amigos de uno nunca son normales.

MARK NEWMAN (2001)²

En 1941, el actor estadounidense Eddie Albert apareció en *The Wagons Roll at Night* [*Los carros ruedan de noche*], película que protagonizaba Humphrey Bogart. Poco conocido hoy en día fuera de Estados Unidos, Eddie Albert nunca fue una gran estrella, aunque fue candidato a un Oscar por *Vacaciones en Roma* (1953), que interpretó junto a Audrey Hepburn y Gregory Peck. A los espectadores estadounidenses quizá les resulte más conocido por la serie televisiva *Granjero último modelo* (1965-1971), que todavía se sigue emitiendo en algún lugar del mundo. Pero Eddie Albert seguía trabajando en Hollywood cincuenta años después de *The Wagons Roll at Night*, y en 1989 apareció en *The Big Picture* [*La gran película*], con Kevin Bacon.

Por lo tanto, Eddie Albert es el enlace crucial que da a varios actores famosos de antaño un “Número de Bacon” muy bajo. El número de Bacon

es el número más pequeño de películas que conectan al actor en cuestión con Kevin Bacon, donde cada película une a dos de los actores de la cadena. Eddie Albert tiene un número de Bacon de uno, porque apareció en una película con Kevin Bacon; Humphrey Bogart tiene un número de Bacon de dos, porque apareció en una película con Eddie Albert, que apareció en una película con Kevin Bacon. James Dean y Ronald Reagan también tienen un número de Bacon de dos gracias a Albert, que protagonizó con ellos el drama televisivo *I'm a Fool [Soy un estúpido]* (1953). Errol Flynn está vinculado con Bacon a través de Albert, que compartió la pantalla con Flynn en *Las raíces del cielo* (1957).

El juego de Kevin Bacon se convirtió en uno de los juegos favoritos de los aficionados al cine y de los estudiantes universitarios en la década de 1990. El objetivo era encontrar el camino más corto hasta Kevin Bacon —el número de Bacon más bajo— de cualquier actor de cine. Pero, ¿por qué Kevin Bacon? Al igual que Eddie Albert, se hizo famoso por aparecer en muchas películas de las que *no* era el protagonista. De este modo, enlaza muchos grandes y no tan grandes nombres en un entramado de relaciones cinematográficas. Kevin Bacon, se sugería irónicamente, era el verdadero centro de la industria de Hollywood.

El aspecto más sorprendente de este juego es lo tupido que resulta ese entramado. Desde los inicios del cine se han rodado unas ciento cincuenta mil películas que han interpretado unos trescientos mil actores (cuyos nombres figuran en los títulos de crédito). Y sin embargo, a casi todos esos actores se les puede asignar un número de Bacon (NB) de tres o inferior. La última vez que lo comprobé,* había 1.686 actores con un NB de uno (esto es, 1.686 que alguna vez han compartido reparto con Kevin Bacon), 133.856 actores con un NB de dos (los que han hecho una película con alguien que ha hecho una película con Kevin Bacon) y 364.066 con un NB de tres. En octubre de 2003, el NB medio de todos los actores de Hollywood (al menos todos cuantos aparecen en la base de datos www.us.imbd.com) era de 2,946. Desde luego, estas cifras parecen apoyar la idea de que algo muy especial ocurre con Kevin Bacon, pero, ¿de verdad es así?

El juego de Kevin Bacon no es una invención reciente. Como no podía ser de otra manera, los matemáticos jugaron en primer lugar su propia y

* Todas las cifras que doy las recojo en *The Oracle of Bacon [El oráculo de Bacon]*, página web de la Universidad de Virginia: <http://www.cs.virginia.edu/oracle/>

especial versión con los llamados Números de Erdős. Paul Erdős (1913-1996) era un influyente, extraordinario y prolífico matemático húngaro que escribió cientos de artículos. A causa de su inusual productividad, parece ser el centro del universo matemático.* A otros matemáticos y científicos se les puede asignar un número de Erdős (NE) dependiendo de si escribieron un artículo con el propio Erdős (NE = 1), con un colaborador de Erdős (NE = 2), con un colaborador del colaborador, etcétera.

Esta elaboración vincula no sólo a un gran número de matemáticos, sino también de físicos y sociólogos, con un enorme entramado de conexiones. Albert Einstein tiene un NE de dos, Werner Heisenberg un NE de cuatro y el físico alemán Erwin Schrödinger uno sorprendentemente alto: ocho. Yo tengo un número de Erdős similar.** Esto, por supuesto, no significa que yo sea un científico comparable a Schrödinger, ni que Heisenberg sea el doble de bueno que éste o Einstein cuatro veces mejor. He escrito muy pocos artículos científicos y ninguno de ellos de relevancia, y sin embargo, puedo trazar un enlace a través de mis coautores hasta cualquiera de esos grandes nombres. Esto no puede ser motivo de orgullo, puesto que la gran mayoría de los demás científicos podría hacer lo mismo. Lo que quiero decir es que el entramado formado por la coautoría en la comunidad científica es muy tupido, de forma que cualquier científico se encuentra a pocos pasos de alguna gran figura.

Todos conocemos el fenómeno que hay detrás de estos juegos. Uno de mis compañeros se encuentra en una fiesta hablando con un amigo del padrino de boda de la hermana de mi compañero. El pianista de un cantante que conozco fue al colegio con la mujer de uno de mis amigos del colegio. Descubro en una conversación que alguien a quien no conozco conoce a mi madre. Continuamente, estos entramados sociales de amigos y conocidos nos recuerdan que el mundo es muy pequeño.

La naturaleza interrelacionada de la interacciones sociales ha tentado y atormentado a los sociólogos durante décadas. Pero como motivo de

* En realidad, la productividad no garantiza eso. Lo importante es que Erdős colaboró con muchos otros autores y que, por tanto, tenía muchos contactos dentro del entramado. Un matemático solitario podría producir artículos como churros hasta llegar a los cien al año y, pese a ello, resultar irrelevante para el conjunto del entramado. Leonhard Euler, matemático suizo del siglo XVIII, es un ejemplo: es el matemático más prolífico de la historia, pero escribió toda su obra en solitario.

** Quiero dar las gracias a Mark Newman por averiguar que tengo un NE de ocho como mucho; si investigara, podría encontrar un camino más corto al matemático húngaro.

estudio cuentan con poco más que anécdotas. En los últimos años, sin embargo, algunos científicos han centrado su atención en los entramados que revelan esto que podríamos llamar comportamiento “qué pequeño es el mundo” y empiezan a comprender algunos de los rasgos que los definen. Estos estudios van mucho más allá de la esfera de la dinámica social, revelando que los mismos factores pueden encontrarse en un amplio abanico de entramados en sistemas tan diversos como los redes neuronales del cerebro, las reacciones bioquímicas interdependientes en el metabolismo y las redes de difusión eléctrica. Dicho de otra manera, existe una especie de universalidad común a ciertos tipos de entramados. Estudiando uno de ellos, incluso sobre la base de un modelo simple, podremos comprender el funcionamiento de sistemas y procesos que, aparentemente, no guardan ninguna relación. Podremos averiguar incluso si es cierto que Kevin Bacon tiene algo de especial.

LOS SEIS GRADOS

Los entramados que forman las amistades son complejos y fascinantes, pero resulta extraordinariamente difícil concretarlos de modo que se puedan estudiar a la luz del análisis físico o matemático. Cada Navidad se hace evidente una dificultad fundamental: ¿conocemos a Amy lo bastante como para enviarle una tarjeta? Ella nos mandó una el año pasado, pero lo cierto es que no es tan prominente en nuestro círculo de amistades como parece que nosotros lo somos en el suyo. Y luego está Roger: hace años que le conocemos, pero ya no mantenemos el contacto.

En el entramado del cine, o has hecho una película con Kevin Bacon o no la has hecho (claro que se puede discutir si los dramas televisivos como *I'm a Fool* son películas o no). Lo relacionado con la amistad es más ambiguo. En particular, es posible que la relación no sea recíproca: para mí, Harry es un amigo, yo para él soy un conocido. Y si uno intenta concretar la estructura y extensión de ese entramado, como han hecho los científicos, no tarda en descubrir con cuánta imprecisión lo describe la gente. Nos olvidamos de incluir a muchas personas y no sabemos estimar el tamaño de nuestro círculo de amistades. Y, por supuesto, ese entramado cambia con el tiempo a medida que dejamos que viejas amistades se alejen y entablamos nuevas relaciones.

En la década de 1970, el sociólogo Mark Granovetter, de la Universidad Johns Hopkins de Baltimore, destacó la importancia de las distintas *intensidades* de nuestros lazos de amistad. Los enlaces fuertes son relativamente fáciles de identificar y registrar, pero es posible que no sean los más significativos en la estructura global del entramado. Muchos de nuestros amigos más íntimos se conocen, así que su red de “enlaces fuertes” es parecida a la nuestra. Esta propiedad vincula a las personas en grupos, pero Granovetter afirmaba que son los enlaces más débiles, los “conocidos”, los que conectan esos grupos y, por lo tanto, mantienen unido todo el entramado (véase figura 15.1). Llamó a esta característica “la fuerza de los enlaces débiles”. Pero son precisamente estos enlaces más tenues los que más cuesta identificar.

Los sociólogos empezaron a interesarse por los enlaces y entramados sociales antes incluso de esto. En la década de 1950, el politólogo Ithiel de Sola Pool y el matemático Manfred Kochen, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), se preguntaron cómo se moviliza el poder político en la sociedad, cómo adquieren poder político las personas. Los amigos del presidente pueden susurrarle algo al oído e influir de ese modo en la política nacional. Pero, ¿y los amigos de los amigos? ¿Ejercen también cierta influencia? ¿Cuánta? ¿A cuánta distancia hay que estar del poder para influir en él?

Pool y Kochen se propusieron formular una teoría de los entramados sociales y predijeron que, dentro de una población, los individuos pueden tener entre sí más contacto del que imaginan. Ambos investigadores redactaron un artículo que no llegaron a publicar (apareció retrospectivamente en 1978). Sin embargo, el artículo circuló ampliamente y una de las personas que lo leyeron fue el psicólogo Stanley Milgram, de la Universidad de Harvard, es decir, a tiro de piedra del MIT. En 1967, Milgram, inspirado por Pool y Kochen, dirigió uno de los estudios más famosos y elegantes sobre la estructura de los entramados o redes sociales. Envío ciento noventa y seis paquetes a ciento noventa y seis habitantes de Omaha, Nebraska, con la petición de que se los remitieran a su presunto destinatario final, un agente de bolsa que vivía en Sharon, cerca de Boston.* Pero no facilitaba ninguna dirección. Los únicos datos que

* Al parecer, Milgram escogió Omaha porque no pudo imaginar lugar más alejado de la *civilización* de la Costa Este.

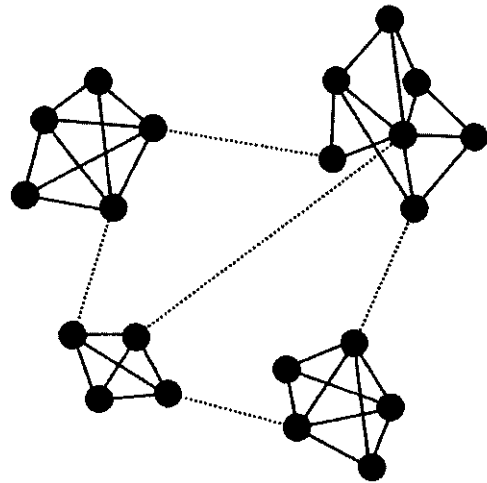


Figura 15.1. Un entramado de amistades. Los grupos de amigos íntimos están vinculados por los conocidos (líneas de puntos).

identificaban al agente de bolsa eran su nombre y profesión, junto con el hecho de que vivía cerca de Boston. A los habitantes de Omaha, escogidos al azar, se les pedía que enviaran el paquete a los amigos, conocidos o compañeros de trabajo que, según ellos, mejor pudieran facilitar que el paquete llegara a su destino –junto con la petición de que éstos, a su vez, hicieran lo mismo.

Quien recibía el paquete podría, por ejemplo, enviarlo a un agente de bolsa que conociera, con la esperanza de que supiera mejor a quién enviárselo luego. A nadie se le pidió que intentara una búsqueda sistemática del destinatario, sólo había que pasar el paquete a alguien conocido a quien se escogiera por su posible mayor proximidad (en términos sociales, profesionales o geográficos) con él. Se pedía a los participantes que, en cada etapa, incluyeran los mismos datos que conocían del destinatario, para así poder reconstruir la ruta seguida por cada paquete una vez llegara a su destino final.

“Cuando le pregunté a un inteligente amigo mío cuántos pasos creía que se tardaría en localizar al destinatario del paquete –recordaría Milgram–, calculó que harían falta unos cien intermediarios o más para que los paquetes llegaran de Nebraska a Sharon”.³ No hicieron falta

cien pasos. De media, bastaron cinco intermediarios (es decir, seis envíos) antes de que los paquetes llegaran a su destinatario. De ahí se deducía que cualquier ciudadano estadounidense estaba unido a cualquier otro escogido al azar vía una media de cinco conocidos. Se puede discutir el número exacto –por ejemplo, es improbable que cada intermediario dé el paso ideal a la hora de decidir a quién le envía su paquete y habría que estimar la importancia de que algunos paquetes no lleguen a entregarse por simple dejadez. Pero todos están de acuerdo en que bastan entre cinco y siete pasos para poner en contacto a todos los ciudadanos de Estados Unidos –conclusión que refrendan los estudios que, posteriormente, Milgram llevó a cabo con paquetes enviados de Los Ángeles a Nueva York.

Estos estudios se circunscriben a Estados Unidos, pero su mensaje se amplió al escenario global en una obra de John Guare, *Six Degrees of Separation* [*Seis grados de separación*].* Ouisa, uno de los personajes de la obra de Guare, dice:

Todos los habitantes de este planeta estamos separados de los demás por tan sólo seis personas. Seis grados de separación. Entre nosotros y todas las personas de este planeta. El presidente de Estados Unidos, un gondolero de Venecia... Un nativo del bosque amazónico, un habitante de Tierra del Fuego, un esquimal... Es una idea profunda... Cada persona es una nueva puerta que se abre hacia otros mundos.⁴

Pero, ¿de verdad es una idea tan profunda? El mundo está lleno de cosas que nos sorprenden no tanto porque sean extrañas o nos dejen perplejos, sino porque nuestra intuición iba por otro lado. Es natural pensar que las personas que están geográficamente muy distantes lo estén también desde un punto de vista social. Pero, ¿hasta qué punto? ¿Hay alguna razón para que, desde un punto de vista social yo esté más alejado de los habitantes de las islas Shetland que de los de Bromsley, adonde puedo llegar en autobús desde mi domicilio? ¿Y los habitantes de Nebraska? ¿Estarán proporcionalmente más alejados de mi esfera social?

* Parece ser que en 1929 el poeta húngaro Frigyes Karinthy ya predijo los “seis grados” de Milgram. Karinthy hizo la misma afirmación que el psicólogo, pero sin ninguna base científica.

Estas preguntas pueden parecer ilusorias, fantasiosas, incluso triviales,* pero tienen ramificaciones mucho más profundas. Las personas con quienes mantengo proximidad física son el pozo donde me contagio de muchas enfermedades que tendré a lo largo de mi vida. Más tangible todavía es la red de contactos íntimos y sexuales a través de los cuales, por ejemplo, el sida se extiende por la población. Esa red es algo turbia: o bien mantenemos una relación sexual, con lo que nos arriesgamos a contraer el sida, o bien no la mantenemos. (El contagio por transfusión de sangre es aun más difícil de rastrear, pero, en última instancia, también es un enlace igualmente concreto de la cadena.) Sin embargo, cuando los epidemiólogos empezaron a comprender y prever la expansión de la enfermedad, no tardaron en darse cuenta de la dificultad práctica de reconstruir esa red social –por mucho que, al principio, estuviera relativamente bien definida–. En algunos casos, sin embargo, sí se han identificado contactos importantes. Al parecer, cierto marinero noruego, soltero y promiscuo desempeñó un papel fundamental en los primeros casos de sida en Europa: contrajo la enfermedad en África occidental en 1960 y luego se la contagió a algunas personas en Colonia y en Reims en los años setenta, mientras trabajaba como camionero. A un auxiliar de vuelo canadiense llamado Gaetan Dugas, a quien más tarde se bautizó como “paciente cero”, se le vinculó con al menos cuarenta de los primeros casos de sida conocidos en California y Nueva York.

Algunas películas, libros, obras de teatro y canciones se han convertido en grandes éxitos no a causa de grandes campañas publicitarias, sino del boca a boca. Por fortuna, los mismos procesos pueden tener el efecto contrario: una película promocionada a bombo y platillo puede fracasar estrepitosamente cuando corre la voz de que es muy mala. En esta época de comunicación en masa y de sistemas de información global, es muy difícil identificar con precisión el proceso de difusión de ideas y productos culturales. Pero no hay duda de que las redes sociales desempeñan su papel y hasta hace muy pocas décadas los contactos personales eran fundamentales. Para cualquier interesado en la dinámica de la globalización, las redes de contactos y de intercambio de información entre personas son de gran importancia.

* Para una saludable dosis de trivialidades fantasiosas, véase en las páginas de Opinión del *New York Times*, el artículo de D. Kirby y P. Sahry titulado “Six degrees of Monica” (21 de febrero de 1998).

ENTRE EL ORDEN Y EL CAOS

Paul Erdős es el sujeto ideal para el juego matemático de las conexiones, a causa de su productividad. Pero no sólo por eso es apropiado. En los años cincuenta y sesenta, Erdős impulsó el estudio de las redes y hasta hace bien poco su obra proporcionó el punto de partida de casi todos los estudios sociales en esta área. Junto con su compañero Alfred Rényi (que, naturalmente, tenía un número de Erdős de uno), aclaró las propiedades de unas redes llamadas *grafos aleatorios*.

Un grafo es una serie de puntos unidos por líneas (véase figura 15.2a). A los puntos se les llama “vértices” y a las líneas, “aristas”. Esta entidad abstracta puede representar todo tipo de cosas. Los vértices podrían ser ciudades, y las aristas, las carreteras que las unen. En consecuencia, el grafo podría representar una red de transporte. O los vértices podrían ser actores y las aristas el enlace entre parejas de actores que han coincidido en alguna película. El número de Bacon de un actor es el número de aristas separadas que uno tiene que atravesar para llegar al actor relevante desde el vértice que representa a Kevin Bacon (véase figura 15.2b). Un grafo como ése muestra las relaciones entre las entidades representadas por sus vértices.

Cuando los vértices son ciudades y las aristas son carreteras es fácil comprender las reglas del grafo, que es como un mapa. Generalmente, las distancias y las direcciones entre los vértices que representan ciudades reflejan las de la realidad geográfica. Pero para el grafo película-actor, las reglas no son tan sencillas. ¿A qué distancia de Kevin Bacon colocamos a Eddie Albert y en qué dirección? ¿Colocamos a Jack Nicholson (NB = 1: *Algunos hombres buenos*, 1992) a la misma distancia? Podríamos, por ejemplo, decidir que todas las aristas tuvieran la misma longitud y que su dirección no tuviera ningún significado en particular. Podríamos hacer eso, pero no tardaríamos en darnos cuenta de que no funciona: muy pronto seríamos incapaces de colocar a dos actores que comparten película lo bastante cerca para vincularlos por una sola arista de longitud fija, porque sus enlaces con otras partes del grafo los mantendrían separados. Ahora bien, ¿por qué tenemos que dibujar el grafo en dos dimensiones? Puesto que ahora que los matemáticos se encuentran muy cómodos en espacios de más de tres dimensiones, ¿por qué no trazar una red de diez dimensiones?

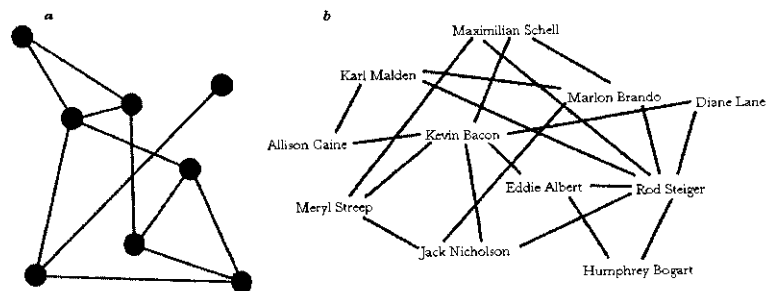


Figura 15.2. (a) Un grafo típico: una serie de puntos (vértices) unidos por líneas (aristas) (b) Una pequeña parte del grafo que vincula actores de cine, muestra algunas de las conexiones próximas a Kevin Bacon. Las respectivas películas aparecen en las Notas.

La respuesta a estos dilemas es que, en realidad, no importa cómo queramos dibujar el grafo película-actor siempre que las conexiones entre vértices sean correctas y vinculen sólo a aquellos actores que han aparecido juntos en alguna película. Para comprender los rasgos más importantes del entramado lo único que importa es el sistema de enlaces, lo que los matemáticos llaman *topología*. Grafos que son distintos cuando se trazan en un papel pueden sin embargo ser topológicamente idénticos. Las distancias y direcciones no significan nada.

A ese tipo de grafo lo llamamos grafo *relacional*, porque sólo se ocupa de las relaciones que existen entre sus vértices. Por el contrario, el *plano* de una ciudad es un grafo *espacial*, porque las distancias entre los vértices y sus posiciones guardan relación con la realidad. Por supuesto, el grafo de una ciudad no tiene por qué ser un grafo espacial. El plano icónico del metro de Londres (véase figura 15.3) que Harry Beck diseñó en 1931 es un ejemplo maravilloso de grafo relacional, pero conserva algunos elementos típicos de grafo espacial, porque así es más fácil trazar las aristas y se facilita la orientación de los usuarios. Las estaciones están aproximadamente en el punto geográfico que les corresponde, pero las distancias no guardan relación con ninguna escala. Y tampoco hay relación precisa con los puntos cardinales. Entre Covent Garden y Holborn se puede tardar menos andando que en metro, pero es mucho mejor coger el metro para ir de Hatton Cross a Boston Manor, por mucho que, en el mapa de Beck, los dos trayectos tengan la misma longitud.

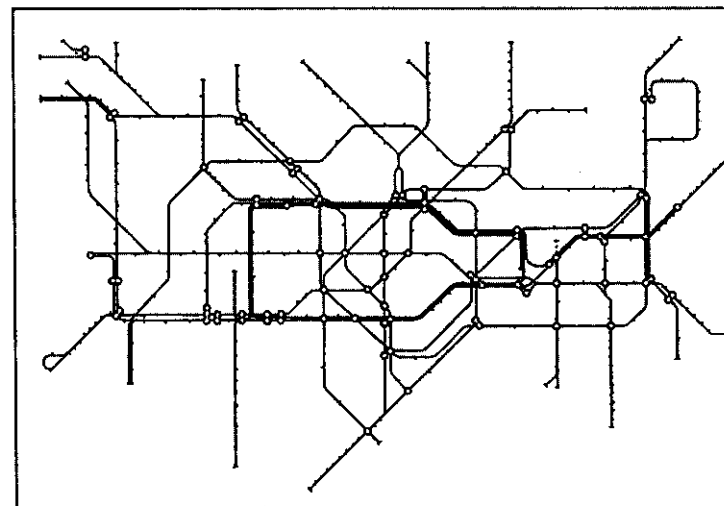


Figura 15.3. El plano del metro de Londres es un grafo relacional que muestra cómo están conectados los vértices (las estaciones), pero sólo ofrece indicaciones aproximadas de su situación geográfica y de la distancia que los separa. La línea gris más gruesa es el río Támesis.

En los grafos aleatorios que estudiaron Erdős y Rényi, un conjunto de vértices dispersos están interconectados de forma aleatoria. Se puede construir un grafo aleatorio de seis vértices numerando esos vértices y, a continuación, tirando dos dados. Se añade una arista entre dos vértices con números correlativos. Cuando cada uno de los vértices está vinculado por lo menos a otro, se dice que el grafo está totalmente conectado (véase figura 15.4). En un grafo totalmente conectado, siempre es posible desplazarse por una ruta de un vértice a otro. En este sentido, el metro de Londres está totalmente conectado. En general, habrá varias rutas posibles entre destinos y, en general, lo que interesa es encontrar la más corta.

Diversos investigadores de los entramados sociales, empezando por Anatol Rapaport y sus compañeros de la Universidad de Chicago en los años cincuenta, dieron por sentado que existe una topología de grafos aleatorios. Ciertamente, puede decirse que no es éste el caso, pero da la impresión de que los grafos aleatorios son un buen punto de partida para esos estudios porque, con total neutralidad, presuponen una arquitectura subyacente. Por su parte, Erdős y Rényi ya elaboraron las

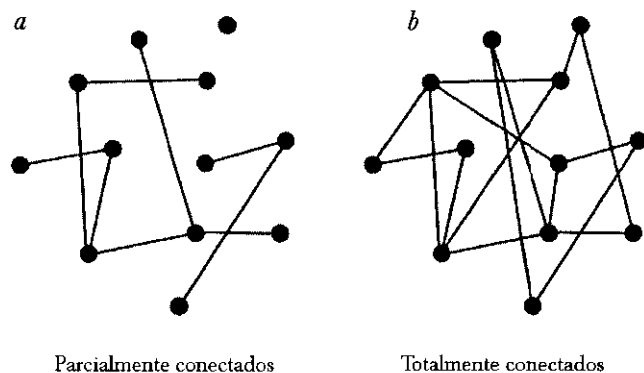


Figura 15.4. Un grafo aleatorio se conecta totalmente cuando todos los vértices están vinculados a la red (b), cuando no hay vértices ni grupos aislados, como en (a).

propiedades matemáticas de esos grafos. Esas propiedades tienen que expresarse en términos estadísticos, puesto que las conexiones son cuestión de puro azar. Para un número suficientemente elevado de vértices —con cien basta—, existe una probabilidad despreciable de que, conectando los vértices al azar, el mismo grafo aparezca dos veces. Por lo tanto, al igual que no tiene sentido preguntarse por los movimientos individuales de las partículas de un gas sino centrarse en los promedios y distribuciones, hay que limitar nuestra curiosidad por los grafos aleatorios a cifras generales, cifras tales como el promedio de conexiones por vértice y la distribución de probabilidades de este número. Erdős y Rényi demostraron que la distribución de probabilidades se corresponde con nuestra familiar curva gaussiana. El número promedio de conexiones se corresponde con el pico de la curva. Este promedio depende, evidentemente, de las aristas que tenga el grafo, pero para un grafo aleatorio concreto tiene un valor definido.

Hay otro tipo de grafo utilizado para estudiar redes, un grafo que no tiene nada que ver con el grafo aleatorio. Se trata de la retícula regular: configuración de vértices idénticos unidos por aristas idénticas (véase figura 15.5). En este caso no hay necesidad de hablar de promedios: todos los vértices (salvo los que están en las aristas y en las esquinas) tienen el mismo número de conexiones exactamente (en la figura 15.5, cuatro). Desde un punto de vista matemático, estos grafos *ordenados* se describen con facili-

dad. Para llegar de un vértice a otro muy distante sobre una retícula ordenada, no hay más remedio que avanzar a saltos de vértice en vértice. La longitud del trayecto, es decir, el número de aristas atravesadas, es larga. Por otro lado, en un grafo aleatorio existe la oportunidad de que un vértice próximo al punto de partida se conecte a *larga distancia* con uno que esté cerca del vértice *meta*. En otras palabras, hay muchos atajos. Esto significa que la ruta entre vértices muy separados puede ser muy corta.

Una forma de precisar esta diferencia es preguntarse cuál es, de promedio, el camino más corto entre dos vértices elegidos aleatoriamente. A esto se le llama la longitud media de las trayectorias y es una propiedad estadística análoga al número de rutas que los paquetes de Stanley Milgram tenían que recorrer para llegar a su destino. En un grafo ordenado, la longitud media de las trayectorias es larga y se prolonga proporcionalmente a medida que el número de vértices se incrementa. Para un grafo aleatorio la longitud media de las trayectorias es corta. Además, no se incrementa mucho cuando se añaden más vértices porque hay oportunidad de que entre un vértice nuevo de la parte exterior y uno de la mitad del grafo se establezca una conexión aleatoria.

A juzgar por esto, cabría esperar que las redes sociales como la del grafo película-actor serán como grafos aleatorios. ¿No es ése el quid de la idea “qué pequeño es el mundo”, que siempre estamos más cerca de lo que pensamos de cualquier individuo escogido al azar? Sin embargo, en 1998, dos científicos de la Universidad de Cornell observaron que los entramados sociales no son como los grafos aleatorios, sino que forman una clase propia que estaría entre el perfecto desorden y el orden perfecto de las retículas regulares. Se les llama, con razón, redes “qué pequeño es el mundo”.

LOS HOMBRES DE LAS CAVERNAS Y LOS CHATS

En su mayoría, los círculos de amistad son recíprocos: los amigos íntimos de mis amigos suelen ser mis amigos íntimos. Si yo conozco a Andy y a Betty, es probable que Andy y Betty también se conozcan. Dicho de otro modo, mis amigos y yo formamos una especie de grupo social con muchos enlaces con otros grupos. Sin embargo, las redes aleatorias no tienen esta estructura de grupos. En las redes de tipología aleatoria, el

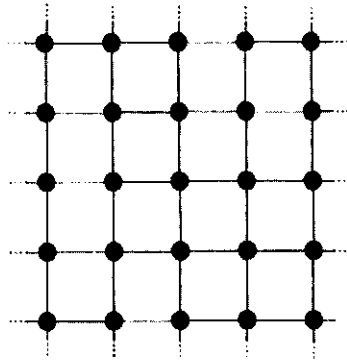


Figura 15.5. En una retícula regular, todos los vértices (menos los de los bordes) tienen el mismo número de conexiones con los demás.

hecho de que yo conozca a Andy y a Betty no guarda ninguna relación con la probabilidad de que Andy y Betty se conozcan. Por su parte, las retículas ordenadas sí tienen un elemento de formación de grupos, porque cada vértice está conectado solamente con sus vecinos más próximos, no hay grandes saltos.* Muchos de los vecinos de un vértice también son vecinos de un vértice vecino, así que hay muchas posibilidades de que muchos amigos íntimos conectados con una retícula ordenada compartan un amigo íntimo y mutuo.

Cuando a finales de los años noventa, en la Universidad de Cornell, Steven Strogatz y uno de sus discípulos, Duncan Watts, empezaron a investigar el problema de las redes sociales, encontraron la forma de representar el agrupamiento del que venimos hablando. Al principio, no les interesaban las estructuras sociales; pensaban, en vez de ello, en cómo algunos animales sincronizan su comportamiento de igual modo que, en un campo, los grillos sincronizan sus chirridos. Pero la investigación no tardó en llevarles a la intrincada red que los sociólogos ya habían empezado a tejer.

Strogatz y Watts imaginaron dos sociedades extremas posibles. La primera está fragmentada en grupos de personas que socializan entre sí

* Uno puede crear retículas ordenadas con enlaces que llegan más allá de sus vecinos, pero la tendencia a agruparse sigue existiendo.

pero casi con nadie de otros grupos. Se puede pensar en ejemplos que se aproximen a esta situación. Por ejemplo, las empresas que dominan las vidas de sus empleados proporcionándoles lo que prácticamente se convierte en su única red de contactos sociales, como es el caso de algunas compañías japonesas. Pero Strogatz y Watts encontraron una analogía más básica: el mundo del hombre de las cavernas, que consistía en grupos muy dispersos, cada uno de los cuales compartía una cueva y todas las demás actividades cotidianas y rehuía a los extraños. En tiempos de Thomas Hobbes, muchos campesinos de muchos pueblos vivían así aún. Esa forma de vivir puede representarse en una serie de grafos pequeños muy vinculados internamente pero desvinculados o con muy poca conexión entre sí (véase figura 15.6). No se trata de un grafo ordenado, pero comparte con este tipo de grafos dos propiedades: un elevado nivel de agrupamiento y un largo *charpath*.

Steven Strogatz y Duncan Watts se fueron al otro extremo indagando no en el pasado, sino en el futuro. La novela de Isaac Asimov *El sol desnudo* (1957) retrata una sociedad futura en la que las personas interactúan casi totalmente a través de robots y ordenadores. En Solaria es tan fácil y probable forjar una relación con alguien que vive en el otro extremo del mundo como entablarla con un vecino. Estas amistades virtuales han llegado a ser tan débiles y superficiales que cada nueva relación se establece con total independencia de las que ya existen: en esa sociedad, todo el mundo está igualmente disponible y accesible. La consecuencia es una red que básicamente se correspondería con un grafo aleatorio y en la que no hay agrupamientos. Algunas redes sociales son ya un poco así; por ejemplo, las que se forman en los chats de Internet, donde las personas entran y salen casi al azar porque su inversión personal en los enlaces que establecen es en realidad muy poca.

Strogatz y Watts describieron las diferencias entre el mundo del hombre de las cavernas y Solaria considerando que la probabilidad de que dos personas se conozcan depende del número de amigos mutuos que tengan. En el mundo cavernario es prácticamente seguro que dos personas que compartan un amigo sean amigos, porque compartir un amigo significa, casi invariablemente, que se pertenece al mismo grupo. En Solaria, dos personas con un número todavía mayor de amigos íntimos no tienen mayor probabilidad de convertirse en amigos de las que tienen de iniciar una amistad con otra persona cualquiera.

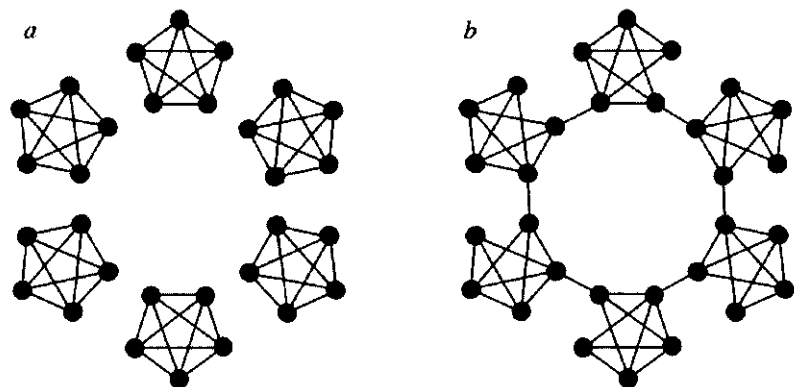


Figura 15.6. En “el mundo del hombre de las cavernas”, (a) las personas forman grupos sociales estrechamente vinculados, pero aislados los unos de los otros. Incluso si el grafo se relaciona formando enlaces entre las “cavernas” (b), la longitud media de las trayectorias es corta.

Presumiblemente, nuestro mundo real se encuentra en algún lugar entre ambos extremos. Pero, ¿dónde? La matemática demanda que todo grafo que se emplee para reproducir las redes sociales debe estar totalmente conectado. Si no lo está, habrá vértices que sean completamente inaccesibles para otros, lo cual hace que la longitud media de las trayectorias llegue a infinito, lo cual no es realista en absoluto. De modo que Strogatz y Watts idearon un método para convertir un grafo totalmente conectado y ordenado (comparable al mundo totalmente conectado del hombre de las cavernas) en un grafo totalmente ordenado pero aleatorio (como el universo de Solaria), siguiendo unos pasos que siempre se alejan de los grafos totalmente conectados a un nivel intermedio. A esto se le llama “recableado aleatorio” (*random rewiring*). Se empieza con una red ordenada y se escoge un vértice al azar. A continuación se escoge al azar una de las aristas que la conectan, se la desconecta de su destino y se la vuelve a conectar (*recablear*) a otro vértice del grafo que también se ha escogido al azar (véase figura 15.7). A medida que el recableado progresa se van creando más y más atajos que conectan partes lejanas del grafo directamente y el grafo se hace cada vez más aleatorio.

Los investigadores optaron por comenzar con el grafo ordenado más sencillo que se les ocurrió: un anillo de vértices. (Un anillo de vértices es

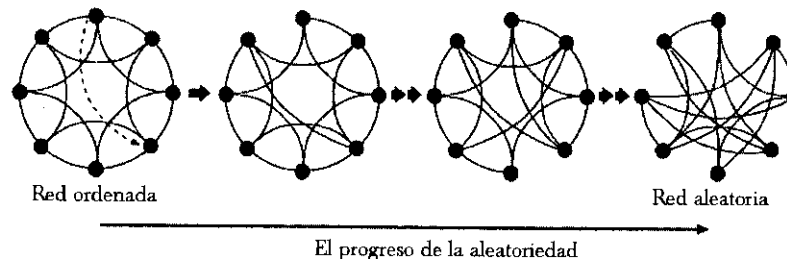


Figura 15.7. El recableado aleatorio de un anillo de vértices hace que, gradualmente, un grafo ordenado se vaya convirtiendo en un grafo aleatorio. En algún lugar entre ambos extremos se encuentra el universo que nos hace exclamar “¡qué pequeño es el mundo!”.

mejor que una hilera porque elimina las anomalías de los extremos.) Empezaron a recablear estos grafos y observaron qué ocurría con ciertos rasgos topológicamente determinados: la longitud media de las trayectorias de longitud l y el nivel de agrupamiento, que pueden medirse como una cantidad numérica expresada en c .^{*} La cantidad de recableado puede cuantificarse por la probabilidad de que un vértice escogido al azar haya sido recableado a partir de su configuración inicial. Cuando esta probabilidad sea cero, el grafo es una red perfectamente ordenada (anillo). Cuando la probabilidad es uno, el grafo es totalmente aleatorio.

Como cabría esperar, tanto l como c decrecen cuando la cantidad de recableado aumenta: la retícula ordenada pierde su capacidad de agrupamiento pero se forman más atajos. Sin embargo, nos encontramos con tres sorpresas. En primer lugar, casi toda la acción se produce en

^{*} C viene definido como el promedio para todos los vértices del número de aristas que salen de un vértice v dividido por el número total de posibles aristas que hay alrededor de v . Es una respuesta cuantitativa a la siguiente pregunta: de todas las formas posibles de unir los vértices que hay en los alrededores de v , ¿cuántas se concretan realmente? Que el coeficiente de agrupamiento c sea alto significa que la mayoría de las conexiones potenciales alrededor de un vértice v se concretan: el agrupamiento es alto. Es decir, en una red de amistades donde c es elevado, es muy posible que los amigos de uno se conozcan entre sí.

los primeros recableados. Cuando uno de cada diez vértices está recableado, las propiedades del grafo no se distinguen de las de un grafo aleatorio. En segundo lugar, el paso de un grafo casi ordenado a un grafo casi aleatorio es bastante brusco; Watts lo compara con una transición de fase de la física estadística. Es como si el grafo ordenado, o *sólido*, se licuara, pasando al grafo desordenado, *licuado*. Finalmente, l y c no cambian simultáneamente, sino en diferentes etapas del proceso de recableado (véase figura 15.8).

Esta última observación parece verdaderamente extraña. La longitud media de las trayectorias l cae en picado a un valor típico de un grafo aleatorio mientras que el grafo todavía conserva un elevado grado de agrupamiento (un elevado c). A continuación, después de que el recableado siga avanzando, c también descende a toda velocidad. Así que, para un pequeño abanico de recableados, el grafo tiene una l pequeña pero un c grande. La coexistencia de estos dos rasgos es lo que hace de una red un pequeño mundo. El pequeño mundo de los círculos de amistad, por ejemplo, tiene un grado de agrupamiento elevado pero entre los grupos hay numerosos atajos. Este hecho acorta mucho la distancia media entre los vértices y es el responsable de nuestros “seis grados de separación”. Por eso Steven Strogatz y Duncan Watts denominaron a los de este tipo, grafos “qué pequeño es el mundo”.

¿NOS CONOCEMOS?

¿De verdad se parecen las redes sociales del mundo real a los grafos “qué pequeño es el mundo” creados por recableado aleatorio? Es decir, ¿pueden Strogatz y Watts *demonstrar* “lo pequeño que es el mundo” y, por lo tanto, disuadirnos de recurrir a ese tópico cada vez que, en una fiesta, nos percatamos de relaciones previamente insospechadas?

Pese a su aparente frivolidad, la red película-actor sigue siendo uno de los mejores bancos de pruebas de esa teoría porque ofrece muchos datos en absoluto ambiguos y de los que se puede disponer con facilidad. Gracias al juego de Kevin Bacon sabemos que esta red tiene un corto *charpath* l (el número medio de Kevin Bacon es bajo), y no hace falta estudiarla a fondo para darse cuenta de que el nivel de agrupamiento es elevado. Por ejemplo, los actores de la misma nacionalidad tienden a formar

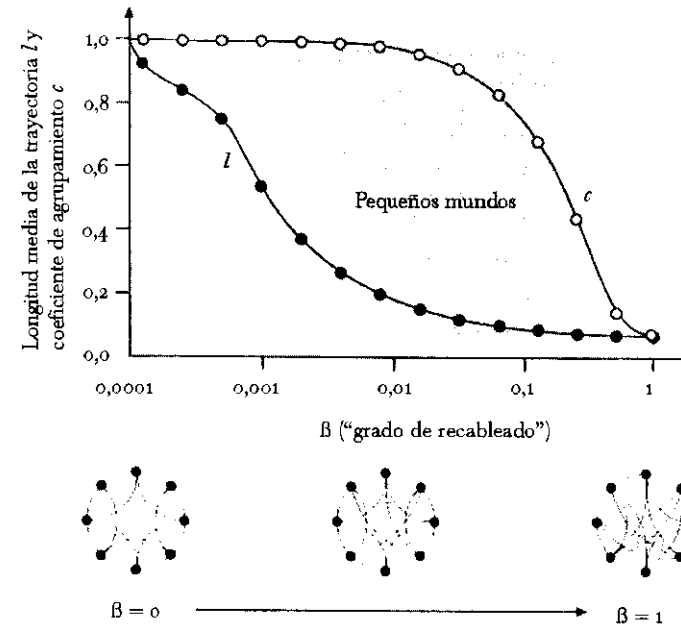


Figura 15.8. La longitud media de las trayectorias l y el coeficiente de agrupamiento c de un grafo con forma de anillo recableado cambian bruscamente a medida que se produce el recableado. Aquí, la cantidad β es, básicamente, una medida de la cantidad de recableado. Adviértase que la escala del eje horizontal es logarítmica, lo cual significa que los valores pequeños de β están *estirados*. Debido a ello, es más fácil seguir los cambios en l , que ocurren sobre todo en los primeros pasos del recableado. l y c tienen valores elevados en el grafo ordenado y reducidos en el grafo aleatorio. Pero no cambian en el mismo momento. Los grafos donde c es alto y l bajo son grafos “qué pequeño es el mundo”.

parte del mismo grupo y los grupos de distinta nacionalidad suelen estar vinculados por algunos *ejes* interculturales como Bruce Lee (Hong Kong), Gérard Depardieu (Francia) o Gong Li (China).

Desde este punto de vista, la red película-actor tiene propiedades compatibles con los grafos “qué pequeño es el mundo”. Pero, ¿qué hay de la tipología de esa red? Se puede establecer algún tipo de comparación definiendo una cantidad llamada “parámetro de contracción de los vértices”, que mide cuántos atajos hay en la red entre vértices muy separados. Es un número que puede calcularse para cualquier red y que se incrementa

para los grafos circulares a medida que, progresivamente, se van recableando. Steven Strogatz y Duncan Watts construyeron una red *pequeño mundo* en la que el parámetro de contracción de los vértices era el mismo que en la red película-actor. De este modo, al menos supuestamente, la tipología de ambas redes tenía que ser comparable. Así que la cuestión es de qué forma las dos redes son comparables en lo que respecta a la longitud l de su *charpath* y a su parámetro de agrupamiento c .

Es una buena comparación. Ciertamente, el modelo recableado puede reproducir los parámetros de la red película-actor con mayor fidelidad de lo que puede hacerlo la red de los hombres de las cavernas o la red de Solaria. Pero, no obstante, debemos preguntarnos si no habrá otra alternativa. Es decir, ¿es el plan de recableado la única manera de formar una red con las propiedades de los grafos “qué pequeño es el mundo” (baja l y alto c)? Es lo que veremos en el próximo capítulo.

Y qué hay de esa pregunta candente: ¿es Kevin Bacon el centro del universo cinematográfico? Para responder a esta pregunta hay que calcular el número de Bacon medio de toda la red y compararlo con el número medio de otros actores: el número de Elvis, el número de Bogart, el número de Brando, etcétera. Si Kevin Bacon es realmente la encrucijada más importante de la red película-actor, de media, todos los demás actores estarán más cerca de él que de cualquier otro.

Pero resulta que Kevin Bacon no sólo no es el eje más importante de la red, sino que ni siquiera se encuentra entre los mil más importantes (por supuesto, la lista cambia cada día, a medida que se hacen nuevas películas). En el momento en que redacto estas líneas, en lo más alto de la lista se encuentra Rod Steiger (el número medio de Steiger es 2,652), seguido de Christopher Lee, Dennis Hopper, Donald Pleasance y Donald Sutherland (que aparece en la versión cinematográfica de *Seis grados de separación*). Marlon Brando es el número 202, Frank Sinatra el 443. Para cuando llegamos a Kevin Bacon, los números de actor sucesivos se encuentran, de media, separados por una diferencia minúscula: en torno a 0,0001.

Así que, ¿por qué inventaron el juego de Kevin Bacon y no de cualquier otro actor? En la respuesta está la esencia del concepto “qué pequeño es el mundo”: en este tipo de redes, *todos* parecen encontrarse en el centro. Algunos están más en el centro que otros, pero por poco. Incluso actores relativamente menores como Eddie Albert tienen un estatus com-

parable al de las grandes estrellas. (Donald Pleasance era un buen actor, pero no una estrella.) Este mensaje tiene algo refrescantemente igualitario. Si las redes sociales guardan algún parecido con el grafo actor-película –lo cual, como veremos, es una hipótesis muy razonable–, no hay por qué contemplar con envidia a los pocos que parecen representar a la camarilla de nuestros círculos sociales, ni lamentarnos por tener pocos amigos. Porque, al final, se trata, sencillamente, de considerar la red que nos vincula a todos desde la perspectiva más adecuada.

Pero esta historia tiene un epílogo. En 2003, Duncan Watts (que se había trasladado a la Universidad de Columbia) y sus compañeros reeditaron el experimento clásico de Stanley Milgram, pero esta vez valiéndose no del correo convencional sino del electrónico. Pidieron voluntarios para tomar parte en su proyecto y les llovieron los ofrecimientos: 61.168 individuos de ciento sesenta y seis países. A cada uno de esos participantes le asignaron una persona objetivo a quien había que enviar un mensaje de correo electrónico. Se establecieron dieciocho objetivos de trece países distintos: desde un profesor universitario de una de las universidades más importantes de Estados Unidos a un archivero estonio y a un cirujano veterinario militar noruego. Las reglas eran parecidas a las que puso Milgram: los participantes tenían que enviarle un mensaje a un amigo, conocido o compañero de trabajo, que, en opinión del participante, fuera la persona más *próxima* al objetivo designado.

Al final, no fue una buena forma de entregar el correo. Abandonaron el sesenta y tres por ciento de los participantes, lo cual, sin embargo, no estaba mal para un estudio realizado por Internet y, además, 24.163 participantes sí empezaron su respectiva cadena. Pero sólo trescientos ochenta y cuatro mensajes alcanzaron su objetivo. Las cadenas completas tenían un promedio de sólo cuatro pasos –un número que falseaba la realidad, porque las cadenas más cortas tenían mayores probabilidades de completarse–. Teniendo en cuenta el nivel de desgaste, Watts y sus compañeros calcularon que la longitud media de las cadenas estaba entre los cinco y los siete pasos –la misma que había deducido Stanley Milgram, aunque su experimento se circunscribiera a Estados Unidos–. Esto alimenta la idea de los seis grados de separación, pero de ello no necesariamente se deduce que en el pequeño mundo en el que vivimos el contacto entre personas sea eficiente. Los investigadores determinaron que pocas de las personas que se descolgaron de la cadena lo hicieron

porque no se les ocurrió nadie adecuado a quien enviar el mensaje. Simplemente, perdieron el interés. ¿Qué ganaban ellos?

Y sin embargo, en el caso de uno de los objetivos, el índice de desgaste fue significativamente menor que en los demás: el catedrático estadounidense. ¿Significa eso que tenía mejores contactos y que, por lo tanto, resultaba más fácil dar con él? Probablemente no, afirman Watts y sus compañeros, que calculaban que su grado de separación no difería mucho del de los demás objetivos. Pero más de la mitad de las personas que participaban en el proyecto eran profesionales de clase media con formación universitaria y estadounidenses. Los miembros de la cadena que se dirigían al profesor probablemente creyeron que sería más fácil que el mensaje llegara al profesor que, por ejemplo, a un consultor de la India. Esa creencia les dio ese extra de motivación que les instó a seguir la cadena.

Dicho de otro modo, afirman los investigadores, no todo consiste en la estructura del entramado social. Que el hecho de que el mundo sea *tan pequeño* pueda aprovecharse para hacer contactos depende de las acciones, e incluso de las percepciones, de las personas que lo pueblan: lo cual constituye un oportuno recordatorio de que la física social no puede permitirse prescindir por entero de la psicología del individuo.

XVI

TEJIENDO LA RED
LA FORMA DEL CIBERESPACIO

Algunos han saludado la Era de Internet como el final de la geografía. En realidad, Internet tiene una geografía propia, una geografía hecha de redes y nodos que el proceso de intercambio de información genera y procesa desde diversos lugares. La unidad es la red, así que la estructura y la dinámica de las redes múltiples son las fuentes de significado y de función para cada sitio.

MANUEL CASTELLS (2001)¹

Estamos en presencia de una nueva noción de espacio donde lo físico y lo virtual se influyen recíprocamente, lo que sirve para sentar las bases para que surjan nuevas formas de socialización, nuevos estilos de vida y nuevas formas de organización social.

GUSTAVO CARDOSO (1998)²

Es cierto, hay magia en esa trama.

WILLIAM SHAKESPEARE (1602-1604)³

En mayo de 2000 recibí un mensaje de correo electrónico que, en la casilla correspondiente a "Asunto", anunciaba una frase cautivadora: "I LOVE YOU". Por fortuna, cuando la leí, estaba al corriente de la enorme proporción de la comunidad virtual que ya había encontrado ese mismo mensaje en su bandeja de entrada. Lo que ese encantador anuncio depa-raba, si yo optaba por abrir el mensaje, no era una declaración de amor sino un insidioso virus informático que acabaría con todos mis archivos antes de ir a fastidiar a otro lado. Los virus de ordenador no son fatales

(todavía), pero sí un penoso engorro. Han hecho estragos en numerosas redes informáticas y causado a muchos usuarios enormes perjuicios. El virus I LOVE YOU paralizó las redes internas del Senado de Estados Unidos y de la Cámara de los Comunes británica y afectó a varios estados e instituciones financieras. En el mismo año 2000, otro virus llamado "Love Bug" causó pérdidas por valor de seis mil setecientos millones de dólares.

A principios de 2003, el gusano Slammer inutilizó en mayor o menor grado toda la red de Corea del Sur y la creciente astucia de estos parásitos virtuales y su capacidad para eludir todo tipo de barreras debe hacernos temer que algún día una de esas epidemias alcance proporciones globales, como una Peste Negra moderna. La amenaza destaca el papel de Internet y de su compañera electrónica, la telaraña mundial, la World Wide Web (www), en la conservación del orden social. Cada vez más, la economía es un sistema global que depende de las comunicaciones informáticas incluso en sus más pequeños mecanismos. Muchos estados comparten esta dependencia, como sucede con muchas facetas de la estructura social, desde la distribución de alimentos hasta los colegios y la policía. "Hay una nueva infraestructura –afirma Larry King, director del Departamento Nacional de Telecomunicaciones y Administración de la Información de Estados Unidos– de la que dependemos mucho más de lo que jamás llegamos a soñar".⁴

No es descabellado ver en las inextricables ramificaciones de Internet y de la red una manifestación del Leviatán de Hobbes, un gobernante cuyo cuerpo está compuesto no por las multitudes de sus súbditos sino de chips de silice, pantallas iluminadas y kilómetros y kilómetros de cables de cobre y fibra óptica. En su relato "For a Good Purpose" [Con un buen propósito], el autor italiano Primo Levi imaginaba que una bestia similar –un sistema de seguimiento por teléfono automatizado– adquiriría conciencia a raíz de la complejidad de sus conexiones e iniciaba una reconfiguración aleatoria de las conexiones que, por mucho que redujera las dimensiones del mundo, causaba el caos entre toda la población.

¿Cuál es la solidez de este Leviatán electrónico, de esta Ciber-Comunidad hobbesiana? "Aunque nada de lo que los mortales hagan pueda ser inmortal", señaló Hobbes,

si los hombres tuvieran tanto uso de razón como pretenden, sus Comunidades podrían quedar a salvo cuando menos de perecer

a causa de alguna enfermedad interna [...] Por lo tanto, entre los *Padecimientos* de una Comunidad pondré en primer lugar los surgidos de una Institución Imperfecta, que se parecen a las enfermedades de un cuerpo natural.⁵

Por supuesto que sí: los virus electrónicos son tan capaces de acabar con Internet como sus homólogos biológicos de dejarnos tirados en la cama. Así pues, también Internet es presa potencial de las muchas afecciones que también padece la piel: sobrecarga, errores de transmisión, fallos locales que causan atascos generales y ataques de agentes extraños con malas intenciones. Hobbes nos transmite la enseñanza de que haríamos bien en construir nuestros Leviatanes según las líneas de un "cuerpo natural". En el presente capítulo descubriremos algo asombroso de Internet: que aunque nadie lo haya planeado, al parecer ya incorpora estas líneas. Y mientras este hecho presta a la red cierta robustez, también deja al descubierto su talón de Aquiles, su debilidad ante un tipo de ataque en particular. Identificar esa debilidad puede ser crucial para que la red se proteja del ciberterrorismo, un peligro que crece diariamente a medida que aumenta nuestra dependencia de los sistemas informáticos.

Internet es sólo un ejemplo de la forma en que nuestras estructuras sociales e instituciones están vinculadas con la clase de redes de las que nos ocupamos en el capítulo anterior, de esas redes en las que incontables unidades o agentes están vinculados por interacciones que nos hacen pensar que vivimos en un mundo en realidad muy pequeño. Empezamos a vislumbrar el aspecto de esas redes y cómo surgen espontáneamente y sin que nadie lo planee entre multitud de agentes que, enfrascados en sus asuntos, circulan sin pararse a pensar en la visión global.

Existe una necesidad urgente de comprender esta "sociedad en red". Las redes de información y de comunicación globales de Internet y de la www dan forma a estructuras culturales e institucionales completamente nuevas. El sociólogo Manuel Castells cree que la red electrónica que ahora se extiende por el mundo –lo que el llama la "Galaxia Internet"– nos proporciona una forma enteramente nueva de abordar nuestros asuntos y de satisfacer nuestros apetitos. Afirma que la "geografía" descentralizada y no jerárquica de la red cambiará la naturaleza de estas actividades:

A medida que las nuevas tecnologías de generación y distribución de la energía favorecieron que la industria y las grandes corporaciones se convirtieran en los pilares organizativos de la sociedad industrial, Internet se ha convertido en la base tecnológica a través de la cual se organiza la Era de la Información: la red.⁶

El crecimiento de esa red ha sido más rápido de lo que nadie podía sospechar. Ciertamente, por lo demás, demasiado rápido para que nadie pueda pronosticar sus consecuencias o potencial. El uso generalizado de la www no empezó hasta 1995; hacia finales de ese año había dieciséis millones de internautas. A principios de 2000, esa cifra había crecido hasta los cuatrocientos millones y algunas estimaciones hablan de más mil millones en 2005* y de dos mil millones en 2010.

Gracias a la nueva física de redes, sabemos que la estructura de Internet refleja la ética que la produce; como dice Castells, “la cultura de los productores da forma al medio”.⁷ Esto es, sólo una red que crece “orgánicamente” de acuerdo a ningún plan maestro, observando principios de libre acceso y elección meritocrática (las mejores páginas web o las más útiles son las que más conexiones tienen), desarrollará el tipo de arquitectura que Internet y la www desplieguen, con sus dificultades y puntos fuertes.

Pero la cultura de la “libertad de información” no garantiza que la sociedad virtual vaya a ser utópica. Podría decirse que Internet es gratuita para quienes pueden permitírselo, es decir, más de la mitad de los habitantes de Europa y América del Norte (y la mayoría del resto del anillo Asia Pacífico). A medida que crece el poder de Internet, todos los que carecen de infraestructura tecnológica, dinero o educación para acceder se encuentran cada vez más marginados, lo cual crea una “brecha digital” no sólo entre países desarrollados y países en vías de desarrollo, sino entre los distintos sectores socioeconómicos de una misma cultura. Entretanto, hay empresarios y delincuentes que explotan el enorme poder de Internet. Es también un lugar para dar rienda suelta al descontento y para bromistas, y un nuevo canal para que los anunciantes nos inunden con propaganda.

* Según la página web www.internetworldstats.com, en junio de 2008, la cifra de internautas en todo el mundo supera los 1.133 millones. [N. del T.]

Teniendo en cuenta estas consideraciones, es esencial que comprendamos la anatomía virtual de esta máquina informativa. Porque muy pronto, de una forma o de otra, todos estaremos bajo su influencia. Castells prevé el siguiente panorama:

Imagino que alguien podría decir: “¿Por qué no me dejan en paz? No quiero tomar parte en su Internet ni en su civilización tecnológica. ¡No quiero formar parte de su sociedad virtual! ¡Lo único que quiero es vivir mi vida!”. Bueno, si ésta es su postura, tengo malas noticias para usted. No importa que usted no quiera saber nada de redes, porque las redes sí quieren saber de usted. Porque mientras quiera seguir viviendo en sociedad, en este tiempo y en este lugar, tendrá que vérselas con la sociedad virtual.⁸

LA RED ESTÁ ECHADA

“No es ninguna exageración”, dijo el juez estadounidense Stewart Dalzell en 1996,

concluir que Internet ha conseguido, y sigue consiguiendo, el mayor mercado participativo de discursos de masas que este país –y el mundo– haya conocido [...] Tanto federalistas como antifederalistas pueden debatir a diario la estructura del Estado, pero estos debates se producen dentro de los chats y grupos de noticias y no a través de panfletos. Los Luteros modernos siguen colgando sus tesis, pero ya no lo hacen en la iglesia de Wittenberg, sino en los boletines electrónicos. Los diálogos más mundanos [...] tienen lugar entre aspirantes a artistas, cocineros franceses, amantes de los perros o aficionados a la pesca con mosca.⁹

“Participativo” es el adjetivo adecuado. Aunque la retórica de la inclusividad global suele pasar por alto hasta qué punto son limitados los recursos de los países en vías de desarrollo Internet no tiene nada de elitista en realidad. Cualquiera con acceso a un terminal informático puede hacerse con una dirección de correo electrónico gratuita y enviar mensajes a personas que se encuentran en el otro extremo del mundo. El

comentario del juez Dalzell pertenece al discurso de conclusiones que pronunció en un juicio acerca de la constitucionalidad de los intentos de poner límites a los mensajes transmitidos por Internet. “Con toda justicia podemos considerar que Internet es una conversación ininterrumpida y de escala mundial –dijo–. El Estado no puede [...] interrumpir esa conversación”.¹⁰

Es una ironía bien conocida que esa conversación a la vista de todos nació de un red diseñada en secreto por el ejército estadounidense en los años sesenta llamada ARPANET (ARPA, *Advanced Research Projects Agency* [Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada], era el eufemismo empleado para los proyectos científicos financiados por el ejército estadounidense). En principio, la red se creó para transmitir documentos; para sus artífices fue toda una sorpresa que la posibilidad de enviar mensajes breves, que en principio surgió a raíz de la necesidad de comunicarse durante el desarrollo del proyecto, se convirtiera en su rasgo más atractivo. Muy pronto, el mundo académico y el de la investigación industrial, que observaban el crecimiento de ARPANET, apostaron por su propia versión, y así nació Usenet, que permitía enviar paquetes de datos codificados a través de las líneas telefónicas nacionales e internacionales. En Usenet surgió la filosofía anárquica y del todo vale que ahora caracteriza a Internet, la mega-red que creció a partir de la proliferación de redes más pequeñas con sus propios servidores.

Internet y la World Wide Web –la Red y la Web, o “telaraña mundial”– se toman a veces como sinónimos, pero no lo son. La Red es una red de comunicaciones; la Web es una fuente de información. El hombre a quien normalmente se atribuye el mérito del lanzamiento de la WWW es Tim Berners-Lee, investigador informático inglés que trabajaba en el laboratorio de física de partículas CERN de Ginebra, donde ayudaba a los físicos a almacenar y consultar información. La idea de Berners-Lee la resume su descripción de un programa que ideó en 1980 para que funcionase como “sustituto de la memoria” personal: “Permitía almacenar fragmentos de información y unir esos fragmentos de cualquier forma. Para encontrar información, uno avanzaba a través de los enlaces de página en página”.¹¹

En 1989, a Berners-Lee se le ocurrió la forma de aplicar su idea a los sistemas de información electrónica de todo tipo de tamaños: el hipertexto. En un hipertexto hay algunas palabras marcadas –con botones o

subrayados o un color distinto al resto del texto– que permiten que el internauta salte directamente a un documento distinto con información relevante. Estos *hipervínculos* los inserta el creador del documento, pero pueden remitir a una página web de otra persona. Si posteriormente el contenido de la página a la que remite el hipervínculo se cambia o se actualiza, el hipervínculo lleva al internauta a la versión más reciente.

En el CERN, otros trabajadores del laboratorio pensaron que la propuesta de Berners-Lee podía servir de inspiración de algo mucho más grande. No tenían ningún interés en limitarse a una web meramente institucional. En 1990 se hablaba ya de una web mundial o World Wide Web, que aprovecharía la infraestructura global de Internet para acceder a documentos electrónicos almacenados en sistemas informáticos de todo el mundo, además de a los artículos generados en los grupos de noticias de Internet. Para moverse a través de una red tan compleja hacía falta una guía, y ésta llegó en forma de navegador, programa informático de fácil manejo que proporcionaba una puerta de entrada al universo de recursos de la web. Netscape, que ahora es propiedad de AOL (America Online), y el Internet Explorer de Microsoft son los dos navegadores más comunes.

Se ha calculado que, a finales de 2002, había alrededor de tres mil millones de documentos disponibles en la www. Cada día se añaden a la web varios millones de páginas nuevas. Con una biblioteca de ese tamaño, se necesita un medio eficiente de conseguir la información que se está buscando. Ése es el papel de los buscadores, programas que pueden compararse con robots que buscan documentos en los archivos de la web que contengan palabras clave o textos que coincidan con las palabras que se les dan como criterios de búsqueda. La escala y la complejidad de la web son tan enormes que hoy en día los buscadores sólo examinan una pequeña parte de ella.

Con la cuestión de la tipología de la red, los inventores de Internet tuvieron que lidiar desde el principio. En gran medida, no se trataba tanto de un problema matemático como tecnológico. Los lectores de más edad recordarán una época en que la imagen más extendida de un ordenador consistía en una unidad central unida a una serie de terminales; los terminales no tenían autonomía, no eran más que meras puertas para acceder al oráculo central. La idea de microordenador personal independiente no existía cuando ARPANET, el antecesor de Internet, estaba en proceso de

creación. Por eso en la década de los sesenta, la topología *obvia* de una red informática era la de una red muy centralizada en la que todos los mensajes se enviaban a una unidad de distribución única que transmitía cada uno de esos mensajes al nodo apropiado (véase figura 16.1a).

Pero Paul Baran, el ingeniero que emprendió la tarea de desarrollar una red de comunicaciones para el ejército de Estados Unidos, se dio cuenta de que construir un sistema así era un error. Baran era empleado de RAND Corporation, comité de asesoramiento creado en 1946 con el cometido de elaborar análisis estratégicos y hacer recomendaciones al gobierno estadounidense en lo relativo a su política de defensa nuclear. En el punto álgido de la Guerra Fría, muchos miembros de la cúpula militar estadounidense temían que un ataque nuclear de la Unión Soviética pudiera destruir los sistemas de comunicación de Estados Unidos, dificultando la respuesta militar. Lo que el ejército necesitaba era un sistema capaz de resistir un ataque nuclear.

Paul Baran sabía que un sistema centralizado sería muy vulnerable a los ataques, puesto que bastaba con dañar un solo nodo, la unidad central, para desbaratar toda la red. Una posible alternativa era una red descentralizada en la que una serie de grupos de nodos más pequeños y centralizados estuvieran conectados por enlaces de mayor alcance (véase figura 16.1b). Sin embargo, este sistema todavía sufría el defecto de que resultaba relativamente fácil aislar alguna de sus partes destruyendo uno de sus enlaces o *aristas* (es evidente que volvemos a hablar de grafos). El mejor diseño —radical en su época— era una red muy interconectada y “distribuida” en la que cada nodo (vértice) estuviera conectado con muchos otros (véase figura 16.1c). Esta topología tiene un alto grado de redundancia: existen muchas rutas posibles entre un vértice y otro. De modo que ni siquiera inutilizando una proporción elevada de aristas se consigue aislar una parte del entramado. Baran calculó que bastaba con tres aristas por vértice para garantizar la resistencia y elasticidad del sistema.

La propuesta de Baran languideció en el purgatorio burocrático y nunca llegó a concretarse. Pero sus ideas resucitaron cuando ARPANET se puso en marcha. Esta iniciativa nada tuvo que ver con los temores a sufrir un ataque nuclear propios de la Guerra Fría. Su objetivo era incrementar la eficacia de los recursos informáticos de las instituciones universitarias financiadas por ARPA relacionándolas entre sí. El plan inicial consistía en conectar directamente los ordenadores de la unidad central de cada ins-

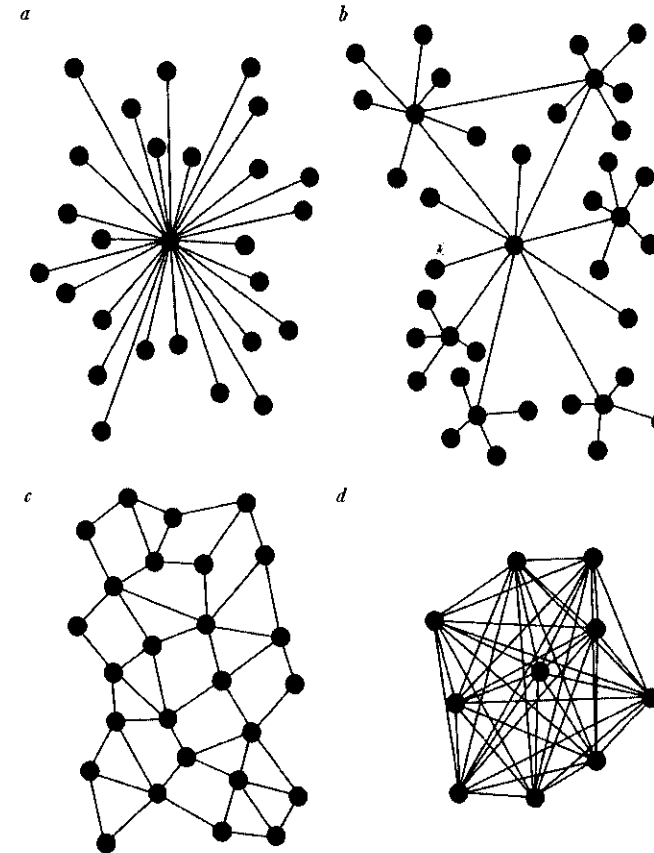


Figura 16.1 Posibles topologías para Internet: (a) centralizada, (b) descentralizada con servidores locales, (c) repartida y (d) con maximización de las conexiones.

titución con las demás unidades centrales. Pero en 1967, el investigador informático Wesley Clark se dio cuenta de que esta red donde las conexiones estaban maximizadas no tardaría en convertirse en un complejo inmanejable. Para tan sólo diez vértices, existían cuarenta y cinco aristas (véase figura 16.1d), y había que tener en cuenta que, en una configuración de este tipo, el número de aristas se incrementa más rápidamente que el de vértices. Esto suponía una enorme exigencia para las unidades

centrales de cada vértice, con el peligro de que el flujo de información colapsara. Por su parte, Wesley Clark propuso que las unidades centrales se conectaran a una subred de ordenadores más pequeños, que compartieran el mismo lenguaje y se dedicaran, sencillamente, al envío de información. El trabajo de Paul Baran enseñó a Clark y a otros cómo podía organizarse una red así para que funcionase con solidez y eficiencia.

Y hasta ahí ha llegado la planificación topológica de Internet. La red ha crecido mucho más de lo que sus creadores llegaron a soñar y no ha estado sometida a ningún organismo regulador ni ha respondido a ningún diseño estructural. Su crecimiento, como el de las ciudades (capítulo VI), ha sido orgánico y no descoordinado. De hecho, algunos sugieren que a lo que más se parece ahora Internet es a un ecosistema tan complejo como los del mundo natural. Ya no es posible trazar un mapa exhaustivo de su interconectividad: su estructura es tan enorme e intrincada que resulta imposible desentrañarla.

No obstante, da la impresión de que Internet tiene la misma topología repartida y muy redundante que propuso Baran. Los paquetes de datos en que se dividen los mensajes y las páginas web siguen rutas muy distintas entre origen y destino, hasta es posible que atraviesen el globo en dirección contraria antes de unirse al alcanzar su objetivo. Ése es el motivo de que Internet pueda soportar tanto tráfico al mismo tiempo: si una ruta está congestionada o bloqueada, suele haber alternativa. Por otra parte, sabemos que un mapa de la red no se parecería a la figura 16.1c. Ésta guarda mayor semejanza con una retícula regular (página 428), si bien se trata de una retícula en la que el número de enlaces por vértice no es uniforme, sino que varía entre cuatro y seis. Como hemos visto en el capítulo anterior, en una red así no hay atajos: se pasa de un punto A a un punto B mediante muchos saltos cortos.

Y entonces, ¿cómo es Internet? Es una pregunta relevante que podría contribuir a gestionar con mayor eficacia los mensajes de correo electrónico, valorar la solidez del sistema ante los fallos locales, facilitar todavía más que los internautas de una parte del mundo lleguen a los de otra y evaluar si el crecimiento de Internet no tiene límites o si alcanzará un punto de saturación que no podrá superar. A medida que el impacto económico de la red aumenta —en Estados Unidos, el comercio virtual mueve entre cien mil y doscientos mil millones de dólares al año y se citan cifras similares al hablar del ahorro potencial que permite el

recurso de la comunicación electrónica—, estas cuestiones son cada día más acuciantes.

Internet es una entidad física, como el metro de Londres. Los nodos, o vértices, son ordenadores y los enlaces, o aristas, son las líneas de transmisión o los canales vía satélite que discurren entre ellos. La web es un terreno más nebuloso. Sus vértices consisten en páginas de documentos almacenadas electrónicamente en máquinas de todo el mundo y sus aristas son los hipervínculos o direcciones URL (*Uniform Resource Locator* [Localizador de Recursos Uniforme]) que conectan directamente una página con otra que está almacenada en otra máquina. Cuando seguimos uno de esos enlaces, la comunicación discurre a lo largo de las mismas líneas físicas de transmisión que utiliza Internet. Pero la propia web no está delimitada por estas líneas. Una línea de transmisión puede, en principio, conectar un millón de páginas web con otro millón de páginas web en un laberinto de enlaces URL.

Las estructuras de la red o de la web no son evidentes. ¿Podrían ser grafos aleatorios? ¿Son redes “qué pequeño es el mundo” como las que vimos en el capítulo anterior? ¿O tal vez se ramifican en estructuras jerarquizadas como las redes fluviales o los alvéolos de nuestros pulmones? La respuesta es que parecen ser algo totalmente distinto.

SIN SENTIDO DE LA MEDIDA

Trazar el mapa de la www es como trazar el mapa de un laberinto. Si pudiéramos elevarnos en globo sobre el laberinto, la cosa sería fácil: bastaría dibujar lo que vemos. Pero no hay globo que nos dé una imagen a vista de pájaro de la www porque existe sólo en el ciberespacio, es decir, no se corresponde con ninguna estructura física que podamos mirar. Así que tenemos que hacer lo que haríamos si quisiéramos dibujar el mapa de un laberinto desde el suelo: debemos entrar en ella y no perder el hilo del camino recorrido. Qué extraño artefacto nos hemos buscado: lo hemos construido, pero no sabemos decir muy bien qué es lo que hemos construido. Al contrario, tenemos que indagar en sus formas como si fuéramos ciegos, palpar su contorno poco a poco. En 1999, Réka Albert, Hawoong Jeong y Albert-László Barabási, de la Universidad de Notre Dame, con sede en el estado norteamericano de Indiana, afrontaron este

desafío cartográfico introduciendo en el laberinto de la WWW un robot encargado de la tarea de descubrir y dibujar sus intrincados caminos.

El robot era un programa informático que tenía instrucciones de entrar en una página web y seguir todos los hipervínculos. Eso llevaba al robot a un conjunto de páginas web donde repetía el mismo proceso. Con cada nueva incursión, el robot guardaba un registro del número de hipervínculos salientes que tenían las páginas que iba encontrando.* Llevar a cabo esta búsqueda para los mil millones de documentos que entonces estaban colgados en la WWW habría sido demasiado para ese robot. En vez de ello, los investigadores dijeron a su programa que se circunscribiera a los límites del dominio de la Universidad de Notre Dame (www.nd.edu). Eso sólo significaba 325.729 documentos HTML (*Hypertext Mark-up Language* [Lenguaje de Marcado de Hipertexto], el lenguaje estándar de creación de páginas web ideado por Tim Berners-Lee), relacionados por casi un millón y medio de enlaces. Ésta, se dijeron los investigadores, era una muestra lo suficientemente representativa para dar una idea fiel del conjunto de la web.

Réka Albert y sus compañeros se dieron cuenta de que la distribución de probabilidades de los enlaces entrantes y salientes del gráfico resultante se correspondía con una ley de potencias (véase figura 16.2). Es decir, la probabilidad de que una página web cualquiera de la universidad tuviera cierto número de enlaces entrantes o salientes dependía del número de enlaces, de acuerdo a una relación dictada por una ley de potencias. La mayoría de las páginas investigadas por el robot tenían pocos enlaces, algunas tenían muchos y cada vez que se duplicaba el número de enlaces, el número de páginas con esa cantidad concreta de enlaces descendía siguiendo un factor constante. Aunque, intuitivamente, es de esperar que haya menos páginas con muchos enlaces que con sólo unos pocos, una ley de potencias no es, ni mucho menos, la única forma de formalizar esa relación. En otras palabras, el resultado no es obvio. En realidad, podría esperarse que la relación del número de páginas con muchos o pocos enlaces se correspondiera con la curva de Gauss, estando el promedio de enlaces por página quizás en tres o cuatro. Pero

* Para reconstruir la red también es necesario saber los enlaces que conducen a cada página, los enlaces *entrantes*. El robot no los podía identificar directamente, pero sí de forma implícita, por el sitio al que lleva cada enlace saliente.

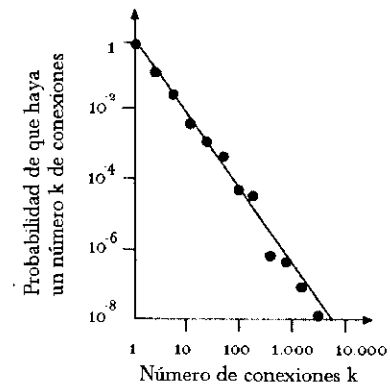


Figura 16.2. La distribución de probabilidades de los hipervínculos entrantes a documentos html en la web sigue una ley de potencias, lo cual genera una línea recta que se corresponde con una relación logarítmica. Los enlaces salientes tienen una distribución similar. Esto implica que la World Wide Web (www) es una red en la que el número de hipervínculos no se corresponde con ninguna escala.

la ley de potencias afirma que esa preferencia no existe, que la conectividad en la red no se corresponde con esa escala. Como ya hemos visto, una ley de potencias indica que en el sistema no hay ninguna escala.

No hay nada predeterminado en esta ley de potencias. Todo aquél que crea una página web en la Universidad de Notre Dame, igual que todo el que lo hace en cualquier otro dominio de la WWW, tiene libertad absoluta para decidir cuántos hipervínculos introduce. (Por supuesto, no puede decidir cuántos hipervínculos conducirán a su página.) Sin embargo, de esta multiplicidad de opciones individuales surge una ley matemática que rige, como en el caso de los datos de Notre Dame, para páginas que tienen un enlace y para las que tienen más de mil. La red parece organizarse en torno a este estado de ley de potencias, de igual modo que el modelo de criticalidad autoorganizada del montón de arena genera un estado crítico en el que la frecuencia de las avalanchas se corresponde con una ley de potencias (página 282).

La ley de potencias nos dice que la WWW no es como las redes “qué pequeño es el mundo” de Steven Strogatz y Duncan Watts. En los grafos recableados de Strogatz y Watts sí existe cierta preferencia en la conectividad: la función de distribución de probabilidades del número de aristas

por vértice se eleva al máximo en algún valor en particular y luego desciende. La WWW tampoco se corresponde con un grafo aleatorio, porque su distribución de probabilidades también es distinta. La probabilidad de encontrar un vértice con un número muy elevado de conexiones es mucho mayor en una distribución de ley de potencias que en un grafo aleatorio o en un grafo "qué pequeño es el mundo" de Strogatz y Watts —de igual modo que la ley de potencias de las fluctuaciones del mercado indica que la probabilidad de que se produzcan grandes acontecimientos es mucho mayor.

¿Significa esto que la WWW no es un *pequeño mundo*? No necesariamente. Simplemente, significa que no es el mismo tipo de pequeño mundo que los pequeños mundos de Steven Strogatz y Duncan Watts. Réka Albert y sus compañeros comprobaron si el conjunto de datos del que disponían era indicativo de un pequeño mundo (de Strogatz y Watts), es decir, una corta longitud media de las trayectorias entre dos vértices escogidos al azar y un alto grado de agrupamiento de los vértices. Resultó que estas dos propiedades se combinaban para ofrecer un solo criterio en la definición de un pequeño mundo: cuando aumenta el número de vértices de la red, también aumenta la longitud media de las trayectorias, pero mucho más despacio.* Los investigadores se percataron de que un gráfico elaborado para obtener la misma distribución, de acuerdo a una ley de potencias, de las conexiones que habían observado para la sección de la WWW que estaban investigando, observaba en realidad ese comportamiento.

De modo que, en realidad, la web sí es un pequeño mundo; eso sí, de una topología muy concreta y caracterizada por una ley de potencias: con una conectividad que no se corresponde con ninguna escala. Réka Albert y sus compañeros hicieron la siguiente estimación: si toda la WWW tiene la misma estructura que el dominio de la Universidad de Notre Dame, dos páginas cualquiera están separadas entre sí por una media de tan sólo diecinueve enlaces. Debido a la estructura "qué pequeño es el mundo" de la web, esta distancia media debería incrementarse en sólo dos enlaces aunque, como afirman algunas previsiones, el número de páginas web se incrementa en un mil por ciento en los próximos años. Toda la información que queramos estará a sólo unos cuantos clics.

* En términos matemáticos: la longitud media de las trayectorias es proporcional al logaritmo del número de vértices.

Si esto es así, ¿por qué es tan difícil encontrarla? Una de las quejas más comunes de los usuarios de la red es la enorme cantidad de información inútil que se interpone entre ellos y lo que están buscando. Por desgracia, los buscadores luchan por abrirse paso a través de un buen montón de broza porque sus criterios de búsqueda son necesariamente romos. Sí, es posible que el documento vital esté a sólo diecinueve clics, pero a causa de la elevada interconectividad de la red, el buscador tiene que atravesar un número enorme de documentos. Además, el tamaño, alcance y contenido de la web cambian tan rápidamente que para los buscadores es muy difícil mantener el paso indexando nuevas páginas y actualizando o descartando las antiguas, las que ya no existen o las que ya han perdido relevancia. Según algunos cálculos, los mejores buscadores sólo abarcan el treinta por ciento del contenido indexable de la web y los hay que sólo manejan un tres por ciento.

Desde el Centro de Investigación de Xerox de Palo Alto, California, Lada Adamic ha demostrado de qué forma el carácter de pequeño mundo de la WWW se puede aprovechar para diseñar mejores buscadores. Éstos aprovechan el alto grado de agrupamiento de las páginas dedicadas a temas relacionados, lo cual diferencia la topología de Internet de la de una red aleatoria. Un buscador inteligente podría aprovechar ese agrupamiento para limitar su ámbito de búsqueda, tras encontrar los mejores sitios *nucleares* desde los que lanzar la búsqueda. Este plan inteligente puede ser más eficaz que un paseo aleatorio por el laberinto de la web.

Las leyes de potencia parecen ser un *leitmotiv* recurrente de la WWW. Lada Adamic y su compañero Bernardo Huberman han descubierto este tipo de distribución de probabilidades en el número de páginas por sitio web. Y en 1998, ellos y sus colaboradores descubrieron que los usuarios que exploran la red también obedecen a estadísticas que siguen una ley de potencias. Ese tipo de exploración, o navegación, suele ser la alternativa (y, con frecuencia, el complemento) al empleo de buscadores. Encontramos una página web que parece contener la información que queremos y a continuación seguimos los hipervínculos a otras páginas del sitio hasta que o bien encontramos lo que buscamos o bien llegamos a la conclusión de que no está ahí.

La mayoría de los internautas navegarán felizmente no sólo de página en página, sino de sitio en sitio. Pero Bernardo Huberman, Lada Adamic y sus compañeros sólo tuvieron en cuenta las rutas que los inter-

nautas siguen dentro de cada sitio en particular. Querían saber hasta dónde *penetra* la gente, cuántos clics realizan de media antes de abandonar el sitio. Observando varios conjuntos de datos –el comportamiento de más de veintitrés mil usuarios registrados con el proveedor AOL, y visitantes de la página web de Xerox, por ejemplo–, se dieron cuenta de que la distribución de probabilidades del número de clics por internauta en un sitio en particular obedecía a una ley de potencias, o a algo muy parecido.* Esta información podría contribuir a que los diseñadores de páginas web prevean el número de internautas satisfechos por página.

¿A qué se parece en realidad una red sin escala? En un grafo aleatorio, la mayor parte de los vértices no tienen el mismo número de aristas, y la red parece un ovillo uniforme (véase figura 16.3a). En una red sin escala la mayoría de los vértices sólo están conectados por uno o dos enlaces, sin embargo, una parte pequeña pero significativa de ellos tiene un gran número de conexiones. Por eso la estructura es muy irregular: parece muy densa –o *pinchada*– en algunos lugares y muy dispersa en otros (véase figura 16.3b). Estos nodos muy vinculados proporcionan los atajos que convierten la red en un pequeño mundo.

Internet, como la WWW, también tiene esta topología libre de escalas con una distribución de conectividades entre dos nodos que obedece a una ley de potencias (véase figura 16.4). En esto reside su fuerza. Albert, Jeong y Barabási han demostrado que las redes libres de escalas son mucho más flexibles y resistentes a fallos aleatorios, como la caída de un nodo, que las redes aleatorias o las redes *pequeño mundo* con una escala de Strogatz y Watts. Estos dos últimos tipos de red pueden llamarse “exponenciales”, lo cual significa que la probabilidad de que exista un nodo muy conectado decrece rápidamente –exponencialmente– a medida que el número de enlaces aumenta. Réka Albert y sus compañeros observaron que una red libre de escalas apenas *nota* si un número de sus nodos

* El equipo de Xerox propuso un modelo de navegación en el que los visitantes del sitio web de la empresa ejecutan algo parecido a un paseo aleatorio por las páginas de Xerox hasta que topan con una página cuyo valor informativo se encuentra por debajo de cierto umbral subjetivo. Llegados a este punto, abandonan el sitio. El modelo predice una distribución de probabilidades que se corresponde con la llamada forma gaussiana inversa. No es como una curva gaussiana (páginas 75-76), sino que se parece a una ley de potencias, desviándose de ella a medida que la trayectoria se prolonga. En realidad, los datos disponibles no son lo bastante fiables para distinguir entre este tipo de relación y una auténtica ley de potencias.

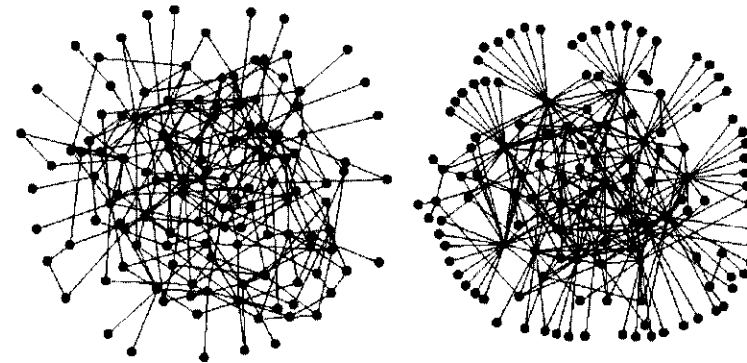


Figura 16.3. Los grafos aleatorios (a) son bastante homogéneos, mientras que las redes sin escala (b) parecen *pinchadas* en unos pocos vértices de gran conectividad.

(entre uno y veinte) está inutilizado –la longitud media de las trayectorias apenas cambia–. Por el contrario, en las redes exponenciales, basta con que un puñado de nodos funcione mal para que la longitud media de las trayectorias aumente sustancialmente, lo cual dificulta enormemente la comunicación entre los demás nodos. Además, las redes exponenciales tienden a romperse en muchos grupos aislados cuando la fracción de nodos *muertos* es superior al veintiocho por ciento del total. Cuando esto ocurre, la red es totalmente incapaz de transmitir información a una distancia significativa. Una red sin escala, sin embargo, no se *quiebra*, sino que se *desinfla* lentamente cuando sus nodos se van quedando inutilizados. Un grupo conectado relativamente grande persiste incluso cuando la mitad de los nodos están muertos. Como la mayoría de los nodos de una red libre de escalas sólo tiene uno o dos enlaces, al romper los enlaces aleatoriamente lo que suele pasar es que se van perdiendo nodos de uno en uno (véase figura 16.5).

Por lo tanto, Internet tiene precisamente la topología que necesita para proporcionar una red de comunicaciones solvente aunque alguno de sus nodos haya quedado inutilizado. Los fallos locales no se deben sólo al mal funcionamiento de algunos ordenadores; un nodo puede bloquearse temporalmente a causa del gran volumen de información que lo atraviesa. En una red libre de escalas, una ruta alternativa efectiva puede encontrarse con facilidad incluso cuando muchos de los nodos se

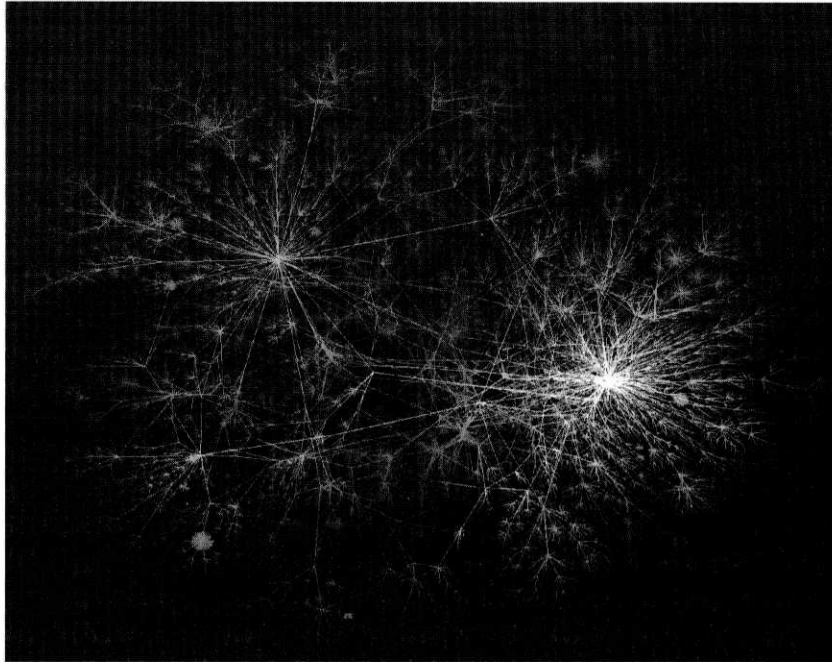


Figura 16.4. La estructura de parte de la red, trazando la ruta más corta de mensajes enviados desde un ordenador central a miles de ordenadores. Mapas como éste pueden verse en <http://www.cybergeography.org/atlas/topology.html>

han atascado simultáneamente. (De hecho, alrededor del tres por ciento de los *routers* de datos de Internet están inutilizados en todo momento.)

Lo más notable es que Internet se ha convertido en la más sólida de las redes *sin que nadie lo planease*. No responde a ningún diseño. En realidad, si alguien hubiera tenido autoridad suficiente para dictar la topología de Internet, lo más probable es que hubiera escogido una estructura mucho menos robusta (como, por ejemplo, la de Paul Baran: figura 16.10). El mensaje está claro: a veces lo mejor es dejar que la tecnología se organice. Sin embargo, la cuestión sigue siendo *por qué* Internet tiene estructura. La retomaré al final del capítulo. Antes tengo que afrontar un asunto menos agradable. Porque, pese a su robustez, potencialmente, Internet tiene un defecto fatídico: que, por su culpa, mucha gente se queda despierta hasta altas horas de la noche.

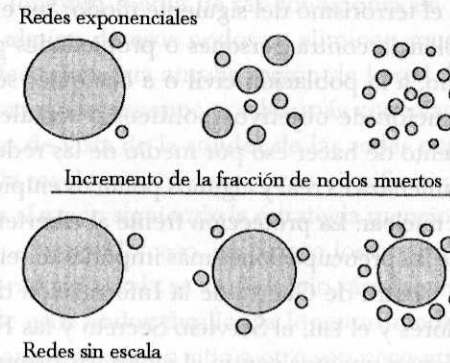


Figura 16.5. El colapso de redes con nodos muertos. Redes exponenciales como las redes aleatorias de Erdős y Rényi se dividen rápidamente cuando los nodos quedan inutilizados. Por el contrario, las redes sin escala se desinflan lentamente, conservando un entramado central de gran conectividad.

ATENTADO CIBERNÉTICO

Resulta irónico que Internet, que nació del deseo de proporcionar un sistema de comunicaciones lo bastante sólido para resistir cualquier agresión del enemigo, sea considerado ahora una estructura muy vulnerable sobre la que, no obstante, depende la supervivencia de Estados Unidos. En 1996, el presidente Bill Clinton puso en marcha la Comisión de Protección de Infraestructuras Críticas, encargada de valorar mecanismos de protección de las redes eléctrica, de comunicaciones e informática frente a cualquier ataque. La forma de esos ataques es muy distinta a la que algunos temieron en los orígenes de la red. No hace falta lanzar misiles, ni movilizar ejércitos ni fuerzas aéreas. Los agresores no tienen por qué salir de sus casas, ni por qué ser superpotencias extranjeras con un inmenso poder militar. Con los conocimientos adecuados, un solo individuo armado con tecnología informática convencional podría hincar de rodillas a todo un país. Desbaratando las redes informáticas de los bancos e instituciones financieras, un ciberterrorista podría provocar la caída libre de la economía estadounidense. La desinformación que cundiría en los sistemas informáticos de las redes de distribución de la energía eléctrica podría apagar estados enteros o destruir gaseoductos.

El FBI ha definido el terrorismo del siguiente modo: “es el uso ilícito de la fuerza y de la violencia contra personas o propiedades para intimidar o coercer al gobierno, a la población civil o a cualquier segmento de la misma en la prosecución de objetivos políticos o sociales”.¹² El ciberterrorismo es un intento de hacer eso por medio de las redes electrónicas de información. La amenaza es real y algunos políticos empiezan a temerla más que una guerra nuclear. La protección frente al ciberterrorismo se ha convertido en una de las preocupaciones más importantes en Estados Unidos: el personal del Centro de Guerra de la Información de la CIA suma más de mil trabajadores y el FBI, el Servicio Secreto y las Fuerzas Aéreas tienen sus propios departamentos contra el ciberterrorismo.

En una época en la que el terrorismo se ha convertido en el espectro que amenaza a la civilización, ese miedo no es mera paranoia. El ciberterrorismo es barato, puede ser devastador y su perpetrador no corre peligro inmediato. El sistema informático del Pentágono ya ha sido atacado. En un ejercicio militar llamado Receptor Idóneo, el personal de la Agencia de Seguridad Nacional empleó libremente el *software* disponible en el mercado para acceder a sistemas informáticos que les habrían permitido apagar toda la red eléctrica de Estados Unidos y para hacerse con el control parcial del Alto Mando militar del Pacífico. La mayoría de los *crackers* eluden a sus perseguidores.* Pero este tipo de asalto a la red sólo es una parte del problema y, posiblemente, no la más importante. Sería mucho más sencillo, y tal vez igual de efectivo, emplear un arma con filo: simplemente, detener el funcionamiento de la red. La topología “qué pequeño es el mundo” sin escala de Internet asegura que los intentos de hacerlo inutilizando nodos probablemente sean inútiles porque la red puede soportar una cantidad considerable de ese tipo de ataques sin perder mucha conectividad. Pero es poco probable que un ciberterrorista recurra a una táctica tan errónea.

En una red exponencial, la existencia de una escala media de conectividad característica significa que ninguno de los nodos es especial. Por otro lado, en una red sin escala, algunos nodos son definitivamente más iguales que otros. Los nodos más conectados son las encrucijadas que

* Un *cracker*, que se propone utilizar la red para causar daño o con propósitos destructivos, no es lo mismo que un *hacker*, que, ante todo, está interesado en desarrollar y mejorar *software* de acuerdo a las costumbres tácitas de la libre, arriesgada y meritocrática “cultura de la red”.

mantienen la longitud media de las conexiones en una magnitud baja. Suprimiendo alguno de esos nodos se eliminan muchos enlaces de una vez, lo cual afectaría a una amplia región de la red. Si en lugar de suprimir nodos al azar, empezamos por los más conectados, la comparación desde el punto de vista de la solidez de las redes exponenciales y de las redes sin escala revela una diferencia muy significativa. En el primer caso, destruir nodos al azar o siguiendo la estrategia mencionada apenas supone diferencia. En el segundo caso, en cuanto los nodos más conectados son destruidos, la red sin escala se viene abajo rápidamente. Destruir uno de cada veinte de esos nodos duplica la longitud media de las conexiones –de pronto, para llegar de un sitio a otro son necesarios grandes rodeos–. Así pues, si un ciberterrorista quiere destrozarse Internet, le basta con identificar un número relativamente pequeño de los nodos más conectados y sabotearlos. Dicho de otra manera, cuando la inteligencia guía los atentados, una red sin escala como Internet puede sufrir daños desproporcionados. Es alrededor de los nodos más conectados donde habría que erigir las murallas más seguras.

Esta estructura topológica hace que Internet se parezca más a un “organismo natural” de lo que cualquiera podía sospechar. Con frecuencia, a estas redes urdidas por la tecnología de la información se las compara con el cerebro y puede que a quienes lo hacen no les falte razón. Strogatz y Watts han demostrado que el entramado de conexiones de la red neuronal del gusano nematodo, *Caenorhabditis elegans*, posee los rasgos característicos de una red “qué pequeño es el mundo”: gran agrupamiento y pequeño *charpath* entre las neuronas. Pero Barabási y sus compañeros han descubierto en las células de un amplio abanico de organismos una red todavía más vital que guarda una analogía asombrosa con la estructura sin escala de Internet.

Es posible que el principio más profundo de la vida sea el metabolismo: la conversión de las materias primas del entorno en la energía y las moléculas que las células necesitan en cada instante de su existencia. Las células necesitan acceder a diversos componentes. Nuestras propias células, por ejemplo, se nutren con los aminoácidos, los azúcares y los lípidos de los alimentos, amén de con las vitaminas y los minerales del agua, el oxígeno y otras sustancias esenciales. Emplean enzimas para recomponer los átomos de esas moléculas y formar nuevas enzimas, ácidos nucleicos, hormonas, moléculas ricas en energía, etcétera. La secuencia por la

cual una molécula se convierte en una forma molecular útil se llama vía metabólica. Casi sin excepción, esas vías no son lineales, sino que están ramificadas y entrelazadas. Una sola materia prima como la glucosa se reconfigura o fragmenta de muchas formas distintas. Las moléculas ricas en energía elaboradas durante la descomposición de este azúcar se utilizan para impulsar muchos otros procesos metabólicos. De modo que el metabolismo consiste en una larga red de reacciones químicas en la que a sustancias moleculares concretas las podemos considerar como nodos, y a las reacciones (que normalmente catalizan las enzimas) las podemos tomar por las aristas que enlazan un nodo con otro (véase figura 16.6).

Barabási y sus compañeros observaron las redes metabólicas de cuarenta y tres organismos metabólicos distintos: desde bacterias y plantas a formas de vida superiores como el gusano nematodo. Observaron que, en todos los casos, la función de la distribución de la conectividad no tenía escala, es decir, que la probabilidad de que un nodo tenga cierto número de enlaces responde a una ley de potencias. Esto implica que hay en esas redes algunos núcleos muy conectados que desempeñan un papel fundamental en la cohesión de la red. Muchas de las moléculas que representan esos núcleos, y su importancia relativa en la red, son las mismas en todos los organismos, lo cual es un eco del origen compartido de la vida.

La estructura sin escala de las redes metabólicas tiene un gran sentido desde el punto de vista de la evolución, porque hace que el metabolismo sea relativamente insensible a la pequeña incidencia de los rasgos aleatorios. Si una o dos enzimas son defectuosas, quizás a causa de un defecto genético, las aristas correspondientes del gráfico se debilitan o se rompen. Si es cierto que esto puede tener consecuencias muy dañinas para ciertas funciones biológicas, no tiene por qué, en una red sin escala, quebrar toda la red y hacer imposible la vida. Por lo tanto, podemos considerar la red sin escala como un ejemplo de buena construcción forjado en la exploración de ensayo y error de diversas opciones que es la selección natural.

Por otro lado, la debilidad de las redes sin escala es su sensibilidad frente a los ataques planificados. Si se retiran los nodos del núcleo, la red se viene abajo rápidamente. Esto sugiere oportunidades para el diseño inteligente de medicamentos para combatir las infecciones bacterianas. Los medicamentos que interfieren con las moléculas más conectadas tendrán un efecto desproporcionado en la viabilidad de las células atacadas.

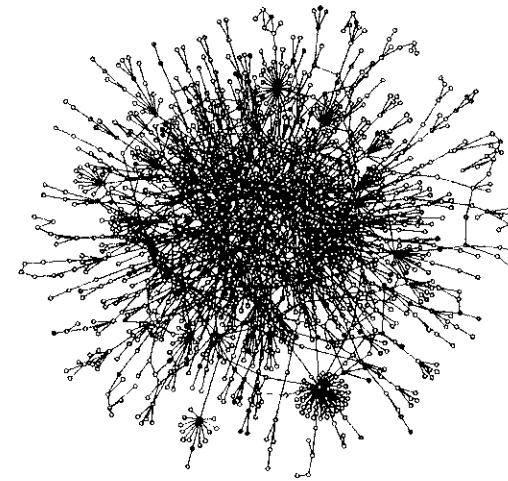


Figura 16.6. Parte de la red metabólica de la levadura. Los vértices son moléculas suministradas o manufacturadas por la red y los enlaces (aristas) consisten en las reacciones químicas de las enzimas que convierten una molécula en otra distinta.

Comprender la estructura de la red sería un primer paso en la selección de las metas apropiadas. En este escenario, las personas somos *cito-terroristas*, pero nuestra intención es, desde una perspectiva puramente humana, hacer el bien.

¿Podrían las masivas sobrecargas de las redes eléctricas de Estados Unidos y de Italia del año 2003 tener algo que ver con las vulnerabilidades topológicas de esas redes? Albert-László Barabási así lo cree, aunque no esté claro que todas las redes eléctricas no tengan escalas. “El apagón [de agosto] tiene poco que ver con defectos del tendido, negligencias o un mal diseño de la red –afirma–. La magnitud del apagón hay que buscarla en un aspecto de nuestro mundo globalizado que se ignora con mucha frecuencia: la vulnerabilidad a causa de la interconectividad”.¹³ Barabási señala de qué modo sistemas como las redes eléctricas son susceptibles de un fallo en cascada, donde el mal funcionamiento de un punto de la red desvía energía hacia otras líneas, lo cual desemboca en sobrecarga. “Los fallos en cascada son comunes en la mayoría de las redes complejas

–dice–. Al tiempo que celebramos que todos los habitantes de la tierra se encuentran a tan sólo seis apretones de manos, es preciso que aceptemos qué tan próximos están también sus problemas y vulnerabilidades”.¹⁴

LA COLONIZACIÓN

La destrucción voluntaria y el fallo accidental de los nodos no son los únicos peligros a los que se enfrentan nuestras redes sociales. Los virus informáticos representan una amenaza más insidiosa para las comunicaciones virtuales que el ciberterrorismo: en lugar de destruir la red, los virus aprovechan su extraordinaria conectividad para colonizarla y causar estragos en los nodos. Una vez más, una de las virtudes de la topología de Internet se vuelve contra la propia red. Los virus informáticos suelen extenderse a través del correo electrónico –por la transmisión de paquetes de información de un ordenador a otro–, de igual modo que los virus biológicos se transmiten entre personas en partículas del aliento o de los fluidos corporales. En cuanto se establece un enlace entre dos nodos, éstos pueden, al menos en potencia, contagiarse mutuamente.

El estudio del modo en que las enfermedades se extienden entre la población –la ciencia de la epidemiología– tiene una larga historia. Los informáticos han tomado prestados los modelos matemáticos desarrollados por los epidemiólogos para intentar comprender la diseminación de los virus informáticos. Uno de los enfoques estándar de la epidemiología es asumir que, en un momento cualquiera, una persona existe en uno de dos estados: sano o infectado. Los agentes sanos son susceptibles de contagiarse de los agentes infectados. Se supone que un encuentro entre los dos conduce al contagio, con una particular probabilidad. Al mismo tiempo, los individuos infectados tienen oportunidad de recuperar la salud (es decir, de volver a ser susceptibles de contagiarse). Así pues, una enfermedad se extiende con un ritmo igual al ratio de probabilidades de transmisión y de recuperación. A esto se le conoce como el modelo susceptible-infectado-susceptible (SIS).

Los epidemiólogos que recurren a este modelo se han dado cuenta de que predice un umbral de epidemia. Una enfermedad prospera, infectando con persistencia a una proporción constante de la población, si el ritmo de contagio es mayor que cierto umbral de epidemia; de otro modo,

muere rápidamente.* Y al parecer, algunas epidemias reales siguen este comportamiento. La idea de umbral es fundamental en los programas de vacunación: si se consigue que cierta proporción de la población esté vacunada, el ritmo de contagio se mantiene por debajo del umbral de epidemia y la enfermedad no puede transformarse en epidemia.

Trabajando en colaboración con Mark Newman, del Instituto de Santa Fe, Nuevo México, Duncan Watts ha observado que en las redes “que pequeño es el mundo” que ideó con Steven Strogatz, las posibles *enfermedades* también tendrían umbrales de epidemia dentro del modelo SIS. En otras palabras, si las redes sociales se parecen en algo a estas redes, las ideas de la epidemiología convencional son ciertas. Pero Internet no es un pequeño mundo de Strogatz y Watts, es un pequeño mundo sin escala. Stefan Bornholdt y sus compañeros de la Universidad de Kiel han demostrado que las conexiones de correo electrónico realizadas a través del servidor de su universidad se corresponden con una red sin escala (esto es, en términos de nodos de usuarios y enlaces entre ellos), pero la “red de conocidos” que define esta web electrónica también responde a esa misma tipología.

Los físicos Romualdo Pastor-Satorras, desde Barcelona, y Alessandro Vespignani, desde Trieste, han observado que esta diferencia modifica por completo la forma de difusión de los virus a través de Internet. Cuando recurrieron a simulaciones por ordenador para investigar el modelo SIS en una red sin escala, descubrieron que no existe ningún umbral. Independientemente de su ritmo de contagio, todos los virus informáticos pueden invadir todo el sistema, infectando cierta proporción de los nodos. Como los nodos infectados se pueden *curar* con la ayuda de los programas antivirus, los virus acaban muriendo, pero el proceso es muy lento. El *software* necesario para combatir un virus en particular sólo está listo al cabo de días o semanas de la primera infección, mientras que los virus pueden sobrevivir en el tupido entramado de conexiones de la web muchos meses o incluso años. Los investigadores estudiaron los datos disponibles sobre los virus difundidos entre los años 1996 y 2000 y observaron que, aunque la probabilidad de supervivencia de un virus desciende marcadamente en sus primeros meses de vida, lo normal es que la posibilidad de

* Técnicamente, el umbral equivale al punto crítico de una transición de fase en desequilibrio; como el punto crítico líquido-gas, salvo que los estados que separa son estados en desequilibrio.

infección no desaparezca del todo hasta mucho tiempo después. (Love Bug, un virus inmensamente dañino, sigue estando entre los siete virus más difundidos de la red, por mucho que, presuntamente, ya esté erradicado.)

Para la epidemiología convencional, este comportamiento es sorprendente. Los modelos estándar predicen que una infección viral o bien se convierte en epidemia o bien desaparece rápidamente. Por su parte, la lenta desaparición de los virus, y la carencia de un umbral de epidemia, parece ser una característica de transmisión peculiar de las redes sin escala. Este descubrimiento tiene tantas implicaciones buenas como malas. Lo malo es que incluso un virus de difusión lenta puede invadir el sistema y permanecer en él largo tiempo, pero, al mismo tiempo, el nivel de contagio es bajo: la fracción de nodos infectados se reduce muy rápidamente.

Así pues, la topología de la red es muy importante. A quienes quieren combatir los virus informáticos, es posible que no les basten los conocimientos de la epidemiología convencional. ¿Y si las redes de contacto social reales tampoco responden a ninguna escala? Si es así, es posible que tengamos que reconsiderar nuestras ideas de cómo se contagian las enfermedades reales. Como ya hemos visto, es extraordinariamente difícil cartografiar los contactos sociales. Sin embargo, un grupo de sociólogos de la Universidad de Estocolmo ha unido sus fuerzas con los físicos Gene Stanley y Luis Nuñez Amaral, de Boston, a fin de descubrir la red de contactos sexuales en una muestra aleatoria de casi tres mil suecos con edades comprendidas entre los dieciocho y los setenta y cuatro años. Y observaron que la distribución del número de parejas en los doce meses anteriores al estudio obedece a una ley de potencias. En otras palabras, la red de contactos sexuales no se corresponde con ninguna escala.

Si esta muestra es representativa de otros grupos de población, de ese estudio se deducen consecuencias muy serias para las estrategias para combatir enfermedades de transmisión sexual como el sida. En un red sin escala es extraordinariamente difícil erradicar una enfermedad por completo porque puede contagiar a toda la población sin importar cuál sea su ritmo de contagio. Cuando se dispone de una vacuna, la inmunización aleatoria de la enfermedad no puede contenerla ni siquiera aunque se ponga en tratamiento a una proporción elevada de la población (posiblemente, con unos gastos muy elevados).

Pero el panorama no tiene por qué ser tan sombrío. Como hemos visto, el talón de Aquiles de las redes sin escala es la desproporcionada influen-

cia de algunos nodos muy conectados: los *núcleos* que mantienen la cohesión del conjunto. Si alguien interrumpe los contactos de estos núcleos, la web entera se derrumba rápidamente. Pastor-Satorras y Vespignani han demostrado que, en tales circunstancias, enfocar los programas de inmunización en los individuos más promiscuos rebaja enormemente la vulnerabilidad de la red social a las epidemias de enfermedades de transmisión sexual. (Por igual motivo, un análisis de los mensajes de correo electrónico demuestra que *inmunizando* tan sólo un diez por ciento de los vértices escogidos en función de su elevado número de conexiones se puede cortar de raíz la difusión de un virus informático.)

En las redes de contactos sexuales lo normal es que identificar y tratar a los individuos clave no sea nada fácil. Sin embargo, Barabási y Zoltan Dezso, uno de sus estudiantes, han observado que incluso una campaña de tratamiento selectivo tiene efectos cruciales: eleva el umbral de epidemia de una red sin escala por encima de cero. Dicho de otro modo: aunque sólo se consiga aislar una pequeña parte de los nodos nucleares, hay probabilidades de erradicar la enfermedad. Cuanto más eficazmente llegue una política a los miembros más conectados de la red sexual (en el caso del sida), más alto el umbral de epidemia —esto es, más fácil es frenar la propagación de la enfermedad—. Por lo tanto, obligados a manejar recursos limitados, es mejor combatir una enfermedad infecciosa haciendo cuando menos algún esfuerzo por abordar estrategias de control de los individuos *nucleares* que promover una vacunación o inmunización generalizada y aleatoria y esperar que haya suerte.

UN MUNDO DE REDES

Las redes sin escala pueden ser una forma mucho más extendida de redes “qué pequeño es el mundo” que las redes recableadas de Strogatz y Watts. (En realidad, no está claro que *ninguna* de las redes “qué pequeño es el mundo” reales que se han estudiado hasta la fecha equivalgan a una red recableada.) Réka Albert y Albert-László Barabási revisaron los casos que primero estudiaron Steven Strogatz y Duncan Watts: el de la red película-actor y el de la red eléctrica del occidente de Estados Unidos. Para Strogatz y Watts, el único indicador de los comportamientos “qué pequeño es el mundo” era la coexistencia de un gran agrupamiento

de nodos con un corto *charpath*. Pero estos criterios no sólo especifican la topología de las conexiones, se aplican tanto a las redes recableadas como a las redes sin escala. Barabási y Albert observaron distribuciones de la conectividad sin escala tanto en el caso de los actores de cine como en el de las redes eléctricas. Por lo tanto, no existe una conectividad *media* significativa entre las estrellas de cine: el número de enlaces decrece suavemente (de acuerdo a una ley de potencias) desde Rod Steiger hasta el actor secundario más novato de una película de serie B.

Es posible que la red película-actor proporcione la evidencia mejor documentada de que disponemos hasta la fecha para sospechar que las redes sociales reales no tienen escala –aunque los estudios de las redes de colaboración científica (como la red de Erdős –página 417–), las colaboraciones musicales en el jazz y la red de contactos sexuales apoyan esa suposición–. Dando por sentado que esto es así, Ricardo Alberich y sus compañeros de la Universidad de las Islas Baleares en Mallorca han observado que las redes sociales pueden proporcionarnos una especie de frontera que nos permita distinguir la realidad de la ficción. La red de amistades de Spiderman, dicen, es que no parece real.

Los cómics de la Marvel, que empezaron a publicarse en 1939 por el sello Timely Comics, describen un extraño universo de superhéroes: el Capitán América, los Cuatro Fantásticos, la Patrulla X y miles más. Estos personajes se mueven en el mismo mundo, de modo que, a veces, sus historias se solapan y muchos de ellos pueden aparecer juntos en el mismo volumen. Cuando esto ocurre, afirman los investigadores españoles, se produce una “conexión social”, un enlace entre dos personajes de la red “Universo Marvel”. En esta red coexisten unos seis mil quinientos personajes (nodos), que aparecen en unos trece mil volúmenes. ¿Tiene esa red los mismos rasgos topológicos que una web real como la red película-actor? Más o menos. Es decir, la probabilidad de que un cómic en particular tenga cierto número de personajes sigue una ley de potencias.* Hasta cierto punto, la red de Marvel parece realista, pero, según concluyen los investigadores, no puede ocultar por completo sus orígenes artificiales. Para Alberich y sus compañeros, el agrupamiento de la red

es mucho menor que el de las redes sin escala o las redes pequeño mundo y, en realidad, ligeramente mayor que el de un grafo aleatorio. El nivel de agrupamiento denota la extensión hasta la cual los personajes forman círculos de amistades: recordemos que en una red muy agrupada, es más probable que dos personas que tienen un amigo en común se conozcan que que se conozcan dos personas escogidas al azar.

El pequeño grado de agrupamiento del universo Marvel revela su naturaleza ficcional, *ad hoc*, lo cual revela que inventar un universo es mucho más difícil de lo que parece. En cierto sentido, esto no puede sorprendernos. Al fin y al cabo, los guionistas de la Marvel no conocían el aspecto de las redes sociales y no era su intención crear una que pareciera *realista*. Se limitaban a reunir a dos o a más personajes cuando la combinación se les antojaba interesante. Por supuesto, las redes sociales reales tampoco están planificadas. Es sólo que la red social de Spiderman y la suya, lector, o la mía, parecen haberse desarrollado de acuerdo a distintos principios. Todavía no está claro cómo surgen esas diferencias, pero si pudiéramos descubrir las razones, podríamos aprender más de la forma en que se forjan las conexiones reales en el mundo real.

Las redes sin escala empiezan a parecer un aspecto tan fundamental de la cultura que lo que sorprende e intriga es que *no* aparezcan. La red global del comercio, la red ferroviaria de la India, la actividad de las empresas de subastas en línea como eBay, las líneas aéreas chinas... todos estos ámbitos responden a una ley de potencias (si bien, muchas veces, con una importante condición previa, descrita más adelante). Cuando surgen estructuras de liderazgo y las estudiamos recurriendo al modelo de juego de minorías de Challet y Zhang (página 392), se genera una jerarquía sin escala en la que un puñado de individuos clave ejerce una influencia desorbitada. Al parecer, en cuanto las personas empezamos a interactuar y a establecer contactos, la ubicua distribución gaussiana que tanto asombró a los primeros estudiosos de las estadísticas sociales se desvanece, y en su lugar surge una distribución sin escala.

¿SE HACEN LOS RICOS SIEMPRE MÁS RICOS?

Cuando una pauta resulta recurrente en muchos sistemas que no guardan una relación obvia entre sí, hemos de sospechar la existencia de un

* En realidad, la ley de potencias se obtiene sólo cuando el número de personajes que aparecen juntos en una historia pasa de diez. Para grupos más pequeños, las estadísticas se desvían de una distribución de ley de potencias.

principio causal común, un principio que puede formularse en los términos más generales sin referencia a las particularidades de este o aquel caso. Tienden a surgir transiciones de fase bruscas cuando, por ejemplo, en los sistemas de muchas *partículas* hay muchas fuerzas que compiten entre sí; es decir, una propensión al orden y la influencia perturbadora de un ruido. ¿Cuáles, entonces, son los principios genéricos que crean las redes sin escala?

Tanto los grafos aleatorios de Paul Erdős y Alfred Rényi como los pequeños mundos recableados de Steven Strogatz y Duncan Watts se construyen mediante procesos puramente aleatorios. Uno escoge los vértices del grafo aleatoriamente y los une mediante una arista. Pero Barabási y Albert subrayan que la mayoría de las redes no crecen de este modo. En vez de ello, la tendencia es que cada nuevo nodo se enlace con uno que ya está bien conectado. Es más probable que los actores recién llegados interpreten papeles secundarios en películas con estrellas consagradas que que integren el reparto de películas llenas de desconocidos. Por lo tanto, a mayor fama, mayor también la probabilidad de atraer nuevos enlaces.

De igual modo, una especie de “magnetismo de la fama” opera en la evolución de la World Wide Web o de la red creada por las citas científicas (otro sistema sin escala; véase la página 285). Las páginas web con un elevado número de hipervínculos entrantes son muy conocidas y se convierten en la elección natural de todos los diseñadores de páginas web que colocan en sus páginas un hipervínculo para pasar a nuevas fuentes de información. Todos citamos periódicos famosos porque son las fuentes que todos los demás citan o porque es más probable que las personas que nos escuchan los hayan leído. Dicho de otro modo, la fama llama a la fama.

A uno le gustaría pensar que en todo esto subyace cierto principio meritocrático, que las páginas web reciben muchos enlaces, que los periódicos son muy citados y que los actores aparecen en muchas películas porque *son buenos*. Sería sorprendente que no fuera así. Sin embargo, la fama está tan reservada a lo bueno como a lo malo. (Sin duda, el lector podrá aportar sus propios ejemplos.)

Si todo vértice nuevo de un grafo en crecimiento estuviera invariablemente vinculado con los vértices más conectados, no estaríamos hablando de una red sin escala sino de una red centralizada en torno a un solo nodo nuclear. No es esto lo que suele ocurrir cuando las redes crecen sin planificación. Si el grafo es grande, para cada nuevo vértice

será extraordinariamente difícil *encontrar* el vértice más conectado y lo más probable es que *escoja* otro vértice en su lugar. En el mundo del cine esta variedad de elección es inevitable: ni siquiera la estrella más famosa y con más relaciones (conexiones) puede aparecer en toda película nueva que se rueda. Así que la formación de nuevos enlaces con los vértices más conectados sólo puede quedarse en tendencia.

Albert-László Barabási y Réka Albert han demostrado que esa tendencia es el único ingrediente necesario para desarrollar una red sin escala. Imaginan un grafo que crece por adición de nuevos vértices, cada uno de los cuales está vinculado con un vértice ya existente elegido al azar *pero* con una tendencia que da a los vértices más conectados la posibilidad de escoger nuevos vínculos. La red resultante es una red sin escala. Muchas redes organizativas humanas evolucionan de acuerdo a este principio de “el rico se hace más rico”: por ejemplo, es más probable que las grandes empresas se hagan con nuevos clientes (aunque no está garantizado), en parte porque pueden conseguir más y mejor publicidad.

Que la conectividad de un vértice pueda, en algún sentido, equipararse con su *riqueza* (pensemos, por ejemplo, en las relaciones comerciales de una empresa), sugiere que en una sociedad gobernada por la libertad de elección y en la que la propia capacidad para hacerse con una cuota de mercado viene determinada por la cuota de mercado que ya se tiene, que la distribución de la desigualdad se corresponda con una ley de potencias es el resultado más probable. Cabe esperar, por ejemplo, que hubiera diferencias en el acceso o el control de los recursos de un mercado libre, pero el proceso de crecimiento sin escala produce más desigualdades que una distribución aleatoria de la riqueza. Lo que en consecuencia se produce es un número significativo de *acontecimientos* extremos: individuos muy ricos o empresas muy grandes. Como el sociólogo George Kingsley Zipf demostró en los años treinta, es precisamente este comportamiento de ley de potencias el que se observa en muchas distribuciones de tamaño de la sociedad, desde la del tamaño de las empresas (página 313) al tamaño de las ciudades y a la distribución de las rentas (página 292). Esto no quiere decir que las disparidades de ley de potencias en un mercado libre sean inevitables. Lo que nos sugiere es que, si decidimos que esas disparidades no son deseables, es muy probable que tengamos que restringir parte de la libertad con la que opera el mercado.

Pero este tipo de crecimiento en red no siempre desemboca en un grado tan elevado de desigualdad. Gene Stanley y sus compañeros de la Universidad de Boston han examinado con más detenimiento las redes que presuntamente no se corresponden con ninguna escala de Barabási y Albert y han descubierto que, después de todo, parece que tienen un techo. Por ejemplo, la ley de potencias de la red película-actor, que parece recompensar inexorablemente a unos cuantos individuos privilegiados con contactos todavía mejores, empieza a decaer en el extremo más alto: los actores mejor conectados tienen menos enlaces de los que la ley de potencias predecía (véase figura 16.7).*

¿Qué trunca la ley de potencias? Stanley y sus compañeros afirman que en el mundo real hay factores que, invariablemente, imponen un techo en el número de enlaces que un nodo puede adquirir. Los actores tienen un tiempo limitado y trayectorias profesionales finitas –ni siquiera el más prolífico puede aparecer en mil películas–. Los viejos documentos científicos, incluso los de mayor influencia, son víctimas del abandono –los investigadores ya no leen los más antiguos; en vez de ello, citan una revisión moderna o un manual actualizado–. Ningún aeropuerto soporta una cantidad de tráfico ilimitada y los costes o la demografía local establecen límites a su expansión. Si los vértices tienen un límite de capacidad o son menos capaces de aceptar nuevas conexiones a medida que pasa el tiempo (una especie de envejecimiento), la estructura sin escala de la red desaparece para los nodos más conectados.

Otras redes sociales ni siquiera se corresponden con una ley de potencias en ningún momento. En vez de ello, la conectividad decae rápidamente en el caso de los enlaces más conectados, de manera que la probabilidad de que existan *supernúcleos* es muy pequeña. Esto se cumple, por ejemplo, en el caso de tendido eléctrico del sur de California y también en la red que une los aeropuertos del mundo a través de las rutas aéreas. Además, Stanley y sus compañeros se dieron cuenta de que eso era lo que ocurría con algunas redes sociales: las redes de amistad de cuarenta y tres mormones de Utah (comunidad en la que, normalmente,

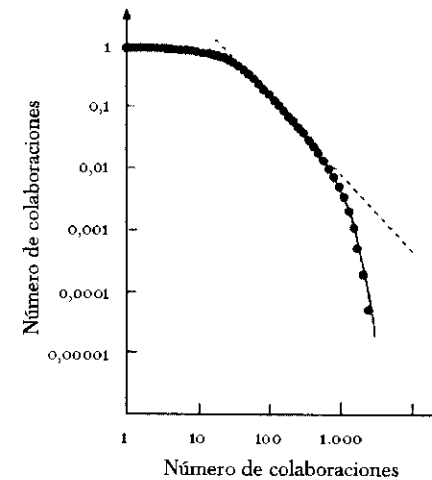


Figura 16.7. Los actores más conectados del mundo del cine no siguen la ley de potencias que caracteriza al resto de la red: los que suman más de trescientas colaboraciones tienen bastantes menos conexiones de las que predice la ley de potencias (se encuentran por debajo de la línea recta). En otras palabras, existe un límite superior al número de colaboraciones en las que un actor puede intervenir.

los lazos son muy estrechos y bien definidos) y de varios cientos de estudiantes de un instituto de Wisconsin. Al parecer, la distribución de probabilidades de todas estas redes era gaussiana: hay una *escala* media de conectividad. No obstante, también hay redes “qué pequeño es el mundo”, tal y como revela el lento incremento de la longitud media de las trayectorias cuando el número de vértices se incrementa.

Por lo tanto hay varios tipos de pequeños mundos. La redes recableadas definidas por Strogatz y Watts son un ejemplo de un pequeño mundo “de una sola escala” en el que una conectividad media se privilegia por encima de las demás y una marcada caída en las cifras de los vértices muy conectados. En el otro extremo están las redes sin escala que encontraron Barabási y sus compañeros, donde la codicia y la promiscuidad no conocen límites e incluso los vértices exageradamente conectados no son raros. Entre las dos hay, según la expresión de Barabási, “todo un zoológico de redes”.¹⁵

Sean cuales sean sus propiedades topológicas concretas, una red “qué pequeño es el mundo” rara vez responde a una planificación, sencilla-

* Las estadísticas de esta red se ven afectadas, sin embargo, por las ambigüedades de las series televisivas. Stanley y sus compañeros las incluían en su estudio; Barabási y los suyos no. En la base de datos de los actores, una serie de televisión aparece como un solo título aunque pueda ser en realidad una serie de larga duración con muchas estrellas invitadas que, en realidad, no coinciden en ningún capítulo. Esto puede generar enlaces espurios y afectar la adscripción de la red a una ley de potencias.

mente, surge de las leyes que gobiernan la conexión de nuevos vértices. Sin embargo, desde la ciudad india de Bangalore, Nisha Mathias y Venkatesh Gopal sostienen que una red de ese estilo tiene un gran atractivo desde el punto de vista de la ingeniería, porque lo normal es que suponga una solución ideal entre dos necesidades contrapuestas: maximizar la conectividad de los vértices y minimizar la longitud del *cableado*. En general, conectar dos nodos de una red tiene unos costes económicos proporcionales a la distancia que hay entre ellos. Se necesita el doble de cables para conectar dos plantas eléctricas situadas a cien kilómetros de distancia que para conectar otras dos plantas situadas a cincuenta. Una red se comunica muy eficazmente si todos los nodos están conectados entre sí directamente, pero para eso hace falta una enorme cantidad de cableado. Por eso los constructores de redes prefieren menos conexiones y más cortas y los usuarios quieren más y más largas (de ahí que haya tantos atajos) Mathias y Gopal han demostrado que la primera de estas opciones se corresponde con una retícula regular y la segunda con una red aleatoria. Una red “qué pequeño es el mundo” es un modo de tener conexiones de largo alcance con poco más *wiring* del que hace falta para una retícula donde sólo hay enlaces *locales*.

La física de redes es una ciencia muy joven, pero ya ha revelado algunas reglas aparentemente profundas que se aplican a nuestras pautas e instituciones sociales. De las consecuencias de las topologías de las redes en procesos de cambio como la difusión de las epidemias o de normas culturales sólo se han esbozado. En economía hemos visto que la estructura de las redes comerciales ha sido identificada como una de las cuestiones clave para comprender cómo surge la compleja dinámica del mercado. Según los organizadores de un taller de econofísica del Instituto de Santa Fe (1996), “en realidad, los mercados funcionan por medio de redes de comerciantes y lo que ocurre en ellos puede reflejar la estructura de esas redes, que a su vez puede depender del modo en que esas redes surgen”.¹⁶

En cierto sentido se puede ver la teoría de redes como una extensión natural de la física estadística, como una especie de versión *autoadhesiva* de los sistemas de muchas partículas en la que los encuentros entre individuos conducen no sencillamente a colisiones, sino a la formación de enlaces elásticos y permanentes. A continuación, la red se convierte en una especie de mapa de la historia del sistema, igual que la expansión

de Internet a lo largo del tiempo está registrada en la red creciente que va tejiendo. En las redes el pasado es importante: el recuerdo del mismo está congelado y configura el presente. Las redes nos proporcionan una imagen gráfica de hasta qué punto nuestras vidas se han enredado de formas tan innumerables que ya casi no las podemos entender.

XVII
ORDEN EN EL EDÉN
APRENDIENDO A COOPERAR

Ni sé, si es que los hombres son como las ovejas, por qué necesitan gobierno alguno; y si son como lobos, cómo pueden sufrirlo.

SIR WILLIAM TEMPLE (1751)¹

Al transgredir la ley de la Naturaleza, quien la ofende declara que vive de acuerdo a otra regla que la de la razón y la equidad [...] y así se convierte en alguien peligroso para la humanidad, el vínculo que ha de protegerles del daño y la violencia, él lo desaira y lo quiebra [...] en este sentido, todo hombre, por el derecho que tiene de preservar a la humanidad en general, puede frenar o, cuando sea necesario, destruir las cosas que le son nocivas, y de ese modo desatar el mal sobre quien ha transgredido esa ley y hacer que se arrepienta de lo que ha hecho y, por lo tanto, disuadirle y, con su ejemplo, también a otros de causar mayores perjuicios.

JOHN LOCKE (1690)²

Sería un juego de niños bombardear la carretera que hay detrás de las trincheras enemigas, atestada como debe de estar de carretas de provisiones y de carros de agua, y convertirla en un páramo cubierto de sangre [...] pero al final hay silencio. Al fin y al cabo, si impedimos que nuestro enemigo reciba sus raciones, su remedio es sencillo: él impedirá que nosotros recibamos las nuestras.

IAN HAY (1916)³

*¿*Qué nos hace civilizados? Las muchas respuestas a esta pregunta nos dicen mucho de quienes las dan, pero no nos sirven para llegar a un

consenso. Desde la Ilustración, la mayoría de los comentaristas se han centrado en la tensión entre libertades personales y colectivas en una sociedad civilizada, una tensión que exige compromiso. Según Sigmund Freud,

la libertad individual no es un bien de la cultura, pues era máxima antes de toda cultura, aunque entonces carecía de valor porque el individuo apenas era capaz de defenderla. El desarrollo cultural le impone restricciones, y la justicia exige que nadie escape a ellas. Cuando en una comunidad humana se agita el ímpetu libertario puede tratarse de una rebelión contra alguna injusticia establecida, favoreciendo así un nuevo progreso de la cultura y no dejando, por tanto, de ser compatible con ésta; pero también puede surgir del resto de la personalidad primitiva que aún no ha sido dominado por la cultura, constituyendo entonces el fundamento de una hostilidad contra la misma. Por consiguiente, el anhelo de libertad se dirige contra determinadas formas y exigencias de la cultura, o bien contra ésta en general. Al parecer, no existe medio de persuasión alguno que permita inducir al hombre a que transforme su naturaleza en la de una hormiga; seguramente jamás dejará de defender su pretensión de libertad individual contra la voluntad de la masa. Buena parte de las luchas en el seno de la Humanidad giran alrededor del fin único de hallar un equilibrio adecuado (es decir, que dé felicidad a todos) entre estas reivindicaciones individuales y las colectivas, culturales; uno de los problemas del destino humano es el de si este equilibrio puede ser alcanzado en determinada cultura o si el conflicto en sí es inconciliable.⁴

¿Cómo, sin embargo, limitar esos poderes y restricciones? ¿Dónde debería residir el compromiso? Para Hobbes, la civilización puede surgir del salvaje Estado de la Naturaleza sólo si, voluntariamente, aceptamos el yugo de la dictadura, renunciando a todos nuestros derechos salvo el de la existencia. El contrato social de John Locke era mucho más cooperativo: los ciudadanos ceden ciertas libertades al estado sólo mientras el estado sirva a sus intereses. En otras palabras, el estado no tiene el poder casi ilimitado que Hobbes le concede. El pueblo, dice Locke en *Dos tratados sobre el gobierno civil* (1690), tiene derecho a alzarse y a desplazar a un gobierno que quiebra el contrato social; no de forma capri-

chosa, porque eso lleva a la anarquía, sino tras “una larga cadena de Abusos, Prevaricaciones y Artificios”.⁵ Además, Locke afirma que hay que protegerse contra los abusos de poder, ante los cuales Hobbes (lo cual quizá resulta extraño dada su visión pesimista de la naturaleza humana) responde mayormente con indiferencia.

Allí donde se establece el equilibrio de poder entre el estado y el pueblo, se produce el reconocimiento de que la paz civil y el orden llegan a expensas de las restricciones a la libertad individual, bien autoimpuesta, bien aplicada por el estado. Desde el siglo XVII, todos los filósofos del liberalismo coinciden en que esto tiene que suponer, en el menor de los casos, la renuncia a perjudicar a los demás. Karl Popper dijo:

La libertad absoluta es un sinsentido [porque] necesitamos una sociedad en la cual la libertad de cada persona sea compatible con la libertad de otras personas.⁶

Freud estaba de acuerdo, pero reconoció que, como Hobbes había afirmado, esto es contrario a nuestros impulsos de agresión y destrucción. Como resultado de ello, afirmaba, la agresión de la humanidad “es introyectada, internalizada, devuelta en realidad al lugar de donde procede: es dirigida contra el propio yo”.⁷ En consecuencia, hay un sentido de culpa que todo lo impregna y que se manifiesta en la religión proscriptiva y en el concepto de pecado original. Es posible. Sin embargo, la presunción común de tales argumentos es que, al acceder a no hacer daño al vecino, lo que uno hace es coartar los propios intereses, actuar en contra de la razón, si es que la *razón* equivale a la supervivencia darwiniana del más fuerte en lugar de a la ley divina de Locke o al imperativo categórico de Kant. Al fin y al cabo, ¿demuestra el guepardo algún altruismo por la gacela?

En la segunda mitad del siglo xx, todas estas discusiones acerca de la libertad, el gobierno y el poder se han demostrado cortas de miras de un modo profundo y sorprendente. Generalmente, la filosofía política ha considerado que la humanidad es básicamente mala y, por tanto, necesita que cierta autoridad la fuerce a la buena conducta, o que es básicamente buena, lo cual, por lo tanto, garantiza que, en su mayor parte, las relaciones con nuestros vecinos sean civilizadas. Además, alguna teoría que tiene su origen en la frivolidad de las charlas de salón ha demostrado

que la buena conducta puede surgir y perdurar incluso entre enemigos –e incluso con total ausencia de consideraciones morales.

Normalmente, a la llamada “teoría de juegos” no se la considera parte de la física sino de la matemática (si bien con un sello marcadamente empírico). Sin embargo, está claramente dentro del espíritu de la clase de física social que hemos considerado hasta la fecha, en la cual el comportamiento de un grupo de individuos surge de la formación intuitiva pero sólida a partir de las interacciones entre ellos. Al explorar esta teoría en este capítulo y en el siguiente, nos encontraremos con algunos fenómenos que nos resultan familiares: indiferencia por los detalles, cambios bruscos en pautas de conducta o en poblaciones estadísticas, sensibilidad a las fluctuaciones, y *leyes* generalizables.

Algunas de las conclusiones de la teoría de juegos tocan las raíces de un tema fundamental: la forma en que debemos vivir y gobernar nuestra vida. Esas conclusiones pueden poner en tela de juicio sistemas de creencias fundamentales. Y puesto que ya se toman en serio en los cenáculos del poder, es muy importante tratar de comprender con la mayor claridad posible lo que se puede y no se puede deducir de ellas hasta qué extremo pertenecen a las interacciones humanas reales. En cierto estadio de su desarrollo, la teoría de juegos parecía defender una política de Guerra Fría en las relaciones internacionales beligerantes que habría sido desastrosa de haber sido adoptada con rigor; sólo tiempo más tarde llegamos a percatarnos de por qué esa conclusión no era del todo correcta. Tanto liberales como conservadores pueden encontrar apoyo para sus creencias dentro de esta disciplina, sobre todo si escogen cuidadosamente aquellos de sus hallazgos que más les convienen. Más que ninguna otra área de la ciencia social matemática, la teoría de juegos exige que confrontemos los resultados objetivos con consideraciones morales y recurramos a la cautela cuando tengamos la tentación de formular conclusiones técnicas con términos antropomórficos. En relación con la política, la teoría de juegos es dinamita en potencia.

¿ES NECESARIO EL GOBIERNO?

En aquellos países donde se ha puesto en práctica, la base democrática de la teoría política de John Locke se toma ahora como la forma

correcta de gestionar una sociedad. Hasta tal extremo es así que resulta difícil imaginar que nadie pudiera pensar de otra forma, excepto por puro interés. Pero los *Dos tratados sobre el gobierno civil* fueron escritos como contra argumento a una alternativa que en la época era muy defendida: la idea de que los reyes gobernaban por derecho divino. Era lo que afirmaba Robert Filmer en *Patriarcha; or The Natural Power of Kings* [*Patriarca, o el poder natural de los reyes*], publicado en 1680 pero escrito antes de la guerra civil inglesa, cuando el clima político era muy distinto. El soberano de Filmer es todavía más temible que el de Hobbes. Al menos, Hobbes postulaba que era elegido de (y por) las masas, mientras que para Filmer el rey puede gobernar a voluntad y con impunidad porque desciende de Adán y su autoridad proviene de Dios. Naturalmente, esto fue música para los oídos de Carlos I, que nombró caballero a Robert Filmer antes de descubrir por sí mismo el destino de los monarcas que gobiernan llevados por el capricho.

El siglo XVII, Filmer contaba con el peso de la historia. Desde la Antigüedad, la mayoría de los países y estados habían sido monarquías y se consideraba que el *súmmum* de la civilización lo encarnaban la Grecia y la Roma antiguas y autocráticas, algunos de cuyos dirigentes proclamaron su propia divinidad. Platón admitió que la monarquía podría degenerar en tiranía bajo un rey inmoral, pero en su lugar prefería optar por la aristocracia: el gobierno de unos pocos hombres de calidad. Platón rechazaba y deploraba la democracia –literalmente, “el gobierno del pueblo”–, porque en las masas habitaban muchos hombres malvados e inmorales.

Y no es que no se hubiera intentado. Tras una sucesión de tiranías en los estados griegos de los siglos VII y VI a. de C., Atenas consolidó un gobierno democrático en el año 507 a. de C. En muchos aspectos, aquella Atenas fue un atractivo anuncio de este sistema de gobierno: la democracia ateniense alentó el nacimiento de Sófocles, Eurípides, Aristófanes y Tucídides. Fue la sociedad que construyó el Partenón y que produjo las pinturas de Apeles, el más grande de los artistas de la Antigüedad. Pero finalmente, los atenienses sufrieron una derrota devastadora a manos de Esparta en la segunda guerra del Peloponeso y su democracia acabó en el año 411 a. de C.

En cualquier caso, es difícil decidir el mejor sistema de gobierno si antes no se ha decidido por qué el gobierno es necesario. Platón y sus coetáneos no ponían en duda la necesidad de que existieran dirigentes, y lo

más importante era cómo conseguir que fueran buenos y no malos. Para Hobbes, esto era secundario: no había dirigentes mejores que otros, pues, ¿cómo podía evitarse que el hombre librase la guerra contra su vecino? Locke estaba más inclinado a ver el bien de la humanidad. También habló de un estado natural que existía antes que las naciones y los gobiernos, pero que para él era un benigno Edén: “Los hombres conviven de acuerdo a la razón, con autoridad para juzgarse entre sí”.⁸ Aquí, “razón” significa adhesión a una especie de principio divino que respeta verdades “evidentes” como “no matarás”: “La razón [...] enseña a toda la humanidad [...] que siendo iguales e independientes, nadie debería atentar contra la vida, la salud, la libertad o las posesiones de otro”.⁹

Por lo tanto, el estado natural de Locke es muy distinto de la idea de Hobbes de que cada hombre actúa por propio interés, y es muy probable que Locke tuviera en mente a Hobbes cuando dijo:

Y en esto tenemos la diferencia básica entre el estado natural y el estado bélico, que, por mucho que algunos hombres los hayan confundido, están tan alejados como un estado de paz, buena voluntad, ayuda mutua y preservación, está alejado de un estado de enemistad, malicia, violencia y destrucción mutua.¹⁰

En su queja contra la visión brutal de la conducta humana de Hobbes, Locke no estaba solo. Su mecenas, Lord Ashley Cooper, tercer conde de Shaftesbury, lo emuló en 1711 cuando arremetió contra Hobbes asegurando que “olvidó mencionar la Amabilidad, la Amistad, la Sociabilidad, el Amor de la Compañía y la Conversación, el Afecto Natural, y cualquier cosa de este tipo”.¹¹ Es comprensible que Locke imaginara que, en un estado natural, las personas se guiarían por este tipo de cosas, puesto que su fe en la naturaleza humana se apoya en el poder divino sobre los hombres. Hobbes, el ateo (eso cabe deducir), adoptó un punto de vista menos coloreado de rosa.

Los axiomas optimistas de Locke, por tanto, le permitían el lujo de pensar en un sistema de gobierno menos opresivo, de modo que el contrato social entre el ciudadano y el gobierno tenía validez únicamente en tanto los dirigentes sirvieran al bien común. Para garantizar que el gobierno no se transforme en una oligarquía tiránica, Locke insiste en que al poder hay que ponerle freno y buscar su equilibrio. La dirigencia tiene que divi-

dirse en tres ramas: legislativa, ejecutiva y judicial; cada una de las cuales debe tener autoridad para limitar los abusos de las demás. En la Inglaterra del siglo XVII, el Parlamento, el rey y los tribunales cumplían esos papeles. En Estados Unidos de hoy en día, sus equivalentes son el Congreso, el presidente y el Tribunal Supremo.

Pese a su generosa visión de la naturaleza humana, Locke admite que hay criminales y canallas. Y su remedio, mientras los hombres vivan en un estado natural, es una implacable y bíblica “ley natural” que permite que “quien derrame la sangre de un hombre, por un hombre su sangre ha de ser derramada”.¹² Parece que el Edén de Locke no era necesariamente tan tranquilo. Pero cuando existe un Estado, estas sanciones ya no recaen sobre el individuo: la ley natural cede ante la “ley positiva” que decreta y aplica el Estado legislativo. En realidad, éste es el principal propósito del Estado: mantener la ley, el orden y la justicia; particularmente, por lo menos en lo que concierne al materialista Locke, en lo relativo a las posesiones: “La grande y más importante meta de los hombres al unirse en comunidades y someterse a un gobierno es la preservación de sus propiedades”.¹³

En tanto esto sea así, todo está bien. Por lo tanto, de la fe de Locke en la bondad humana surge la idea de que el Gobierno debería interferir en la vida social lo menos posible. Es la piedra angular de la mayor parte de la filosofía política liberal. Emmanuel Kant argumentó de modo similar contra el Estado paternalista, incluso cuando (o tal vez precisamente cuando) el Estado nos dice que actúa por nuestro propio bien. Las ideas políticas de Kant fueron recogidas por el prusiano Wilhelm von Humboldt en *Ideas para una definición de los límites de la acción del Estado* (1851) y por John Stuart Mill, quien en su ensayo *Sobre la libertad* (1859) afirmó: “el único propósito por el cual el poder se puede ejercitar con pleno derecho sobre cualquier miembro de una comunidad civilizada –contra la voluntad de ese miembro– es evitar que haga daño a otros”.¹⁴

Mill incluso defendió el derecho del individuo a hacerse daño a sí mismo en tanto esto no perjudicase a los demás. En la base de su filosofía libertaria está la benigna matemática social del utilitarismo, que el filósofo definió del siguiente modo:

El credo que se acepta como la fundación de la moral, la utilidad o el principio de la mayor felicidad, sostiene que las acciones son

más justas en tanto tienden a fomentar la felicidad, y malas en tanto tienden a producir lo contrario de la felicidad. Por felicidad se entiende placer y la ausencia de dolor; por infelicidad, dolor y la privación de placer.¹⁵

Para algunos filósofos de la política, incluso un intervencionismo mínimo del Estado era intolerable. Rousseau postulaba un anarquismo romántico basado en la creencia de que la civilización está degenerada y sólo el salvaje primitivo puede ser noble y bueno. El hombre es bueno por naturaleza, afirmó Rousseau en 1754, y son las instituciones las que lo hacen malo. Por lo tanto, las actividades y metas de la sociedad civilizada —las artes y las ciencias, la agricultura organizada y la industria— corrompen. La versión de Rousseau del Contrato Social, que en 1762 expuso en su libro del mismo título, no va más allá de Locke en la defensa de la democracia y la desacreditación del derecho divino de los soberanos (pero como incluso esto era demasiado en la peligrosa Francia prerrevolucionaria, se vio forzado a huir a Alemania). Sin embargo, en palabras de Bertrand Russell, su agenda era mucho más radical:

Europa es el continente más infeliz, porque es el que tiene más grano y más hierro. Para deshacer el mal, sólo es necesario abandonar la civilización, porque el hombre es bueno por naturaleza, y el hombre salvaje, cuando ha comido, está en paz con la naturaleza en su conjunto y es amigo de todos sus congéneres.¹⁶

Casi parece aquí como si se hubiera desviado de su camino para mostrarnos el punto débil de su sueño, al que él mismo es ajeno. Los leones también miran con benevolencia a su presa, *sólo después que han comido*. Pero es la búsqueda del alimento lo que aviva el fuego del conflicto y de la guerra. Sea salvaje o civilizado, cuando el hombre tiene hambre, puede hacer lo que sea para procurarse alimento. Y somos muchos en un mundo de recursos limitados. Incluso en el siglo XVIII esto era claro, y la predicción de Malthus de que las cosas podrían empeorar (página 70) condujo a Darwin a ofrecer una imagen muy distinta del estado natural: rojo en fauces y garras, como dijo Alfred Tennyson.

La teoría de la selección natural de Darwin parece retrotraernos al mundo hobbesiano, un mundo de grosera barbarie, en el que la natura-

leza nos advierte que cojamos cuanto podamos y dejemos que el diablo se lleve a nuestro vecino. Se puede educar a las personas en la contención, pero el darwinismo hace del egoísmo la ley de la selva. El propio Darwin creía que la humanidad está a salvo de la ley salvaje de la naturaleza en virtud de su tendencia a la socialización. En realidad, para él, la socialización es un rasgo esencial de nuestra capacidad evolutiva: “La escasa fuerza y rapidez del hombre, y su carencia de armas naturales, etcétera, están más que compensadas por sus [...] cualidades sociales, que le permiten dar y recibir ayuda de sus congéneres”.¹⁷ Pero muy pronto, quizá de modo predecible, muchos se valieron de la selección natural para justificar la agresión en lugar de para defender la cooperación. Matar o ser matado, ésa era la ley.

Algunos quisieron escapar de esta perspectiva tan difícil de digerir. En 1902, el príncipe ruso Piotr Kropotkin publicó *El apoyo mutuo*, obra que pretendía demostrar que la cooperación, y no la competencia, es lo innato en el ser humano. Citó ejemplos que iban desde las costumbres de los nativos polinesios a la formación de los gremios medievales. Kropotkin estaba menos motivado por un deseo de argumentar a favor del mayor bien de la humanidad que por la necesidad de afirmar que la bondad humana era la base de sus opiniones políticas anarquistas: si el ser humano tiene una inclinación natural a cooperar, ¿por qué iban a ser necesarios los gobiernos? Para apoyar su tesis, sin embargo, sólo contaba con anécdotas, mientras que los darwinistas contaban con la ley natural.

Además, ni siquiera los ejemplos de altruismo de Kropotkin pueden soslayar la desgraciada verdad de que la civilización tiene sus descontentos: sus gorriones y sus criminales. No todos jugamos al mismo juego. El Estado de Locke estaba diseñado para apresar y castigar a ladrones, vagabundos y asesinos. Por supuesto, muchas personas violan la ley porque no tienen un céntimo y están desesperadas, o llevadas por una pasión violenta, o porque sufren una perturbación mental. Pero otras lo hacen sencillamente porque quieren obtener un beneficio y estiman que merece la pena correr el riesgo.

La negativa a cooperar con la sociedad no tiene por qué equivaler a robo obvio o al perjuicio de otros. Que otra persona evada impuestos tiene sobre mí (y sobre cualquier otro) un efecto despreciable; pero, por una vez, esa expresión tan infantil, “es que todos lo hacen”, cobra su sentido. El problema es tan antiguo como la vida en común. En la Edad

Media, los pueblos tenían terrenos comunales adonde todos podían llevar su ganado. El sistema dependía de la contención. Si alguien llevaba al prado comunal más animales que los demás, sacaba ventaja a expensas de un agotamiento ligeramente más rápido del pasto. Y cuando una persona lo hacía, otras seguían su ejemplo. En consecuencia, se produjo “la tragedia de los comunes”, que no tardaron en quedar yermos. Y ahora que en nuestros mares empieza a agotarse la pesca, que nuestros ríos están contaminados y que nuestros cielos están llenos de gases invernadero, ¿han cambiado las cosas?

Éste es el gran problema de las sociedades basadas en el principio de la cooperación sin control: están a expensas de la explotación por parte de quienes anteponen sus intereses a los de la comunidad. Así pues, ¿era éste el sueño de Kropotkin? ¿Es necesaria una legislación draconiana para evitar el gorroneo?

¿QUIÉN DEBE DIRIGIR EL MUNDO?

No hay ámbito en el que la necesidad de responder al problema del malestar de la sociedad sea más urgente que el de las relaciones internacionales. Para Hobbes y para Locke, la comunidad de personas se convierte en una sola entidad, en un solo “cuerpo político”, en un Leviatán. Y el Leviatán era una bestia notoriamente beligerante. Las naciones son como hombres en el estado natural, puesto que por encima de ellas no existía un gobierno capaz de contener sus impulsos. ¿Coexistirían entonces, como afirmó Locke, en un estado de paz, buena voluntad, preservación y ayuda mutua, o en un estado de animadversión, maldad, violencia y destrucción recíprocas?

Para Hobbes la respuesta era evidente. Pese a sus intentos por aplicar una lógica rigurosa al análisis de las interacciones entre individuos, al abordar las relaciones entre Estados, Hobbes era presa de la desesperación:

En cualquier época, los reyes y las personas de autoridad soberana son víctimas, en virtud de su interdependencia, de celos continuos y adoptan el estado y la postura de los gladiadores, con los ojos fijos los unos en los otros y sus armas apuntándose; es

decir, sus fortalezas, guarniciones y cañones en las fronteras de sus reinos; y espían de continuo a sus vecinos; que tal es el estado de guerra.¹⁸

El fin del siglo XVII, el alba de la presunta edad de la razón, estuvo marcado por algunas de las más mezquinas, violentas, brutales y codiciosas decisiones que jamás hayan tomado los dirigentes de los estados europeos, de quienes, por lo demás, Hobbes había renunciado a albergar esperanza alguna de análisis racional. La pregunta, sin embargo, es: ¿ha cambiado en algo la descripción hobbesiana del estado del mundo trescientos años después?

Bajo este prisma cobra fuerza la defensa de un gobierno mundial —por la que a principios del siglo XX apostaron pensadores como H. G. Wells y Leo Szilard—. Aunque la mayor parte de las naciones escoja la paz de forma unilateral, ¿qué se puede hacer con los estados que no están dispuestos a ello en ausencia de un marco legal que los obligue a todos? Éste es, por supuesto, el propósito de las Naciones Unidas; pero como hemos comprobado muy recientemente, ni siquiera las democracias occidentales observan siempre los dictados de la ONU. La Declaración Universal de Derechos Humanos no se aplica; las naciones se desmarcan del Tribunal Penal Internacional siempre que les conviene. Así que no podemos fingir que existe un gobierno mundial equivalente a los gobiernos nacionales.

¿Puede un gobierno mundial establecerse por un medio distinto de la guerra? Y si así fuera, ¿lo querríamos? La idea de un Estado mundial se remonta al menos a Kant y a Rousseau; pero Kant lo rechazaba porque temía que, aunque consiguiera crear un “estado de paz universal”, pronto se convertiría en “el más horrible despotismo”.¹⁹ Rousseau apostaba por un gobierno federal que librase a Europa de sus continuas disputas, un eco lejano de la Unión Europea de hoy, capaz de imponer a todos los estados a que se unan y apuesten por sus intereses, una visión autoritaria con la que ni siquiera el más ferviente de los eurófobos modernos podría intimidarnos.

Robert Kagan y la Fundación Carnegie para la Paz Internacional de Washington DC sostienen que, ahora, Europa tiene su paz perpetua kantiana y en una forma muy benigna, pero que, sin embargo, esto sólo ha sido posible porque Estados Unidos ha permanecido en un mundo hob-

besiano en el que el poder está por encima de todo lo demás. Mientras Europa defiende un mundo que se adscribe a la legalidad internacional y al diálogo, sostiene Kagan, la realidad es que hoy en día sólo el ejército estadounidense mantiene el orden. El “paraíso posthistórico” de Europa es posible porque Estados Unidos continúa “anclados en la historia”.²⁰ El análisis de Kagan es simplista, trata a las naciones como si fueran brutos hobbesianos dispuestos a librar la guerra en busca únicamente de poder y sin tener en cuenta consideraciones económicas y comerciales, culturales e históricas. (Por ejemplo, algunos estados islámicos se oponen a Estados Unidos no porque quieran conquistarlos, sino porque disienten de su política en Oriente Próximo.) En cualquier caso, Kagan nos recuerda que los problemas de política internacional que se debatieron en la Ilustración siguen tan candentes que, en realidad, los términos del debate no han cambiado mucho.

¿Pueden las naciones cooperar sin autoridad central? ¿Por qué deberían hacerlo cuando las naciones poderosas obtienen un gran beneficio de explotar a las pequeñas? ¿Es mejor actuar como un *halcón* o como una *paloma*? O, cuando menos, ¿deberían las naciones esforzarse por *parecer* halcones acumulando poderosos efectivos militares y armas nucleares? ¿Cuál es la respuesta *justa* (Locke habría dicho “natural”) a la agresión? ¿Hay guerras justas? La teoría de juegos no sólo nos permite resolver estas cuestiones, sino que, despojándolas de todo lo accesorio, puede cuando menos ayudarnos a formularlas con mayor claridad.

GUERRA EN LAS TRINCHERAS

Podemos empezar a investigar estos temas entre los horrores de una guerra que pocos, si hay alguno, considerarían hoy en día justa, o siquiera cuerda. “1914 inaugura la edad de las masacres”, afirma el historiador Eric Hobsbawm. “Millones de hombres se enfrentaron desde los parapetos de sacos de arena de las trincheras en las que vivían como –y con– ratas y piojos”. En aquella ciénaga sangrienta, Francia perdió a uno de cada cinco hombres en edad militar y, de un total de treinta millones, medio millón de británicos fueron asesinados. El frente occidental, afirma Hobsbawm, “contribuyó a embrutecer de forma natural tanto la guerra como la política: si la primera podía llevarse a cabo sin tener en

cuenta ni el coste humano ni ningún otro, ¿por qué no hacer lo mismo con la segunda?”²¹ La guerra total de 1914-1918 fue, posiblemente, la condición previa necesaria para Hiroshima y el Holocausto, para la matanza de civiles con ayuda tecnológica y a inmensa escala. ¿Dónde, en todo esto, hay espacio para la cooperación y la tolerancia?

En realidad, la respuesta es ya motivo de leyenda. ¿Quién no ha oído hablar de las treguas de Navidad en el frente occidental, cuando los enemigos se felicitaban por la Pascua y jugaban partidos de fútbol entre lodo y alambradas? Y luego, según dice la leyenda, regresaban a la guerra. Pero en realidad muchos no lo hicieron. Al visitar las trincheras en mitad de los combates, un oficial británico se sintió escandalizado por lo que encontró. No el sufrimiento, la miseria, la locura, sino la actitud desenfadada con la que los hombres abordaban el asunto de ganar la guerra. Según confesó, el oficial se quedó

de piedra al observar que los soldados alemanes se paseaban a tiro de fusil detrás de sus propias líneas. Nuestros hombres no parecen darse cuenta. Me dije para mí que tenía que acabar con este tipo de cosas cuando tomase el mando; estas cosas no podían permitirse. Era evidente que esa gente no era consciente de que estábamos librando una guerra. Al parecer, ambos bandos creían en la política del “vive y deja vivir”.²²

Por supuesto, los soldados sabían muy bien que había una guerra en marcha. Y también sabían que, al menos en el frente occidental, no la podrían ganar. No actuaban como lo hacían por cobardía, ni por desidia o desesperación, ni siquiera por un deportivo respeto por el enemigo. Simplemente, estaban siendo racionales. Sabían lo que les convenía.

Esta aparente laxitud ante el hecho de matar al enemigo era, a primera vista, peligrosa y muy poco marcial. De cuando en cuando, los generales aliados ordenaban un ataque, impelían a las tropas a salir de las trincheras y a lanzar un asalto frontal contra las fuerzas alemanas. Si mientras tanto se habían entretenido charlando y fumando, y habían hecho caso omiso a su *deber* de eliminar al enemigo, los hombres tendrían que enfrentarse a más soldados alemanes en esas batallas y sufrirían más bajas. Lo que más les convenía, sin duda, era matar germanos siempre que podían.

Pero el tema es que los alemanes estaban en la misma situación. Así que la elección era sencilla. O unos y otros combatían constantemente, bombardeando las trincheras enemigas con fuego de artillería y colocando francotiradores que acabasen con todo el que fuera lo bastante estúpido para asomar la cabeza por el parapeto –y por su parte, el bando contrario aplicaba el mismo tratamiento–, o cesaba el fuego de acuerdo al pacto tácito de que el enemigo haría lo mismo, y unos y otros aguardaban a que les relevasen del frente antes del siguiente ataque. En el primer caso había que lidiar con el temor a morir en cualquier momento; en el segundo, llevabas una vida tranquila y la esperanza de volver a casa se mantenía viva.

Los ejércitos siempre han confiado en la propaganda para demonizar al enemigo e instilar en las tropas el odio al adversario, hasta que ya no es necesario reforzar la orden de matar. Sin duda, muchos soldados británicos acudían al frente aborreciendo a los *boches* y viceversa. Pero esta ilusión se hacía muy difícil de sostener cuando se percataban de que el enemigo les dejaría en paz siempre y cuando ellos dejaran en paz al enemigo –y más cuando empezaban a darse cuenta de hasta qué punto era inútil la lucha–. En efecto, algunas de las unidades que se enfrentaron en el frente occidental acordaron treguas formales. Naturalmente, para el alto mando esa conducta equivalía a traición y los inculpados acababan ante un consejo de guerra. Pero la política del vive y deja vivir que surgió en las trincheras no dependía de pactos explícitos. Surgió en secreto a raíz de la complicidad de los hombres que luchaban a uno y otro lado de las líneas, para furia y desesperación de los generales de ambos bandos.

No fue –o al menos no empezó así– un pacto humanitario para no matar. Muy al contrario, ese pacto se hacía respetar matando. Ambos bandos se dieron cuenta de que, si desobedecían el pacto tácito bombardeando al enemigo con la esperanza de lograr alguna ventaja estratégica, les pagaban con la misma moneda. “Si los británicos bombardeaban a los alemanes –señala G. Belton Cobb en *Stand to Arms [Con las armas preparadas]* (1916)–, los alemanes replicaban, y el daño era equitativo: si los alemanes bombardeaban un tramo avanzado de trincheras y mataban a cinco ingleses, una descarga de fusilería mataba a cinco alemanes”.²³ Dicho de otro modo, la lucha se liberaba de acuerdo a la ley del ojo por ojo. Esos intercambios de fuego eran una forma letal de comunicación; decían: “Haremos lo que nos hagáis”. Esto era, al mismo tiempo,

una amenaza y un ramo de olivo, porque también implicaba que la no agresión sería respondida en términos idénticos.

Es posible que esos acuerdos vive y deja vivir vinieran motivados por necesidades básicas. Los hombres tienen que comer y no pueden comer y luchar al mismo tiempo. Por tanto, las horas de las comidas daban pie a un alto el fuego natural. Y uno no bombardea los carros de suministro del enemigo (por mucho que, desde un punto de vista balístico, eso no plantee dificultades), si quiere evitar una respuesta recíproca. En *Adiós a todo eso*, Robert Graves relata de qué forma ambos bandos dejaban a veces de disparar para permitir que sus soldados retirasen a los muertos y heridos de la tierra de nadie.

¿Por qué no sucede eso en todas las guerras? Las condiciones que hacían que el frente occidental fuera tan terrible e inútil –tropas atrincheradas y estancadas, incapaces de avanzar– también dieron pie a la limitación de las hostilidades. Normalmente, las tropas enemigas se enfrentan como parte de ejércitos móviles o en ataques repentinos o entre grupos de guerrilla. Los combatientes no mantienen un combate prolongado entre sí. En estas circunstancias, tiene sentido acabar con el mayor número de amigos posible. Pero cuando se sabe que tras enfrentarse al mismo enemigo durante mucho tiempo, hay motivos para cooperar en lugar de para enfrascarse en un conflicto permanente: puedes esperar del enemigo el mismo tratamiento en el futuro. Por el mismo motivo, es poco probable que las empresas que mantienen relaciones regularmente se engañen o difieran los pagos porque saben que la otra empresa podría hacer lo mismo en el futuro. Cuando se trata de un solo contrato, una empresa con pocos escrúpulos puede estafar sin temor a represalias. Por lo demás lleva tiempo, en ausencia de contacto directo, formalizar los términos de la política del vive y deja vivir y desarrollar suficiente confianza para que el otro bando la suscriba. El estancamiento facilita ese periodo de negociación indirecta.

En la guerra de trincheras, los altos al fuego no autorizados por los generales corrían el riesgo de reprimendas o de que el alto mando obligase a una unidad a pasar a la ofensiva con una orden directa. Así pues, los soldados del frente empezaban a desarrollar artimañas para dar la impresión de que estaban luchando cuando en realidad no lo hacían. Ambos bandos reconocían esto como lo que en realidad era: una forma de mantener el alto el fuego mientras los oficiales seguían convencidos

de que conflicto continuaba. Estos *ataques de pega* no sólo eran un señuelo para engañar a los generales, sino una muestra de buena voluntad con el *enemigo*. Según Tony Ashworth, historiador que ha llevado a cabo un meticuloso estudio de la política del vive y deja vivir en la Primera Guerra Mundial,

En la guerra de trincheras, la agresión ritualizada era una ceremonia en la que los antagonistas participaban con descargas regulares y recíprocas de misiles, esto es, de bombas, balas, etcétera, que simbolizaban y reforzaban sentimientos de compañerismo y la sensación de que el enemigo era un igual en el sufrimiento.²⁴

Este elemento ritual del combate está en realidad muy extendido en la guerra y en otros conflictos. Entre los animales puede adoptar la forma de disputas por el liderazgo donde los adversarios se enzarzan en peleas donde su vida no corre peligro. Los ciervos pueden chocar sus cornamentas y enfrascarse en una lucha que rara vez acaba siendo mortal aunque ambos ejemplares estén equipados con armas letales. Pero estos rituales están pensados para que de ellos salga un vencedor. En las trincheras, estaban ideados para evitar el absurdo baño de sangre que los generales consideraban tan necesario.

La estrategia del vive y deja vivir de las trincheras engendró no sólo tolerancia y contención por medio de la buena voluntad mutua entre soldados cuyo objetivo era matarse entre sí. Pero si ocurrió, fue como consecuencia y no por causa de la conducta cooperativa. Que un soldado disparase al aire no tenía por qué deberse a ningún reparo moral por matar al enemigo, sino, simplemente, a que esta acción aumentaba sus posibilidades de sobrevivir. La cooperación surgió por interés. Podemos comprender el proceso de forma cualitativa, pero para hacer ciencia de ello, necesitamos una herramienta que, paradójicamente, fue desarrollada en un comité de asesoramiento del ejército estadounidense.

EL GRAN TORNEO

Va usted en un tren y cuando está por tomar asiento encuentra una cartera. Está llena de dinero. ¿Qué hace usted? A primera vista se trata de

un simple caso de elección binaria como los que estudiamos en el capítulo XIII. Usted puede bien devolver la cartera a su propietario, buscando, por ejemplo, una dirección en su interior o entregándosela al revisor, bien puede metérsela tranquilamente en el bolsillo.

Los modelos de comportamiento que hemos estudiado en los capítulos anteriores tienden a asumir que los agentes de un escenario multi-agente responden a las acciones de sus vecinos con lo que podríamos llamar “un hincar de rodillas” o, cuando menos, de una manera mecánica. Esto es lo mismo que decir que un estímulo A induce una respuesta B, bien invariablemente, bien dentro de una cierta probabilidad. Pero en una situación como esta las elecciones no se toman de una forma tan simple. Ciertamente, hay personas invariablemente honradas y personas invariablemente poco honradas. Pero el terreno que queda en medio no depende de la tirada aleatoria de un dado. Lo que se nos pasa por la cabeza, tal vez de modo involuntario, es la idea “¿quién se va a enterar?”. Y luego, quizá, “si yo perdiera mi cartera, ¿cómo me sentiría?”. En tales casos, sopesamos nuestras opciones de acuerdo a cierto código moral, pero ese código puede tambalearse en presencia de la *tentación*.

Es posible que la tentación sea el problema fundamental de las sociedades humanas. Algunas veces no sale a cuenta ser bueno, amable, considerado, sino rebelarse, engañar, pelearse, jugar malas pasadas. Si mis vecinos son dóciles y cumplidores de la ley, ¿qué me impide apropiarme de sus tierras o de sus bienes o de su ganado? Un individuo hobbesiano en un mundo hobbesiano es tan miserable como cualquier otro. Pero un hobbesiano en el Edén puede amotinarse, amasar una fortuna y acaparar sin temor a represalias (a no ser que crea en Dios). La tentación es parte de la condición humana, ése es el problema de todas las utopías: no todo el mundo es bueno, porque a veces delinquir sale a cuenta.

Diseñar una *partícula* susceptible de *caer en la tentación* no es un proceso obvio. Pero en los años cincuenta, Merrill Flood y Melvin Dresher, de RAND Corporation de California, hicieron más o menos eso. Desarrollaron un modelo matemático simple que incorporaba el elemento de la tentación en la interacción entre dos agentes. El modelo fue presentado como una especie de juego. Flood y Dresher estaban explorando la teoría de juegos del físico matemático John von Neumann en la década de 1920. Von Neumann, uno de los matemáticos más formidables del siglo XX, contribuyó a fundar la base teórica de la informática y, durante la

Segunda Guerra Mundial, realizó contribuciones fundamentales al Proyecto Manhattan. Se granjeó una reputación como *playboy*, que su pasión por el juego del póquer contribuyó a subrayar. Pero a Von Neumann no sólo le gustaba jugar esos juegos, además, quería comprenderlos.

Por su complejidad, poco hay mejor que un matemático pueda hacer que estudiar el juego del ajedrez. En cierto sentido, sin embargo, el póquer plantea un reto mucho mayor, porque incorpora el elemento psicológico del farol. La cuestión no es, como en el ajedrez, cuál es la mejor jugada, sino qué jugada impacientará, confundirá o desconcertará al adversario. Al estudiar los elementos de riesgo incertidumbre de juegos como el póquer, Von Neumann se dio cuenta de que guardaban cierta relación con la economía y en 1944 recogió sus ideas en un libro que escribió con el economista Oskar Morgenstein, titulado *Theory of Games and Economic Behavior* [La teoría de juegos y el comportamiento de la economía].

En el juego que diseñaron Flood y Dresher había una apuesta. Se lo conoce como "El dilema del prisionero" e introdujo la teoría de juegos en la sociología, la biología y la ciencia política. Juegan dos agentes a quienes en la metáfora aclaratoria se les describe como prisioneros sospechosos de haber cometido un crimen. A ambos se les ofrece la posibilidad de testificar contra el otro, lo cual, a cambio de la propia libertad supondría la condena del contrario. Si ninguno de los dos accede a testificar, ambos serán condenados, pero a una sentencia muy leve a causa de la escasez de pruebas. Si los dos testifican contra el otro, las sentencias serán superiores, pero no tanto como la que recibirá quien resulte condenado si sólo uno de ellos testifica, puesto que las pruebas son equívocas.

Por supuesto, la tentación está en testificar contra el otro prisionero. Pero si lo hacen los dos prisioneros, la sentencia para ambos será mayor que si ninguno de ellos testifica. ¿Deberían negarse ambos prisioneros a testificar con la esperanza de que el otro haga lo mismo? Si los dos actuaran *racionalmente*, ambos deberían testificar contra el otro. Esta opción supone mejor resultado para cada prisionero sin importar lo que haga el otro. Si el prisionero 1 testifica y el prisionero 2 no lo hace, no hay condena para el 1 —que es lo mejor que puede pasarle—. Si el prisionero 2 testifica, testificar sigue siendo la mejor opción para el prisionero 1: obtendrá una sentencia más leve si lo hace que si no lo hace. Así pues, el dilema no parece un dilema, porque siempre es mejor testificar. El problema es que, si bien esto es igualmente cierto para ambos prisioneros, los impulsa

a testificar y, por lo tanto, a salir peor parados que si ambos hubieran cooperado y no hubieran testificado.

La esencia del juego del dilema del prisionero puede expresarse en términos de elección bien para *cooperar* bien para *abandonar al otro a su suerte*. El mejor resultado para los dos agentes es abandonar al otro (testificar) y que el otro coopere (es decir, se niegue a testificar; en este caso se trata de cooperar con el otro prisionero, no con la autoridad). En tal caso, el otro jugador es el tonto, o el iluso que sale peor parado. Pero si ambos agentes juegan racionalmente, no consiguen ni el mejor resultado ni lo que más se le parece, que es el pago a su cooperación mutua. En vez de ello, obtienen la magra recompensa de su mutua defección, que es sólo un poco mejor que lo que consigue el iluso cuando el otro *deserta* —o le traiciona.

Para reestructurar este dilema en términos de individuos que viven en una sociedad, podemos considerar que la cooperación es una opción respetuosa de la ley y que violar la ley se produce en propio beneficio y a expensas de los demás. El dilema básico, que la cooperación es buena pero la defección puede ser todavía mejor, lo reconocieron Rousseau y Spinoza. En su *Discurso sobre el origen y los fundamentos de la desigualdad de los hombres*, Rousseau imaginó que cinco hombres prehistóricos accedían a colaborar para cazar a un ciervo acordando que cada uno de ellos se quedaría con una quinta parte de la pieza. Cuando al alcance de uno de ellos aparece una liebre, éste la atrapa, pero, sin su ayuda, el ciervo se les escapa a los demás. El *desertor* obtiene con la liebre una recompensa inmediata en lugar de compartir las dificultades y los peligros de la caza de un ciervo, y sus compañeros se quedan con las manos vacías.

A primera vista, el dilema del prisionero parece confirmar el pesimismo de Hobbes: guiados por la lógica, los individuos egoístas siempre optarán por la explotación. ¿Qué lección extrajeron del dilema del prisionero los Señores de la Guerra Fría para quienes trabajaba la RAND Corporation? Sé el primero en golpear, porque tu enemigo intentará hacer lo mismo. Aumenta tu arsenal nuclear con todos los recursos que puedas, porque tu enemigo está planeando dejarte en la estacada; y lo mejor para ti es hacer lo mismo. En realidad, lo que hay que hacer es considerar la posibilidad de desertar primero —de dar el primer golpe—. Si el otro bando *coopera* hasta el punto de no lanzar su ataque de inmediato, déjale como un iluso y atácale. Tú ganas, ellos pierden. No parece que esto sea una buena base para entender cómo hay que construir un mundo en el que

las personas y las naciones vivan en armonía, pero, por fortuna, las lecciones del dilema del prisionero no acaban aquí.

Lo más frustrante de este juego es que los jugadores –los prisioneros– no pueden comunicarse. Es evidente que lo que más les interesa es cooperar y no dejarse mutuamente en la estacada, pero puesto que no pueden coincidir en esto, lo mejor que pueden hacer es dar por supuesto que el otro jugador optará por lo peor, lo cual implica que han de inclinarse por la defección. Si se juega a este juego más de una vez, sin embargo, las posibilidades de cooperar aumentan. Porque aunque los jugadores no puedan comunicarse directamente, sí pueden, por su forma de jugar, dar idea de sus intenciones. Si un jugador revela su voluntad de cooperar haciéndolo en una ronda, es posible que el otro decida corresponderle en la ronda siguiente. Los jugadores que, habiendo sido implacables en la defección, empiezan luego a cooperar, se percatan de que así pueden obtener mejores resultados.* No tienen por qué experimentar ninguna sensación de culpa u obligación moral para pasar de la defección a la cooperación. Basta el mero interés para dar con la mejor opción.

Esto significa que el estancamiento que provoca la defección de ambos jugadores en una misma ronda del dilema del prisionero puede quebrarse simplemente repitiendo el juego. Y es así como nos encontramos con situaciones de la vida real comparables. Si engaño a mi vecino, éste tendrá muchas oportunidades de tomar represalias. La mayoría de las empresas trabajan regularmente con los mismos clientes. Si dos países comparten frontera, no pueden evitar las interacciones políticas, económicas y sociales. Así que en el juego repetido, o *iterado*, del dilema del prisionero, los jugadores tienen oportunidad de aprender de sus errores y de desarrollar una relación de amistad mutua. La cooperación puede llegar y evolucionar.

¿Es así como las personas reales juegan a ese juego? Los psicólogos han estudiado el asunto ampliamente mediante pruebas controladas y se han percatado de que la cooperación aumenta, pero hasta grados muy

* Cuando se suceden las rondas se lleva la cuenta de los resultados. Un jugador consigue la mayor puntuación cuando deserta y otro coopera; una puntuación moderada cuando la cooperación es mutua; poca puntuación cuando la defección es mutua; y la puntuación más baja cuando coopera y el otro le abandona (“el iluso pierde”). Se puede pensar que los jugadores acumulan puntos o dinero en lugar de años de condena.

diversos, dependiendo del carácter de los jugadores, de la naturaleza de las recompensas y de las circunstancias de la interacción. Es fácil comprender que, por ejemplo, de forma anónima es más fácil abandonar al otro a su suerte que cara a cara. Y no olvidemos el papel de la tentación. Si pensamos que nos encontramos frente a un jugador que hará cuanto pueda por cooperar, es posible que tengamos la tentación de desertar, lo cual incrementará enormemente nuestra puntuación a expensas de nuestro oponente. Si éste tiene tendencia a perdonar, podremos salirnos con la nuestra siempre y cuando no probemos con la defección demasiado a menudo. Desgraciadamente, en un mundo cooperativo, la defección rinde dividendos. Esto nos lleva a preguntarnos por el mejor modo de jugar al dilema del prisionero iterado. Si no sabemos nada de nuestro oponente, ¿qué estrategia hay que adoptar?

A finales de los años setenta, Robert Axelrod ideó un experimento para responder a esta pregunta. Pidió a los teóricos de la teoría de juegos que le remitieran estrategias para jugar al dilema del prisionero iterado para a continuación poner a prueba todas las estrategias en un torneo circular jugado por ordenador. Cada una de las estrategias se jugaba individualmente contra todas las demás durante varias rondas; ganaba la estrategia con la que se obtenía más puntuación. Las catorce entradas provenían de psicólogos, matemáticos, economistas, sociólogos y políticos. Cada estrategia consistía en un conjunto de normas para determinar qué opción había que tomar, si cooperación o defección. Uno podía, por ejemplo, optar por cooperar siempre (lo cual, obviamente, es una mala opción, porque siempre se sale mal parado a no ser que todos los demás también estén dispuestos a cooperar incondicionalmente, así que nadie escogió esta estrategia). También se podía cooperar durante tres rondas y desertar en la cuarta. Muchas de las estrategias que los jugadores remitieron eran mucho más complicadas, pero el torneo lo ganó la más sencilla. La envió Anatol Rapaport. La llamó “Ojo Por Ojo” y sólo consistía en una regla: empezaba cooperando y de ahí en adelante hacía lo que su adversario hubiera hecho en la ronda previa.

Cuando juega frente a alguien que opta por la cooperación de forma incondicional, Ojo Por Ojo (OPO) coopera siempre, y a ambos jugadores les va igualmente bien. Frente a alguien que siempre deserta, OPO sale como un iluso en la primera ronda (en la que coopera), pero luego opta por la defección continuamente, como si hubiera tomado la determina-

ción de que su adversario no saque provecho. A causa de la primera ronda, OPO sale levemente peor parada que su oponente, pero por poco. En todo caso, a ambas estrategias les va mucho peor que si cooperasen. Repitiendo lo que hace su adversario, OPO puede adaptarse a lo que la situación requiere. Frente a los cooperadores es amable; frente a los desertores es dura. Cuando hace frente a una mezcla de cooperación y de defección es cuando obtiene mejores resultados. Así que OPO recoge los beneficios de la cooperación allí donde le es posible, pero no se la puede explotar. Y tampoco explota: nunca logra una puntuación mayor que su adversario. A otras estrategias les va bien contra quienes tienen tendencia a cooperar, y otras saben resistirse frente a los desertores. Pero extrayendo lo mejor de ambas situaciones, OPO resultó vencedora frente a una mezcla muy diversa de estrategias. La suya fue una victoria de la modestia y la sencillez.

A la estela del éxito de su primer torneo por ordenador, Robert Axelrod decidió organizar otro que, básicamente, mantenía las reglas del primero. Había corrido la voz y esta vez hubo sesenta y dos participantes de seis países distintos. Algunos de ellos provenían de nuevo del campo de la ciencia profesional y del mundo académico, otros eran aficionados a la informática, entre ellos, un niño de diez años. Todos conocían los resultados del primer torneo y tuvieron oportunidad de reflexionar sobre los motivos del éxito de OPO. Cualquiera podía remitir una estrategia, pero sólo una persona optó por OPO: Anatol Rapaport. Todos los demás decidieron que podían superar a OPO con algo más sofisticado. No pudieron y OPO volvió a vencer.

¿Significa eso que OPO es la mejor forma de jugar al juego del dilema del prisionero iterado? No exactamente. En realidad, no hay mejor forma de jugar, porque depende de quién sea tu oponente. Es muy fácil ilustrar por qué esto es así. Si se juega contra una colonia de cooperadores incondicionales, lo mejor es ser un desertor inveterado. Esta estrategia obtendrá mejor resultados que OPO, que se comportaría como uno de los cooperadores (salvo cuando juega contra esta estrategia). Pero da la impresión de que la enseñanza que cabe extraer de los torneos de Axelrod es que, cuando no sabes a qué te enfrentas, lo mejor es optar por OPO.

Pero, ¿qué es lo que hace que OPO sea tan especial? Que es flexible: es capaz de cooperar pero no está dispuesta a que la exploten. La coo-

peración de otro jugador obtendrá la cooperación en la siguiente ronda. Pero la defección se topa irremediamente con la defección. La moraleja es clara: OPO hará lo que le hacen. Es una estrategia del Antiguo Testamento, no del Nuevo: ojo por ojo, nada de poner la otra mejilla. Esta claridad de respuesta es un factor que juega a favor de OPO. En el segundo torneo, un jugador optó por una estrategia diseñada para intentar averiguar qué reglas seguía su oponente con el fin de encontrar el modo de explotarlo.* Es algo que ocurre a menudo en la vida real: una persona prueba a la otra, sopesa cuánto puede sacar de ella. Si sabes más allá de toda duda que no puedes desertar sin que te traten del mismo modo, cuentas con un buen incentivo para cooperar. Si tienes motivos para dudar de que la represalia será implacable, es posible que tientes a la suerte. Por el contrario, OPO alienta la cooperación sin malicia y desanima la defección.

Pero OPO tiene otro aspecto revelador que contribuyó a su victoria: nunca es la primera en desertar. A grandes rasgos y de acuerdo a este criterio, todas las estrategias pueden dividirse en dos grandes campos: ¿serán las primeras en desertar o no? Las que no lo hacen reciben el nombre de estrategias "amables". (No hay consenso sobre cómo llamar a las otras, pero "desagradables" valdría.) Robert Axelrod descubrió que las estrategias amables salen invariablemente mejor paradas que las otras. En realidad, en el primer torneo la distinción fue clara: las ocho estrategias que mayor puntuación obtuvieron eran amables: las demás, separadas de las amables por una importante laguna de puntuación, eran desagradables.

EL SECRETO DE LA COOPERACIÓN

Así pues, el dilema del prisionero parece menos sombrío cuando lo repetimos: la amabilidad y la cooperación dan mucho mejor resultado que la maldad y la explotación. El egoísmo de cada individuo no tiene por qué suponer un obstáculo al juego limpio. Pero apostar por la cooperación no necesariamente garantiza el éxito, el OPO significa algo mucho

* OPO también tiene en cuenta lo que hace su oponente, pero sólo para copiarlo, no busca una comprensión más profunda de la estrategia del adversario.

más duro. Robert Axelrod ha identificado cuatro características de la estrategia de más éxito:

- No seas el primero en desertar (sé amable)
- Responde siempre con lo que te dan.
- No te pases de listo.
- No seas envidioso.

¿Qué es la envidia en este contexto? Significa no intentar obtener mejores resultados que los demás jugadores, sino, sencillamente, hacerlo lo mejor que se pueda. El dilema del prisionero no es lo que se llama un juego de suma cero: las ganancias de otro no tienen por qué llegar a costa de tus pérdidas. Si ambos cooperáis, a los dos os puede ir bien (aunque no tan bien como si existiera una opción de explotar a los demás jugadores). Axelrod confiesa que a los jugadores reales les cuesta renunciar a la competitividad y a la envidia. En sus pruebas del juego del dilema del prisionero iterado con estudiantes voluntarios, todos tienden a calificarse en relación con los demás, en cuyo caso, toda la ventaja que se pueda obtener puede incitar a los demás a la defección a fin de recuperar el equilibrio. Esto puede suscitar impulsos repentinos de defección con ánimo recriminatorio.

La conducta del vive y deja vivir que triunfó en las trincheras de la Primera Guerra Mundial puede verse como un ejemplo de cooperación surgido de la estrategia OPO. El comentario de Belton Cobb evidencia que ninguno de los dos bandos tenía reparo alguno en contestar al otro de forma letal cuando estallaban las hostilidades. Así pues, el alto el fuego mutuo no dependía de los buenos sentimientos de los bandos. (Y sin embargo, resulta significativo que la cooperación interesada permitiera que esos sentimientos fueran surgiendo de forma gradual.) Y en conjunto, ambos bandos siguieron una estrategia *amable*, renunciando a ser los primeros en abrir fuego.

En el caso de que aún nos preguntemos si los sentimientos humanos condujeron a esa cooperación recíproca más que las exigencias matemáticas de la teoría de juegos, hemos de recordar que también en la naturaleza hay estrategias OPO. Hay pruebas de que los murciélagos, algunos peces, los monos e incluso los virus se comportan de acuerdo a las reglas del OPO. Nadie puede atribuir a los virus una actitud altruista, su

comportamiento no es más que el resultado de la selección genética. Esto equivale a decir que los organismos con una predisposición genética a un comportamiento OPO cuentan con una ventaja evolutiva, de modo que la selección natural actúa en su beneficio asegurando la difusión de esa característica genética.

Esto supone que es posible que nosotros estemos genéticamente diseñados para cooperar, quizá con una conducta OPO. En realidad, sería sorprendente que no fuera así. Edward O. Wilson sostiene que, a medida que la civilización evoluciona, esas conductas pasan de ser impulsos instintivos a ser primero normas sociales, luego imperativos legales y, finalmente, principios morales.

La hipótesis de que la lección del dilema del prisionero es incorporada genéticamente viene respaldada por la inmediatez con la que saludamos sus aspectos optimistas. Nos consternaría comprobar que la teoría de juegos no diera como resultado favorable la conducta cooperativa; en realidad, tendríamos la tentación de tacharla de estupidez o falacia. Al parecer, estamos predispuestos a mirar con buenos ojos el altruismo y a fruncir el ceño ante las conductas egoístas. Que esto pueda ser una respuesta aprendida no invalida el hecho: la aprendemos porque entra dentro de las normas culturales de la sociedad, pero, ¿de dónde provienen estas normas?

Nos encontramos entonces con una posible solución a los puntos de vista divergentes de la naturaleza humana que esgrimían Hobbes y Locke, los cuales les llevaron a conclusiones muy distintas sobre los sistemas de gobierno. En ausencia de una autoridad más alta, las personas no necesariamente buscan explotarse mutuamente, tal y como suponía Hobbes. Ahora bien, tampoco desisten de ello por causa de alguna *razón* instigada por Dios. Esa *razón* puede provenir de la naturaleza: de la inexorable matemática de la interacción combinada con el efecto discernidor de la selección natural. En realidad, el dilema del prisionero está implícito en el análisis de Hobbes, puesto que el filósofo reconoce las miserias de la defección mutua y sostiene que para los hombres lo mejor es cooperar siempre y cuando esto se pueda llevar a cabo:

Que un hombre esté dispuesto, cuando otros también lo estén y lo crea necesario por el progreso, por la Paz y por defenderse, a ceder su derecho a todas las cosas; y a contentarse con tanta liber-

tad sobre los demás hombres como permitiría que los demás hombres tuvieran frente a él.²⁵

Esta relación entre el estado natural del Leviatán y el dilema del prisionero la señaló en 1969 el politólogo David Gauthier. Sin un contrato de cooperación, afirma Hobbes, un hombre “se expondría a ser presa de los demás”.²⁶ Pero un contrato de esa naturaleza está condenado a disolverse a no ser que haya alguna autoridad que lo aplique, porque, en virtud de sus apetitos, los hombres tenderán a la defección en el momento en que vean la ventaja de hacerlo. Por lo tanto, afirma Gauthier, el soberano omnipotente de Hobbes proporciona una salida al dilema del prisionero, al que los hombres hacen frente en el estado natural, puesto que en una monarquía la defección no conlleva ninguna recompensa potencial, sino únicamente un castigo. Incluso aunque, como se ha sostenido, sea un error esbozar las ideas de Hobbes en términos de teoría de juegos, cuando el filósofo no tenía ningún interés en deducir la psicología de las personas que se enfrentaban a esos dilemas conductuales, parece claro que Hobbes admitía el problema subyacente que surge cuando una acción antisocial ofrece una recompensa potencial.

Pero la teoría de juegos sugiere que la solución extrema de Hobbes –la cesión de todos los derechos y poderes del individuo salvo el de la preservación– puede no ser necesaria. Su error, si es que podemos llamarlo así, fue tratar a las personas como a animales ciegos incapaces de aprender de la experiencia, una *experiencia* que puede transmitirse de generación en generación en forma de predisposición genética a la cooperación.

Por igual motivo, podemos encontrar otras implicaciones de la teoría de juegos integradas ya en la experiencia humana. La tendencia a formar grupos tribales aumenta la probabilidad de que se repitan las interacciones con otros miembros del grupo y, por tanto, facilita el desarrollo de la cooperación. Robert Axelrod refrenda la idea de interacción prolongada –la llama “alargar la sombra del futuro”²⁷– como forma de promover y mejorar la conducta cooperativa. La otra cara de este principio es la desconfianza de los extraños, puesto que lleva tiempo consolidar esa confianza mutua de la que depende la cooperación. Pero esta aparente predisposición biológica a la xenofobia debería moderarse al darnos cuenta de que las estrategias *amables* funcionan mejor: incluso ya en el primer encuentro es preferible cooperar.

Así pues, facilitando la probabilidad de intercambios futuros, podemos guiar a dos partes hacia los beneficios de la confianza mutua. Esto podría suponer la consolidación de una relación más duradera: fue por lo prolongado de la contienda por lo que las tropas del frente occidental llegaron a la solución de los altos el fuego tácitos. O podríamos aumentar el ritmo de las interacciones: en las comunidades pequeñas, las mismas personas se ven día tras día e interaccionan social y económicamente, así que en ellas es mucho más fácil que surja la confianza que en las grandes ciudades, donde las interacciones son menos frecuentes y más impersonales. El aumento de la movilidad geográfica reduce la duración de las interacciones y, por tanto, reduce también los incentivos para la cooperación: las comunidades trashumantes rara vez están cohesionadas y mantienen relaciones *de buena vecindad*.

Evidentemente, toda empresa sabe que sirve mejor a sus intereses desarrollando buenas relaciones a largo plazo con sus clientes. Pero la forma en que tales relaciones se pueden quebrar es un motivo para sospechar que, en realidad, la reciprocidad surge del estilo de intercambio del juego del dilema del prisionero. Un estudio de 1963 indicaba que una de las razones más comunes para que las empresas litiguen es la queja de que el cese de actividad es erróneo. Sólo cuando la relación entre dos empresas está a punto de concluir –cuando las interacciones del “juego” están a punto de terminar–, uno o los dos jugadores deciden que merece la pena iniciar una batalla legal y arriesgarse a mayores problemas en lugar de buscar una solución *pacífica* de las diferencias. En los tests que hacen los psicólogos, las personas que juegan al juego del dilema del prisionero suelen sacrificar la cooperación establecida mutuamente por algunas rondas de defección cuando saben que el juego está a punto de terminar. De igual manera, las empresas que están a punto de quebrar son más susceptibles de dejar de pagar a sus clientes y de no pagar sus deudas.

La duración de las interacciones tiene consecuencias para los sistemas de gobierno. Karl Popper considera que el rasgo más importante de una verdadera democracia no es lo que hace, sino que “debería mantener abierta la posibilidad de echar al Gobierno sin derramamientos de sangre si el Gobierno no respeta sus derechos y deberes, pero también si consideramos que la política que lleva a cabo es mala o equivocada”.²⁸ Porque como dijo Pericles en la antigua Atenas: “Aunque sólo algunos

de nosotros seamos capaces de llevar a cabo una política o de ponerla en práctica, todos podemos juzgarla".²⁹ En una democracia, los gobiernos impopulares pueden salir derrotados en las elecciones, lo cual parece incontestablemente apropiado. Pero el fin de un gobierno conlleva algunos riesgos, porque un gobierno saliente no tiene nada que perder si actúa únicamente en su propio interés. El gobierno saliente de Bill Clinton dio pruebas de ello en el año 2000 con un despliegue de sobornos al que el presidente no se habría arriesgado a mitad de su gestión.

Hasta cierto punto, esta situación puede remediarse con la existencia de los partidos políticos, que son responsables a largo plazo del *cortoplacismo* de sus miembros. No hay duda de que, en 2000, el Partido Conservador británico todavía estaba pagando el precio de la profunda impopularidad de las políticas, arrogancia y corrupción de que hizo gala cuando estuvo en el gobierno, incluso aunque los perpetradores hubieran desaparecido de la arena política hacía ya tiempo (varios de ellos de forma ignominiosa). El Partido Republicano de Estados Unidos pagó a largo plazo el mismo precio por el caso Watergate en los años setenta. Por lo tanto, cabe esperar que un sistema político con una sólida estructura de partidos sea menos susceptible a la corrupción que otro con una organización política más efímera. Karl Popper tachó de "horrible" el sistema de partidos porque incita a los parlamentarios a servir a sus partidos antes que a sus votantes. "Creo –escribió– que deberíamos, si es posible, volver a la situación en la que los parlamentarios dijeran: soy su representante, no pertenezco a ningún partido".³⁰ Pero esto podría ser una receta para acabar con esa rendición de cuentas que los sistemas políticos necesitan si es que no quieren ser víctimas de un abuso generalizado del poder.

POR SU PROPIO BIEN

Sólo un psicólogo evolutivo algo tonto intentaría argumentar que el Ojo Por Ojo es lo que es por altruismo. Por una parte, el autosacrificio que somos capaces de demostrar por nuestros familiares tiene raíces biológicas que nada deben a la teoría de juegos –parece haber un aspecto de la idea del "gen egoísta" en el hecho de beneficiar a los individuos que comparten cierta similitud genética con nosotros.

Dos suizos, el economista conductual Ernst Fehr y su compañero Simon Gächter, han llevado a cabo experimentos –con personas– que sugieren que la cooperación puede surgir en grupos incluso cuando los individuos *no* se encuentran repetidamente. Fehr y Gächter dividieron a doscientos cuarenta estudiantes en grupos de cuatro y le dieron a cada uno de ellos la misma suma de dinero, invitándoles a invertirla (o no) en un proyecto colectivo. El proyecto rendía dividendos en proporción a la cantidad invertida. Si los cuatro miembros del grupo invertían todo su dinero, todos recibían una cantidad que excedía la suma invertida. Así que redundaba en interés para *el grupo* que todos lo invirtieran todo. Pero puesto que cada miembro del grupo recibía menos de una unidad monetaria por invertir cada unidad monetaria propia, lo mejor para el interés *individual* no era invertir sino gorronear, es decir, confiar en la contribución de los demás.

Es un juego análogo al dilema del prisionero porque ofrece a los jugadores beneficios por la cooperación mutua pero les tienta a la defección individual. Pero Fehr y Gächter mezclaban los grupos después de cada ronda de inversión y cobro de dividendos, sin darles oportunidad de ir desarrollando la confianza mutua. Se dieron cuenta de que, pese a todo, la cooperación podía surgir si las normas incluían algún castigo a los desertores (los que invertían poco). Sin la amenaza de un castigo, el nivel de cooperación era bajo; cuando se introdujo esta amenaza, la cooperación se incrementó marcadamente. Los investigadores llamaron a la penalización "castigo altruista", puesto que lo más probable es que no redundara en beneficio inmediato ni directo de quien lo imponía: aunque el castigo consiga reformar al desertor, es poco probable que quien lo impone vuelva a toparse con él. Y es altruista porque puede beneficiar a quienes, en las rondas posteriores del juego, formen equipo con el antiguo desertor.

Este tipo de conducta sugiere que la posibilidad de una represalia o castigo del estilo Ojo Por Ojo puede desempeñar un papel importante a la hora de aplicar mecanismos de cooperación en la sociedad, incluso cuando los encuentros no se repitan. Fehr y Gächter observaron que los jugadores parecían llevados por cierto sentido de la injusticia: simplemente, se enfadaban con los desertores y actuaban llevados por su enfado sin importar si redundaba en su beneficio o no. Además, los jugadores afirmaban que el castigo reprimía sus propias inclinaciones a desertar.



Sin embargo, merece la pena señalar que ésta es precisamente la clase de conducta que cabe esperar de jugadores con cierta predisposición a una estrategia OPO. Imponiendo el castigo después de jugar cada ronda, lo que en realidad hacían los investigadores era poner en marcha una especie de juego a dos rondas en el que los desertores de la primera sufren las consecuencias de su defección en la siguiente ronda. De los resultados podría extraerse la consecuencia de que todos estamos imbuidos de un deseo de justicia que, si es necesario, ejercitaremos a nuestra costa.

En todos estos juegos, la cooperación mutua sale más a cuenta a largo plazo. Si los cooperadores tienen más *éxito*, cabría esperar que la predisposición a la cooperación se convirtiera en un elemento irreductible de nuestros circuitos neuronales. Por desgracia, esto no significa que Kropotkin tuviera razón: los gobiernos no son necesarios porque se puede confiar en que las personas nos organicemos. La historia nos demuestra de lo que las personas somos capaces, y no se parece mucho al Edén. La naturaleza humana es diversa y, para bien o para mal, también es mudable. Y no sólo influyen en ella las interacciones de uno con otro, sino la sociedad multitudinaria de la que todos formamos parte. Para tener esto en cuenta, la teoría de juegos tiene que complicarse un poco más.

XVIII

LA VICTORIA DE PAVLOV
¿ES BUENO CORRESPONDER?

El hecho es que el hombre que todos los días y en todos los aspectos quiere ser virtuoso ha de toparse con muchos que no lo son.

NICOLÁS MAQUIAVELO (1513)¹

¿Puede uno esperar con tranquilidad y confianza el día en que los estados despóticos que en el pasado desencadenaron guerras se tornen, por mor de las fuerzas sociales y económicas de la historia, democracias amantes de la paz? ¿Se mueven las fuerzas de la evolución con la rapidez suficiente? ¿Se mueven en la dirección correcta?

KENNETH WALTZ (1954)²

En interés de la paz, me opongo al llamado movimiento pacifista.

KARL POPPER (1988)³

Si hoy Oriente Próximo es testigo de palabras hoscas y hechos violentos, ya lo fue antaño:

Debéis purgar el mal que habita entre vosotros. El resto de la gente oirá esto y temerá, y nunca más un mal así caerá sobre vosotros. No mostréis piedad: vida por vida, ojo por ojo, diente por diente, mano por mano, pie por pie.⁴

La inflexible reciprocidad del ojo por ojo pudo funcionar para los hijos de Moisés (aunque ni siquiera para ellos fue una respuesta válida a todos

los insultos). Pero, ¿puede ser el pilar de una sociedad civilizada? La teoría de juegos parece mejor equipada para investigar el Estado Natural que Hobbes temía por bárbaro y que Locke idealizaba por benéfico; nos deja el esperanzador mensaje de que de la barbarie puede nacer la bondad. Pero, al parecer, sólo a costa de una inflexible represión de todo tipo de agresiones. La razón de todo gobierno, afirma Locke, es suprimir la necesidad de todo hombre de ser juez y verdugo. Pero, ¿obliga éso a que un gobierno fuerce a sus ciudadanos y vecinos a cooperar con la misma política de inmediata y ciega retribución? ¿En qué lugar del cálculo social encontramos espacio para la negociación, la conciliación, la mediación e incluso el perdón?

Para comprender las consecuencias de la teoría de juegos a un nivel más que superficial, hemos de someter a la ley del ojo por ojo a un riguroso examen. Ése es mi objetivo en este capítulo. Habrá que acotar las ventajas de esta estrategia y sacar a la luz sus puntos flacos. La aplicaremos en una comunidad y extraeremos consecuencias. Nos preguntaremos, como siempre hemos de hacer en la física social, no sólo lo que los modelos nos dicen, sino qué consideramos deseable, y si ambas cosas se pueden conciliar. Y así retomaremos esa eterna pregunta: ¿qué opciones tenemos?

SIEMPRE HAY ALGÚN ACCIDENTE

Después del segundo torneo de Robert Axelrod, Ojo Por Ojo parecía invulnerable. Pero no lo es. En el mundo real tiene un fatídico punto débil: las comunicaciones son imperfectas. Se cometen errores; las intenciones se malinterpretan. En 1983, la Unión Soviética derribó un avión civil surcoreano que había violado el espacio aéreo soviético por error creyendo que se trataba de un avión militar. Los doscientos sesenta y nueve pasajeros que iban en el avión, entre los que había varios estadounidenses, murieron. Aplicada estrictamente, la política del ojo por ojo dictaba que ese error sólo podía vengarse con sangre rusa. Por fortuna no fue así, aunque el incidente acentuó las tensiones de la Guerra Fría. La OTAN bombardeó la embajada china en Belgrado durante el ataque a las tropas serbias de 1998; fue, a primera vista, otra *defección* producto de un error. (Todavía se debate si, en realidad, fue un ataque intencionado.)

La espeluznante potencia de los arsenales nucleares estadounidense y soviético durante la Guerra Fría destacó el grave riesgo de una política de represalias frente a cualquier error potencial. Llevada al extremo, esa política acaba en el escalofriante escenario tan gloriosamente satirizado por Stanley Kubrick en su película *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú* (1964), en la que un enloquecido general estadounidense lanza un ataque preventivo contra la Unión Soviética. Todos los B52 encargados del ataque dan la vuelta a tiempo. Todos menos uno que va equipado con cabezas nucleares. Esto provoca una guerra nuclear global aun a pesar de que los soviéticos saben que las bombas han caído *por error*, y es que han automatizado su sistema de misiles con la Máquina del Día del Juicio, que responde a cualquier ataque nuclear sin dar opción a la intervención humana. Creen que la certeza absoluta de la represalia forzará la cooperación, pero en el sistema no hay lugar al error.

En lo que a la ley del ojo por ojo respecta, el problema de los errores no es sólo que una sola y equivocada defección suscite la misma respuesta. La simplicidad del ojo por ojo supone que, si ocurre entre dos jugadores que siguen la misma estrategia, quedan bloqueados en un ciclo de recriminaciones mutuas. Uno deserta por error; en la ronda siguiente recurre a la cooperación (porque es lo que su oponente hizo en la ronda anterior), pero el otro le responde con la defección. A consecuencia de ello, el primer jugador deserta en la ronda posterior, y así sucesivamente: el error sigue recolando durante el resto de la partida, de forma que la cooperación recíproca no llega a recuperarse. (En el escenario que retrata la película de Kubrick, basta una ronda de defección por cada bando para que el juego termine de una vez para siempre.)

Este tipo de comportamiento se produce en muchas culturas y sociedades. Robert Axelrod señala el ejemplo de las rencillas familiares en Albania y Oriente Próximo, donde las represalias mutuas se pueden prolongar a lo largo de varias generaciones incluso cuando el incidente que las provocó se haya sumido en el olvido. Un agónico círculo vicioso de venganzas mutuas ha asolado a las comunidades católica y protestante de Irlanda del Norte durante décadas, y en la actualidad parece acabar con toda esperanza de una solución pacífica entre Palestina e Israel. Evidentemente, el ojo por ojo no es garantía de un mundo armonioso.

Ni entre el lío y la confusión de la realidad se encuentra siempre la mejor estrategia. Resultó evidente cuando Axelrod repitió su campeo-

nato, esta vez, permitiendo a los jugadores la posibilidad de cometer errores. De vez en cuando, los jugadores escogían su respuesta al azar en lugar de con arreglo a las normas de su estrategia. Para un índice de error (un nivel de *ruido*) del diez por ciento –una elección aleatoria de cada diez–, la OPO ya no es la estrategia ganadora. En realidad, en estas condiciones OPO obtiene peores resultados cuando juega frente a otras OPO que cuando lo hace contra un conjunto diverso de estrategias, puesto que los errores ocasionales dar lugar a infructuosos ciclos de represalias.

En estas circunstancias, hay que modificar la OPO si queremos conseguir una puntuación elevada. Una alternativa, llamada Ojo Por Ojo Generosa (OPOG), permite que una cierta proporción de defecciones quede sin castigo. Otra, llamada Ojo Por Ojo Arrepentida (OPOA), no responde con una represalia a una defección que sigue a una defección por su parte. OPOG vence a todas las demás estrategias en el segundo torneo de Axelrod cuando el *ruido* es del uno por ciento; OPOA queda en sexto lugar. Para niveles de ruido superiores, OPOA supera a OPOG. Ojo Por Dos Ojos (OPDO) es una estrategia que responde con represalias sólo después de dos defecciones consecutivas: espera a ver si es cierto que el jugador contrario tiene malas intenciones y no ha desertado sólo por error (esto es, si lo que ha ocurrido no es más que un ruido). OPDO es idea del biólogo evolutivo John Maynard Smith y quedó en el vigésimo cuarto puesto en el segundo torneo de Axelrod. Maynard Smith no la utilizó en el primer torneo de Axelrod; de haberlo hecho, habría vencido, porque en el primer conjunto de estrategias había algunas que igualaron los resultados de OPO enfrascándose en el círculo vicioso de represalias (con errores incluidos). Esto refuerza la idea de que no hay forma mejor de jugar a ese juego.

Hay otra estrategia que soporta bien el ruido, pero es menos benevolente. Pavlov es una estrategia basada en el puro oportunismo y fue bautizada en 1988 (aunque había sido inventada con anterioridad) por David Kraines, de la Universidad de Duke, y Vivian Kraines, de Meredith College, ambos de Carolina del Norte. Su filosofía puede resumirse del siguiente modo: “si gano sigo, si pierdo cambio”. Como OPO, para actuar se basa en lo ocurrido en la ronda anterior. Si ha obtenido un buen resultado, repite la misma jugada; si no le ha ido bien, cambia. Aquí, que le vaya “bien” significa o la recompensa por la cooperación mutua o el mayor premio de todos: el que se obtiene por defección unilateral. En resumen, Pavlov insiste en la conducta que le da resultados y cambia de

conducta cuando recibe un castigo. Esto recuerda las sencillas respuestas condicionadas de los perros del fisiólogo ruso Iván Petrovich Pavlov.

Con un cliente duro como Ojo Por Ojo, a Pavlov le gusta cooperar. No funciona bien con un desertor incorregible: intentará cooperar una ronda de cada dos. Pero Pavlov explotará sin piedad a un cooperador habitual en cuanto se dé cuenta de que puede salir bien parado con su conducta explotadora –allí donde OPO cooperaría noblemente–. Pavlov no obtiene buenos resultados frente a los participantes en el torneo original de Axelrod: en 1965, Anatol Rapaport dio a esta estrategia el descalificativo nombre de “simplona”. Tampoco funciona mucho mejor cuando hay ruido. Pero tiene la virtud de recuperarse rápidamente de un error aislado y si las circunstancias son propicias puede, como veremos, salirse con la suya

LOS ALGORITMOS DE DARWIN

Que la historia es una guía sólida para la política es un tópico, aunque Friedrich Hegel dudaba de que las naciones y los gobiernos siguieran guía alguna. Sin embargo, no hay duda de que las personas, las empresas, las instituciones e incluso los países cambian a veces su forma de comportarse a la luz de la experiencia –de igual modo que las tropas británicas y alemanas, cuya tarea en el frente occidental consistía en exterminarse, acabaron por acordar treguas tácitas que redundaban en la mutua supervivencia–. Algunos delincuentes se pueden reformar. Es esta capacidad de cambio la que confiere complejidad a las relaciones internacionales y las convierte en un tema del que vale la pena hablar. Algunos observadores opinan que el gobierno de Saddam Hussein podría no haber derivado hacia la defección incondicional, sino que podría haberse transformado en un régimen mucho más cooperativo si se hubiera apostado por el diálogo en lugar de aislarlo con sanciones para luego arrasarlo con bombas.

Una de las preguntas más interesantes y relevantes que podemos hacernos del dilema del prisionero es qué tipo de conducta surge cuando los jugadores evolucionan, cuando se les permite cambiar de estrategia. En realidad, las personas recurren a todo tipo de criterios morales, ideológicos, habituales y fantasiosos para decidir lo que tienen que hacer. Pero

de acuerdo al espíritu de la teoría de juegos, es útil empezar preguntándose qué harán los jugadores si se dejan guiar únicamente por el pragmatismo, esto es, si sólo buscan optimizar sus ganancias. Parece razonable presuponer que los jugadores tenderán a adoptar las estrategias que mejores resultados les deparen. Es algo que puede simularse en los torneos de Robert Axelrod introduciendo una dimensión evolutiva. Al final de una ronda, por ejemplo, se puede dejar que los jugadores adopten una nueva estrategia con una probabilidad proporcional a la puntuación global obtenida por esa estrategia. De este modo, las estrategias de más éxito se multiplicarán, mientras que las que obtengan resultados más pobres fenecerán. No resulta difícil darse cuenta de que se trata de un escenario darwiniano, es decir, sobrevive el más fuerte. Reproduce la forma en que las mutaciones genéticas se difunden por el conjunto de la población: los portadores de una mutación que conlleva una ventaja reproductiva tienen más descendencia, lo cual sirve para que esa mutación *adaptativa* prevalezca.

En 1992, Martin Nowak, de la Universidad de Oxford, y Karl Sigmund, de la Universidad de Viena, llevaron a cabo un experimento de ese cariz en el ámbito de la teoría de juegos con resultados muy satisfactorios. Crearon una población de estrategias diversas en las cuales la decisión de cooperar o desertar dependía de lo que el adversario hubiera hecho en la ronda previa. Algunas estrategias se inclinaban más por la defeción, otras por la cooperación. Nowak y Sigmund dejaban que compitieran entre sí y a continuación alteraban las proporciones de cada una de ellas en relación con sus éxitos relativos. Desde un punto de vista ingenuo es de esperar que el gran triunfador de este escenario sea Ojo Por Ojo, que, en general, parece obtener mejores resultados en una población heterogénea. Y, al principio, éste fue el resultado. En las primeras rondas, los desertores dominaban el juego, las estrategias cooperativas iban abandonando y la puntuación media del conjunto de la población se inclinaba hacia la pobre recompensa que se obtiene con la defeción mutua. Pero en algún punto, la pequeña banda de jugadores de OPO empezó a crecer rápidamente hasta que llegaron a dominar la población (véase figura 18.1). Este vuelco en los resultados vino acompañado por un aumento de la cooperación y de la recompensa media.

La brusquedad de este cambio recuerda a las transiciones de fase (aunque no equivalga a ellas). El auge de la OPO es un efecto colectivo

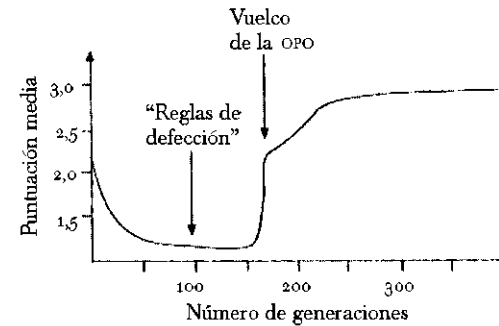


Figura 18.1. En una población heterogénea de estrategias del juego del dilema del prisionero sometidas a la ley de la selección natural del más fuerte (de la que mayor puntuación obtiene), la estrategia Ojo Por Ojo se impone en una población que, en un principio, estaba dominada por la defeción. Esto se ve acompañado de un brusco aumento de la puntuación media de los enfrentamientos entre agentes, puesto que OPO permite un mayor grado de cooperación.

que resulta de las interacciones mutuas entre los jugadores. La defeción mutua llega a resultar tan perjudicial para quien la pone en práctica que un pequeño grupo de jugadores de OPO saca mayor provecho de su cooperación mutua que los desertores de explotar los primeros intentos de los jugadores de OPO por cooperar. En este punto se vuelven las tornas y sale a cuenta cooperar con el aguerrido grupo de la OPO, cuya presencia contribuye a difundir la semilla de la cooperación por todo el conjunto de la población.* Pero Nowak y Sigmund observaron que la victoria de OPO es efímera. En cuanto ha consolidado una cultura de la cooperación, empieza a sufrir de su talón de Aquiles: su incapacidad de perdonar. En estas simulaciones hay una inevitable cantidad de ruido, lo cual significa que la OPO se ve superada por su vástago más tolerante, la Ojo Por Ojo Generosa. Y al final, sólo sobrevive la OPOG.

Nowak y Sigmund llegaron a la siguiente conclusión: "Ojo Por Ojo es el medio, más que el objetivo, de una evolución hacia la cooperación".⁵

* El papel crucial de las estrategias de tipo OPO en el cambio queda resaltado si el juego evolutivo se repite sin jugadores de OPO. Entonces los pronósticos son más sombríos: los cooperadores dejan de existir y nos quedamos con una colonia de desertores egoístas que siguen cavando su surco hobbesiano por toda la eternidad.

Dicho de otro modo, es necesario que la cooperación se consolide en una población heterogénea, pero una vez que se consigue, serán las estrategias cooperativas más *suaves* las que pasen a ocupar el centro de escenario. En realidad, puesto que incluso la OPOG acabará atrapada en un círculo vicioso de improductivas recriminaciones, en el que caerá a causa de los errores, lo mejor en un entorno cooperativo universal es optar por la cooperación incondicional: el perdón a toda costa. Es algo que suena muy bonito e inspirador, pero en realidad, en un entorno de cooperadores incondicionales no hay mejor estrategia que la defección incondicional: la explotación implacable de los mansos. Iguales entre iguales enfrentados, los cooperadores obtienen mejores resultados que los desertores, pero los cooperadores son muy vulnerables a los despiadados desertores. Una pequeña banda de desertores puede hacer estragos en una cultura cooperativa. La Ojo Por Ojo puede evitar que esto ocurra, porque trata a los desertores con severidad y, al mismo tiempo, recomienda la cooperación. Se la puede considerar la fuerza policial de la teoría de juegos: impone la cooperación con mano de hierro. Pone en marcha una estrategia policial ideal en algunos aspectos, porque (en ausencia de ruido) sólo –y siempre– castiga la defección y nunca explota la cooperación. Parece que hemos de suponer que, si aceptamos que cierto nivel de defección es inevitable, hemos de admitir que una sociedad necesita al menos algunos jugadores de OPO con el fin de mantener una cultura de cooperación general.

Es posible, sin embargo, que ni siquiera esto garantice una sociedad justa. En 1993, Martin Nowak y Carl Sigmund descubrieron que el implacable sentido de la justicia de la OPO no siempre se impone. En sus juegos evolutivos anteriores, los jugadores basaban su estrategia en los movimientos previos de sus oponentes. Pero Pavlov –la estrategia del si gano sigo, si pierdo cambio, la estrategia oportunista– hace algo más: también tiene en cuenta el último movimiento propio. Cuando los dos investigadores enfrentaron sus estrategias anteriores a Pavlov, comprobaron que el oportunismo de Pavlov triunfa. Pavlov no obtiene buenos resultados frente a los defectores y carece de la capacidad de la OPO para *invadir* una población de desertores y difundir la cooperación. Pero en una comunidad (levemente ruidosa) imbuida de un espíritu de cooperación, Pavlov prospera. Nowak y Sigmund se encontraron con que, en esas circunstancias, Pavlov sale victoriosa incluso ante OPOG.

A diferencia de OPO, las dos estrategias, Pavlov y OPOG, toleran bien los errores. Pero Pavlov tiene otra ventaja. Si dejamos que el modelo permita estrategias que muten aleatoriamente a nuevas formas, OPOG llega a compartir parte la fugacidad de OPO y se *suaviza* gracias a un cambio gradual hacia estrategias más incondicionalmente cooperativas. Sin embargo, Pavlov sigue conservando una cara áspera. Si por azar descubre que puede salir bien con la defección unilateral, continuará en sus trece. Es un lobo con piel de cordero: se porta bien mientras la cooperación sea la norma bajo la firme autoridad de OPO, pero mantiene la capacidad de explotar a una población cooperativa en cuanto los policías de la OPO se han transformado en cooperadores incondicionales. El lema de una sociedad pavloviana no es ya “haz lo que te harían”, sino “a un iluso, no le des ni un respiro”.

Las simulaciones en las que Pavlov salió como triunfadora revelan una historia fascinante. Como suponen la interacción de estrategias que basan su siguiente movimiento en los movimientos previos de *ambos* jugadores, su desarrollo es más complejo que las simulaciones anteriores. Y lo que es más sorprendente, en los cambios que se van produciendo con el paso del tiempo, el sentido de inevitabilidad es mucho menor (véase figura 18.2). Cada turno de la simulación produce una secuencia de acontecimientos distinta. En la breve historia que aquí referimos, hay un intento temprano de consolidar la cooperación: al cabo de un periodo turbulento, ésta fracasa y los desertores incondicionales reinan durante algún tiempo. Luego, al cabo de noventa y dos mil generaciones, los cooperadores se imponen.

Esta victoria es efímera y pronto vuelven las defecciones. Un examen detallado revela que se ha producido a raíz del paso de la OPO a la OPOG, y de aquí a estrategias más indulgentes, lo cual crea una nación de *blancos* que, finalmente, acaba destruida por perversos desertores. Pero esta vez los desertores no son tan incondicionales como antes: la estrategia dominante se llama Oscuro Gatillo y a la cooperación responde con la cooperación hasta que se topa con una defección (lo cual, en un juego con ruido, es inevitable). Por lo tanto, Oscuro Gatillo vence a sus oponentes indefectiblemente. Se parece a la Máquina del Día del Juicio de *Teléfono rojo*. Sin embargo, al cabo de doscientas veinte mil generaciones vuelve a surgir la cooperación, la cual, al cabo de algunos ajustes iniciales, se torna duradera. Una vez más, el cambio viene impulsado por OPO, pero,

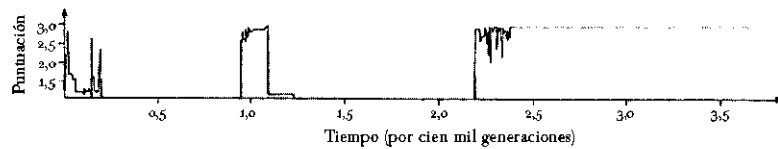


Figura 18.2. Los cambios en las proporciones de las estrategias con el paso de muchas generaciones de una simulación del dilema del prisionero los revelan los cambios en la puntuación media en el seno de la población (de estrategias): los promedios de puntuación más altos reflejan una proporción más alta de estrategias cooperativas. En estas simulaciones las estrategias evolucionan de acuerdo a la selección darwiniana y pueden tener en cuenta tanto el último movimiento propio como el del oponente. Hay varios periodos de predominio de la cooperación, los dos primeros se acaban, el tercero perdura.

poco a poco, deriva hacia un predominio de jugadores de OPOG, antes de que sean los agentes Pavlov, o de algunas de sus variantes, los que se impongan. Esta población es cooperativa pero potencialmente oportunista y demuestra una enorme solidez frente a la invasión de los desertores. No es un mal lugar para vivir, si bien sus ciudadanos más virtuosos no están totalmente a salvo de la amenaza de explotación por pavlovianos superficialmente *amables*.

En estas simulaciones interviene una mezcla de azar y certidumbre. La cooperación gana siempre si se espera el tiempo suficiente –siempre hay un final feliz (o casi feliz)–. Y Pavlov no siempre se erige como la estrategia dominante, aunque sí vence en cuatro casos de cada cinco. Lo más notable, sin embargo, son las súbitas revoluciones que jalonan el curso de los acontecimientos: vemos cómo se levantan y caen imperios *malos y buenos*, y alzamientos que se tambalean y fracasan. Incluso en periodos de aparente estabilidad (en lo bueno o en lo malo), el conjunto de las estrategias (y una detallada inspección de sus características) demuestra ciertas variaciones y un cambio de las normas.

Es difícil no ver en todo esto una alegoría de la historia humana. Marx creía que la revolución socialista era inevitable. La teoría de juegos parece decir que no hay nada seguro, porque incluso en el caso de que las cosas *vayan* a terminar de una manera en particular, no podemos estar seguros de en qué trecho de la senda de la evolución nos encontramos en este momento. ¿Creían los jugadores de la Segunda Revuelta de Coopera-

dores (generación noventa y dos mil) encontrarse en la Edad de la Cooperación Perpetua, vaticinada ya por los mártires filósofos de la fracasada Primera Revuelta? ¿Tenían razón los cronistas de la Tercera Revuelta de Cooperadores (generación doscientos veinte mil) al concluir que había llegado el fin de la historia?

ALFOMBRAS MÁGICAS

Los imperios se forjan y caen no sólo en el tiempo sino también en el espacio. Roma gobernó desde Portugal hasta el Mar Negro, desde las fronteras de Escocia hasta el Norte de África. El reino franco de Carlomagno se extendía hasta Alemania, Italia y los Balcanes. El imperio otomano poseía territorios desde Transilvania hasta Egipto. La historia del mundo es un tapiz de fronteras que crecen y se derrumban. Afortunadamente, el imperialismo parece cosa del pasado, pero las fronteras de la OTAN y de Europa siguen cambiando y los mapas de las naciones del centro y el este de Europa han cambiado más en los diez últimos años que en ninguna otra década desde la Segunda Guerra Mundial. ¿Puede el dilema del prisionero decirnos algo de la forma en que se mueven las fronteras nacionales e internacionales?

Introducir el elemento espacial en los torneos de la teoría de juegos no es un asunto baladí, pues pone límites a las posibilidades de interacción de cada jugador y, por lo tanto, tiene una gran influencia en los resultados. En un torneo donde todos juegan contra todos, los cooperadores tienen la oportunidad de sacar provecho de sus interacciones mutuas; si están en lados opuestos del mapa, ya no pueden aprovechar la fuerza del grupo y es posible que los desertores los superen. Así pues, el aislamiento puede actuar en contra de la cooperación. La situación geográfica de Israel, rodeada de estados predominantemente islámicos, contribuye sin duda a la percepción de sí misma como nación en armas y sus partidarios pueden argumentar que esa situación evita que el país pueda adoptar el tipo de políticas conciliatorias que Europa sí puede permitirse. Por otra parte, los jugadores situados en posiciones fijas pueden encontrar mayor incentivo en la cooperación que los jugadores itinerantes, puesto que están obligados a interactuar repetidamente con sus vecinos más que a moverse tras cada cambio. Una de las dificultades a las que se enfrentan

los viajeros es que tienen pocas oportunidades de consolidar relaciones de confianza con las personas con quienes se encuentran a lo largo de sus viajes –la “sombra del futuro” no es lo bastante larga.

Robert Axelrod empezó a investigar la idea de territorialidad en el dilema del prisionero en los años ochenta. Consideró un mundo semejante a un tablero de ajedrez en el que cada jugador ocupa una retícula e interactúa con los cuatro vecinos con quienes comparte borde. La colonización del tablero por estrategias victoriosas puede producirse por medio de un mecanismo *evolutivo*. En cada ronda del juego, todos los jugadores juegan contra sus cuatro vecinos. Si uno o más vecinos de un jugador en particular consiguen mejor puntuación, el jugador se convierte a la estrategia que le ha vencido.

Lo que a Axelrod más le interesaba es cómo se puede extender la cooperación en una sociedad de explotadores por medio de la OPO –o, a la inversa, cómo es posible que una sociedad cooperativa acabe minada por desertores–. Observó que, para ciertos valores de los resultados, un solo desertor puede difundir su funesta influencia en una comunidad de jugadores de OPO, sembrando la semilla a partir de la cual se expanden las estrategias de defección. Curiosamente, sin embargo, la creciente colonia de desertores* no es tanto una mancha que se extiende como un copo de nieve: emite ramas que se bifurcan y vuelven a unirse formando un complejo tapiz (véase figura 18.3).

Si consideramos todo el conjunto de estrategias que intervienen en un torneo como el de Axelrod, el número de configuraciones en *naciones* yuxtapuestas es inmenso. Pero Axelrod lo intentó de todas formas, distribuyendo las sesenta y tres estrategias aleatoriamente sobre una retícula de 14 x 18 de modo que a cada estrategia le correspondieran cuatro cuadros. A medida que el campeonato iba desarrollándose, todas las estrategias arteras (las que optan por la defección en primer lugar) fueron desapareciendo y el tablero terminó cubierto por un conjunto de estrategias amables. Puesto que siempre cooperan con sus vecinos, ninguna se impuso a otra, así que no hubo tendencia a nuevos cambios.

* En términos estrictos, la “expansión de los desertores” es en realidad la expansión del uso de estrategias de defección entre jugadores que permanecen inmóviles en los cuadros de la retícula. Pero a esto se le puede llamar: sustitución de jugadores cooperativos por jugadores desertores, o decir que los desertores matan a los cooperadores y colonizan sus espacios en la retícula. Los dos puntos de vista son equivalentes.

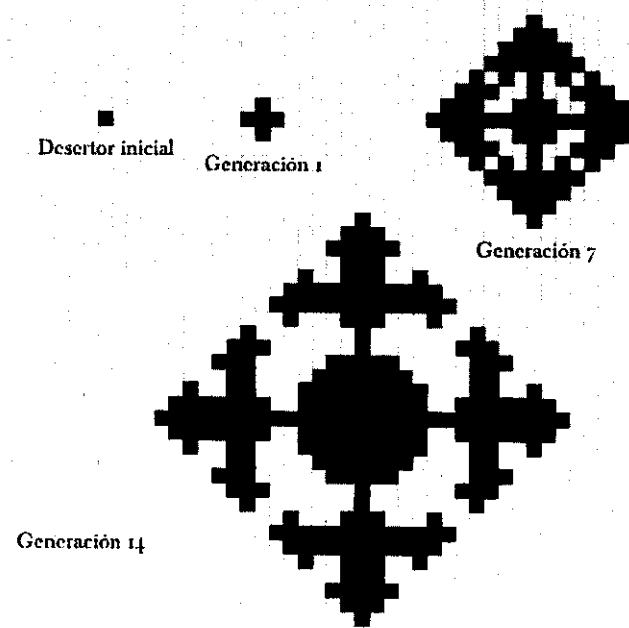


Figura 18.3. La forma cambiante de una colonia de desertores (cuadros negros) que crece en una población de jugadores de OPO (cuadros blancos).

Pero Ojo Por Ojo, que sí había dominado el torneo circular organizado entre el mismo conjunto de estrategias, no dominó el tablero. Cada configuración inicial de estrategias acababa en una configuración final diferente, pero en todas esas configuraciones había grandes territorios dominados por estrategias distintas a OPO, incluidas algunas que en el torneo circular habían obtenido resultados muy pobres (véase figura 18.4). Estrategias “de menor éxito” fueron capaces de sobrevivir, e incluso de prosperar, en el torneo espacial, porque tuvieron la fortuna de contar con vecinos contra los que podían medir sus fuerzas –ya no era necesario enfrentarse a todas las estrategias, sino sólo a las de los vecinos–. En realidad, la OPO no es una estrategia expansionista de por sí: no tiene tendencia a invadir territorios cooperativos, sólo aquellos en los que triunfa la defección.

Se podría interpretar esto diciendo que no hay una mejor forma *absoluta* de llevar los asuntos frente a otras naciones, con la salvedad de que,

6	6	6	1	44	44	44	44	44	6	6	7	7	6	7	6	6	6
6	1	31	1	1	44	44	44	44	3	6	3	6	6	6	6	6	6
6	6	31	31	1	1	1	1	1	1	3	3	3	52	52	6	6	6
6	1	31	31	31	31	31	31	31	31	31	3	3	6	6	6	6	6
6	9	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	3	6	6	6	6	6
6	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	6	6	6	6	6
6	31	31	6	6	9	31	31	6	9	41	31	31	6	6	31	31	6
6	31	31	6	6	9	9	9	6	41	41	31	4	31	31	31	31	6
6	31	31	9	9	9	9	9	6	41	41	41	41	31	31	31	31	31
6	31	6	9	9	9	6	6	6	41	41	41	17	31	31	31	31	31
6	6	9	7	9	9	6	6	6	41	41	41	41	31	31	31	31	7
6	6	7	7	7	6	6	6	9	41	41	7	7	7	7	7	7	6
6	6	7	7	7	6	6	6	6	41	6	7	7	7	7	7	7	6
6	6	7	7	6	6	44	6	6	6	6	7	7	7	7	6	6	6

Figura 18.4. Los territorios que dominan las distintas estrategias en el torneo del dilema del prisionero jugado sobre una retícula. Las cifras indican la posición de cada estrategia en el torneo circular original de Robert Axelrod. Todas esas estrategias son amables, nunca son las primeras en desertar.

por defecto, es bueno adoptar una estrategia de cooperación. Además, la distribución final de estrategias depende de en qué punto empiece el mapa: una vez más, la historia importa.

En 1992, Martin Nowak y Robert May, de la Universidad de Oxford, idearon un juego espacial más sencillo para investigar las consecuencias del espacio en la cooperación. En su versión del dilema del prisionero, no hubo indulgencia ni siquiera para estrategias tan sencillas como la OPO: todos los jugadores eran bien desertores incorregibles, bien cooperadores persistentes. Eso sí, otra vez, los jugadores podían cambiar de estrategia si les resultaba beneficioso. Distribuyeron a los jugadores sobre una retícula cuadrada y cada uno de ellos interactuaba con sus ocho vecinos –con los que compartía borde y con los que compartía esquina–. El comportamiento de cada jugador en una ronda copiaba al que más éxito había obtenido en la ronda anterior: cooperaban o desertaban dependiendo de la mejor opción a escala local. El juego era una especie de un modelo de interacción de partículas en retícula y con dos estados distintos, que recordaba al modelo de Ising de la física estadística (página 111).

Los resultados del juego dependen de las puntuaciones, que pueden inclinar las interacciones en favor de la cooperación o de la defección.

Si la recompensa por desertar frente a la cooperación es pequeña, la cooperación domina, pero este panorama tan benevolente está amenazado por cadenas de desertores que cambian poco de una ronda a otra (véase figura 18.5a). Sin embargo, si la defección es más lucrativa, se convierte en la forma más común de comportamiento. Sin embargo, constantemente aparecen y desaparecen islas de cooperadores (véase figura 18.5b). La fracción de cooperadores evoluciona entonces rápidamente hacia un nivel medio estable, sin tener en cuenta la configuración inicial –hay un tipo de tendencia “irreprochable” a cooperar incluso en un entorno relativamente egoísta–. Por lo tanto, la defección y la cooperación no tienen por qué aniquilarse inevitablemente, sino que pueden coexistir indefinidamente en configuraciones impredecibles en el detalle pero enteramente predecibles en términos de promedios.

La difusión de la defección y la expansión de la cooperación no son equivalentes. A los cooperadores les va mejor en grupos densos en los que pueden beneficiarse de su apoyo mutuo. Ya dijo Edmund Burke en 1770 que “cuando los hombres malos se unen, los buenos tienen que asociarse; en caso contrario, caerán uno por uno, en un sacrificio implacable dentro de una lucha despreciable”.⁶ Pero a los desertores que están en medio de los cooperadores les va mejor solos, puesto que obtienen más beneficios cuando interactúan con cooperadores que con otros desertores. Así pues, aunque la defección alimenta la defección, los explotadores tienden a repelerse, lo cual conduce a la formación de las delgadas cadenas de la defección. Nowak y May observaron que un solo desertor se extiende a través de una colonia cooperativa en configuraciones parecidas a copos de nieve, como había observado Axelrod (véase figura 18.5c). Una vez más, estas figuras de alfombras mágicas ramificadas pueden considerarse el resultado de la repulsión entre desertores, que les impide formar una colonia tupida. Podría decirse que cada desertor prefiere encontrar su propio territorio, tan aislado como sea posible de sus rivales.

¿GOBERNADOS POR LA RAZÓN?

La política de Ojo Por Ojo y sus variantes más generosas han definido la mayoría de las ideas sobre la evolución de la cooperación. Aun-

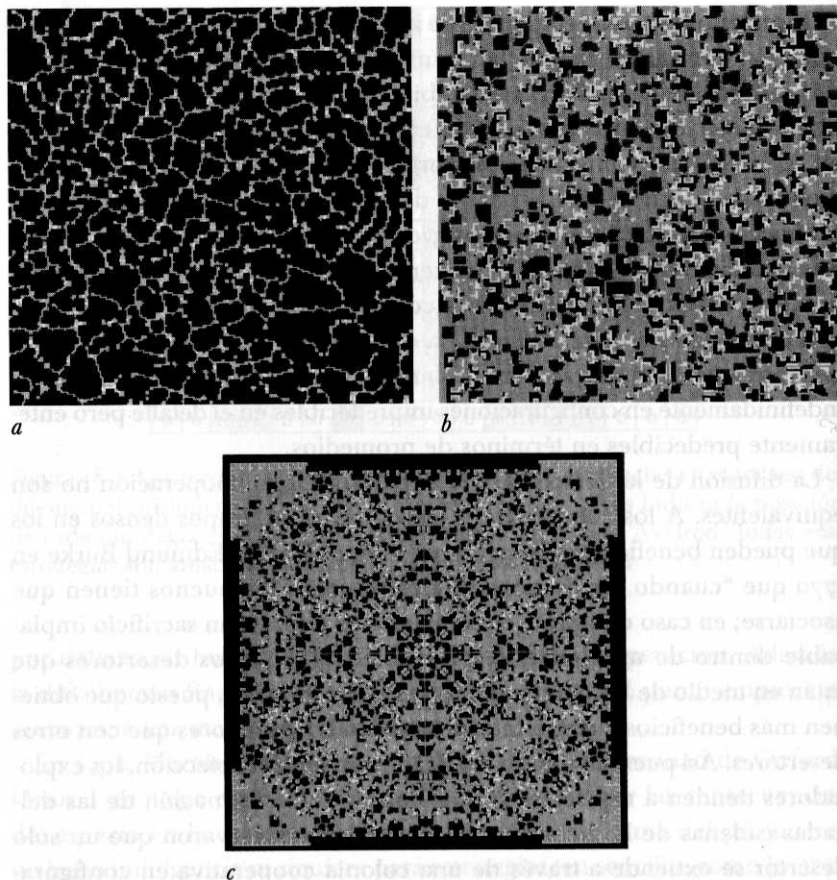


Figura 18.5. Los juegos espaciales entre cooperadores (cuadros negros) y desertores (cuadros grises) incondicionales dan muestra de un comportamiento complejo que depende de cuánto provecho pueda sacarse de desertar frente a un cooperador. Si la recompensa es pequeña, domina la cooperación (a). (Aquí, los cuadros blancos son sitios que, en la ronda previa, han pasado de cooperadores a desertores, esto es, los lugares en los que las fronteras están cambiando.) Cuando la recompensa es mayor, los desertores prevalecen, pero constantemente aparecen y desaparecen comunidades de cooperadores (b). Un solo desertor puede explotar una comunidad de cooperadores, sembrando la semilla de una comunidad de desertores. A causa de su mutua repulsión, los desertores no crecen como una masa sólida, sino como una pautas ramificada (c).

que la OPO puede ceder paso a estrategias más *amables* o a la oportunista Pavlov en cuanto la cooperación se consolida, en un mundo de explotación hobbesiano, no hay mejor forma de iniciar la cooperación que enfrentarse a OPO. Sobre esta base, algunos sostienen que las represalias firmes e inmediatas de la mala conducta son el único modo de que los “estados abusivos” tengan un comportamiento responsable: es la idea en la que, recientemente, se apoyaron los bombardeos de Belgrado y las invasiones de Afganistán e Irak. Karl Popper la enunció en términos sorprendentemente crudos para venir de alguien que tenía reputación de liberal: “Lo que está ocurriendo en Bosnia es la prueba del fracaso, la cobardía y la ceguera de Occidente. Demuestra que no queremos aprender lo que este siglo debería enseñarnos: que la guerra se evita con la guerra”.⁷ El concepto de “guerra preventiva” se remonta al menos hasta Kant, que la defendió en su ensayo “Paz perpetua” –aunque los reyes y príncipes del pasado no es que necesitaran precisamente ningún incentivo para tomar las armas–. Es sin duda alguna cierto que, en el dilema del prisionero, las estrategias que suavizan o retrasan la represalia, como la Ojo Por Dos Ojos, ofrecen peores resultados en poblaciones muy heterogéneas, lo cual parece ser un argumento a favor de los ataques aéreos en lugar de las sanciones.

Pero como hemos visto, la OPO también tiene desventajas. Es dolorosamente evidente en el conflicto entre Israel y Palestina y en los problemas que sufre Irlanda del Norte, que las represalias no abundan en el camino de la cooperación y la paz. Simplemente, sirven para socavar la consolidación de la confianza. Necesitamos, claramente, mecanismos que puedan revertir el ciclo de las represalias, si es que los jugadores de OPO han de reanudar las buenas relaciones después de haber roto filas por algún motivo. Las estrategias OPOG u OPOA ofrecen soluciones; otra es una Ojo Por Ojo Parcial, donde la represalia es algo menos severa que lo que la provoca.

Al parecer, la naturaleza humana tiende a complicar los intentos de cooperar vía intercambios de OPO. En realidad, sería una estupidez ignorar la fuerza de las pasiones o la longevidad de los rencores cuando algunas vidas se sumen en episodios de *defección*, mientras que la OPO no recuerda nada más allá de la ronda previa y *perdona* a la primera señal de cooperación. Y consideremos la propuesta de las Naciones Unidas de que la guarda y custodia en las parejas separadas con niños puede

dar derecho a negar las visitas si el ex cónyuge no mantiene el pago de la pensión alimenticia. Desde este punto de vista, la represalia es un incentivo para que quien debe pagar la pensión coopere, pero aparte del hecho de que, obviamente, la sanción también debería darse a la inversa (retirar los pagos si se niega el acceso al niño), sería corto de miras no tener en cuenta que de la ruptura de una pareja puede surgir un comportamiento irracional y disputas sobre el cuidado de los hijos que pueden negar a los *jugadores* la posibilidad de decidir desapasionadamente qué curso de acción es el más ventajoso para ellos a largo plazo. Más pertinente es la cuestión de si puede tener justificación que los hijos se conviertan en moneda de cambio en ese tipo de disputas.

La amenaza de una respuesta Ojo Por Ojo se ha esgrimido, tanto implícita como explícitamente, como base teórica de la política de disuasión nuclear. En este caso, el argumento es que, incluso aunque la espantosa posibilidad de una contienda nuclear no se materialice, la capacidad evidente y la disposición declarada de una nación a responder a un ataque así, es un elemento esencial de un statu quo pacífico. Una vez más, Popper apoyaba esta idea: “De momento, deberíamos aprender que hay que respaldar con armas la paz en la Tierra [...] Dentro de un mismo país, jamás se conseguiría la paz llegando a un pacto con los delincuentes”.⁸ Esto podría valer para la guerra en general; pero para la guerra nuclear –y en particular para el concepto de amenaza de destrucción mutua de la Guerra Fría–, el proceso iterativo que es esencial para que la OPO se imponga (en realidad, para que exista) no es una opción.

Hermann Kahn, un especialista en estrategia, describe con convincente claridad el tipo de pensamiento confuso e irracional con el que a menudo se topó en la RAND Corporation durante la Guerra Fría:

Un experimento *Gedanken* (mental) al que he recurrido muchas veces y con muchas variaciones durante los últimos veinticinco o treinta años comienza con el siguiente planteamiento: “Supongamos que el presidente de Estados Unidos acaba de ser informado de que una bomba de varios megatones acaba de caer en Nueva York. ¿Qué les parece que tiene que hacer?” Cuando preguntaba esto a mediados de los años cincuenta, solían responderme: “Apretar el botón de lanzar un ataque nuclear y marcharse a casa”. A

continuación mantenía un diálogo con los presentes que, más o menos, discurría del siguiente modo:

KAHN: ¿Qué ocurre después?

OYENTES: ¡Los soviéticos hacen lo mismo!

KAHN: ¿Y entonces qué pasa?

OYENTES: Nada. Ambos bandos son destruidos.

KAHN: Y entonces, ¿por qué el presidente hace una cosa así?

Seguía una reflexión general sobre el asunto y los presentes llegaban a la conclusión de que, tal vez, el presidente no debía lanzar un ataque masivo como represalia.⁹

De acuerdo a las palabras del politólogo Brian Skyrms: “Una estrategia que incluye una amenaza cuya puesta en práctica no redundaría en interés del agente y que éste tiene la opción de llevar a cabo, es una estrategia deficiente”.¹⁰

En cualquier caso, sería extraordinariamente ingenuo dar por supuesto que los jugadores del juego de la política internacional harán gala de la rigurosa racionalidad demostrada por los jugadores ideales de la teoría de juegos. Los partidarios de una “OPO segura” disuasoria, por ejemplo, deben lidiar con la posibilidad real (como Popper admitió) de que, en 1962, Krushchev sí estaba dispuesto a usar sus misiles de haber podido introducirlos en Cuba secretamente –con intención disuasoria o no–. Bajo este prisma, la OPO se limita a crear el clima y las condiciones para que esa crisis se lleve a cabo. Además, el espectáculo de los muchos partidarios a largo plazo del argumento disuasorio en apoyo de la proliferación de las armas nucleares estadounidenses, que ahora defienden un sistema de defensa con misiles que socava la base de este argumento –¿qué es la destrucción mutua asegurada si no es mutua?–, debería recordarnos que la lógica formal de la teoría de juegos no es más que un instrumento fungible frente a la ideología política y los intereses de todo tipo.

Otra de las consecuencias menos atractivas de Ojo Por Ojo es que, en efecto, obliga a la cooperación de los desertores sólo si éstos *saben* lo implacable que es. Esto supone que uno necesita adquirir la reputación de estar dispuesto a lanzarse a la ofensiva, lo cual puede manifestarse como hipersensibilidad –negarse a tolerar la más mínima amenaza o insulto– o como una propensión a adoptar la diplomacia de la intimi-

dación. En los años sesenta, Estados Unidos se dispuso a librar una amarga guerra en el otro lado del planeta sobre todo para mantener, en el periodo más álgido de la Guerra Fría, su reputación de país duro. Es algo que admitió John McNaughton, subsecretario de Asuntos de Seguridad Internacional, en un memorando enviado a Robert McNamara, secretario de Defensa, y en el que perfilaba los objetivos estadounidenses en Vietnam, que eran: “setenta por ciento: evitar una derrota humillante (a nuestra *reputación* de garante)” [la cursiva es mía], y sólo un “diez por ciento: permitir que los ciudadanos [de Vietnam del Sur] disfruten de un estilo de vida mejor y más libre”.¹¹

Dicho de otro modo, el éxito de Ojo Por Ojo podría considerarse un incentivo para actuar con beligerancia. Al fin y al cabo, las consecuencias de enfrentarse a un adversario que no valora nuestra implacabilidad son desastrosas, como expuso de una forma tan gloriosamente sardónica Stanley Kubrick en su sátira de la Guerra Fría cuando, mientras mantiene con su homólogo soviético una conversación telefónica, el doctor Strangelove estalla: “¡Estúpidos! Una Máquina del Día del Juicio no sirve de nada si no le dicen a nadie que la tienen!”.

Todo aquel que piense en la posibilidad de utilizar el dilema del prisionero como base para decidir la política a seguir tendría que tomarse como un deber enumerar primero todos los factores que rechaza. Lo más evidente, como ya he señalado, es que da por supuesto un punto de vista muy simplificador de la naturaleza humana: la presunción de que las personas actúan de un modo racional buscando su propio beneficio prescinde no sólo de la existencia de pasiones irracionales, de la falibilidad de nuestra capacidad de raciocinio y de la mera estupidez, sino de la influencia positiva de los códigos morales de conducta. Tanto la experiencia como la biología evolutiva nos indican que cabe esperar que muchas personas tengan un instinto innato para cooperar con sus congéneres y no tienen que aprender que cooperar sirve mejor a sus intereses antes de hacerlo. Por otro lado, es probable que algunas personas tengan una inclinación probablemente patológica a desertar en el seno de la sociedad, algunas veces incluso cuando se dan cuenta de que, a largo plazo, no les reporta ningún bien. Además, el juego del prisionero no da pie a la negociación: recordemos que a los *prisioneros* no se les permite actuar en connivencia, sino que deben deducir los motivos del otro sólo por su forma de jugar. En tales circunstancias cunde la sospe-

cha, que en la vida real normalmente acallamos gestionando nuestras transacciones con un ánimo más cooperativo.

En todo caso, no hay por qué negar las enseñanzas de la teoría de juegos en el sentido de que una estrategia de represalia permanente es el mejor modo de alcanzar la cooperación. Como Karl Sigmund, especialista en esta teoría, afirma:

Por supuesto, sería una estupidez querer reducir todas las interacciones humanas al dilema del prisionero iterado o negar el papel de la autoridad superior en las comunidades civilizadas. Pero con la cautela debida, merece la pena señalar que el principio, rotundamente simple, de responder con la misma moneda, conduce a la cooperación en una sociedad de egoístas, mientras que la actitud aparentemente más elevada de poner fin a las represalias socava tal cooperación [...]. Al parecer, la cruda ley de la represalia ha sido la piedra fundacional de muchas sociedades estables, posiblemente, de todas las sociedades estables.¹²

A riesgo de plantear una cuestión que a los psicólogos evolutivos se les puede antojar tautológica, es probable que, en tal caso, debamos preguntar: ¿es ésta una forma moral de conducta?

La idea del Ojo Por Ojo resulta incómoda a la mentalidad progresista. “Al abordar el proyecto –dijo Robert Axelrod en 1984–, creía que es mejor contener la ira. Los resultados del torneo por ordenador del dilema del prisionero demuestran que, en realidad, es mejor responder de inmediato a la provocación”.¹³ Sin embargo, los pensadores del pacifismo, desde san Francisco hasta Gandhi, han afirmado que responder a la violencia con violencia es sinónimo de derrota. Claramente, ése es el mensaje del Nuevo Testamento: ama a tu enemigo porque es el manso y no el vengativo quien heredará la tierra. Muchos pacifistas sostendrían que la no violencia es una opción basada no en la fría lógica sino en imperativos morales más elevados como “No matarás”. Cuando nos vemos frente a comportamientos que sólo pueden tacharse de explotadores, incluso de criminales, esto puede inducir a dudas agónicas que, si somos honrados, en realidad sólo ocultan la posibilidad de que el pacifismo sea una opción blanda. David Jones, objetor de conciencia en la Segunda Guerra Mundial, explicó el dilema:

El dolor de ser objetor de conciencia estaba en que, con el paso del tiempo, íbamos conociendo la enormidad de lo que los alemanes estaban haciendo. Así que eso era lo que verdaderamente nos daba que pensar, no la guerra, sino cómo podíamos justificar no intentar hacer nada al respecto.¹⁴

Para Cecil Davies, alma afín en el mismo conflicto, la cuestión era irresoluble:

Wilfred Owen dijo que era un objetor de conciencia con mala conciencia, y yo creo que, a menudo, muchos objetores de conciencia tienen mala conciencia, y si bien yo sigo pensando que tenía derecho a hacer lo que hice cuando lo hice, supongo que si hubiera sabido algo del Holocausto, todo habría sido distinto [...] La vida no es tan simple.¹⁵

En efecto, no lo es –y el juego del dilema del prisionero no nos puede inducir a pensar otra cosa–. Pero uno no puede evitar la conclusión de que, *dentro de sus propios términos*, la teoría del juego supone que una política de represalias frente a la defección podría en realidad ser más *moral*, puesto que sirve a un bien superior. Una estrategia Ojo Por Ojo no sólo protege de la explotación a quien la sigue, sino que contribuye a la salvaguarda de toda la comunidad. Porque sólo cuando la OPO pierde peso frente a estrategias cooperativas más blandas, la comunidad corre el riesgo de ser víctima de los desertores explotadores y de los oportunistas pavlovianos. La cooperación incondicional puede parecer más noble y amable, pero, además, deja la carga de la labor policial sobre los hombros del resto de la comunidad. Un utilitarista tendría que pensar mucho para encontrar alguna objeción a la OPO.

Todos estos parecen conocimientos que vale la pena tener, pero hay que tener cuidado, porque es fácil darles la vuelta o malinterpretarlos. Ingenuamente, se podría argumentar que la OPO justifica la pena de muerte por asesinato –aunque sea el Estado y no los individuos quienes la apliquen–, pero la conclusión del juego del dilema del prisionero nos enseña a cooperar a través de la experiencia y la adaptación: los desertores se convierten a las estrategias amables porque salen mejor parados. La pena capital simplemente suprime al jugador, de modo que no

se producen más interacciones. En el dilema del prisionero no hay nada que sugiera que un jugador aprende de los errores de *otro*, que la muerte de un desertor advierte a otros de los riesgos de desertar. Esto podría ocurrir, por supuesto, pero la teoría de juegos guarda silencio al respecto –así que el éxito de la OPO es irrelevante para el debate sobre la pena de muerte–. Sin duda, lo mismo puede decirse del crecimiento de los arsenales nucleares durante el periodo álgido de la Guerra Fría. La teoría de juegos y el dilema del prisionero gozaron de gran popularidad en el Pentágono, pero no se pueden extraer lecciones de la OPO cuando, por su propia naturaleza, el juego podía terminar en la primera ronda.

John Locke tuvo sabiduría suficiente para darse cuenta de que, si en su estado natural defendía la versión “diente por diente” de Ojo Por Ojo, esta estrategia no serviría en una sociedad civilizada y que, relegando las tareas policiales, judiciales y penales en el Estado, se alivia la carga del individuo y se reduce la necesidad de aplicarlas de una forma próxima a la barbarie. En general, en un estado anárquico no tendríamos la opción de protegernos de un ataque reprimiendo nuestro impulso de réplica, así que tendríamos que hacer daño a los asaltantes. Al deducir que el castigo es necesario para mantener la paz de la sociedad, el triunfo de la OPO no puede sorprender a casi nadie. No puede decirnos qué castigos hay que aplicar, ni puede revelarnos cómo convertir a un pecador en un santo.

Lo que sí hace el dilema del prisionero es ayudarnos a avanzar más allá del pesimismo de Hobbes sin recurrir a las presunciones teñidas de rosa de Locke. Si sabemos que la cooperación es posible incluso en un mundo que carece de altruismo, no hay motivos para desesperar. Cómo conseguirlo es otra cuestión acerca de la cual es mejor dejar que Popper tenga la última palabra: “Hemos de explorar con cautela el terreno que tenemos por delante, como hacen las cucarachas, y procurar llegar a la verdad con la mayor modestia”.¹⁶

XIX
¿HACIA UTOPIA?
EL CIELO, EL INFIERNO Y LA PLANIFICACIÓN SOCIAL

Todos los hombres de éxito coinciden en una cosa: creen en la causalidad. Creen que las cosas no suceden en virtud de la suerte, sino de la ley; que no había un eslabón débil o roto en la cadena que une la primera y la última de las cosas [...] Los hombres más valientes son los que más creen en la tensión de las leyes. "Todos los grandes capitanes -decía Bonaparte- han conseguido grandes logros adaptándose a las reglas de este arte, ajustando los esfuerzos a los obstáculos".

RALPH WALDO EMERSON (1860)¹

[P]uede suceder que los próximos avances de las ciencias sociales provengan no de los presuntos científicos de la sociedad, sino de personas formadas en otros campos.

GEORGE LUNDBERG (1939)²

Sabemos que, en realidad, viajar a la luna era una tarea sencilla comparada con otras que ya hemos llevado a cabo, como crear una sociedad humana o un mundo pacífico.

HERBERT SIMON (1996)³

-Vamos a dejar de imponer el Cielo a la gente -dijo-. Vamos a escuchar sus necesidades. Si lo quieren, pueden conseguirlo; si no, no. Y entonces, por supuesto, tendrán el tipo de Cielo que quieren. -Y, en general, ¿qué tipo de Cielo quieren?

–Bueno, quieren una continuación de la vida, eso es lo que hemos averiguado. Pero... mejor, no hace falta decirlo.

–¿Sexo, golf, ir de compras, salir a cenar, conocer a los famosos y no sentirse mal? –le pregunté, un poco a la defensiva.

–Varía. Pero si quisiera ser sincero, te diría que no varía mucho.

JULIAN BARNES (1989)⁴

Las utopías llegan de muchas formas, tantas, quizá, como la mente humana es capaz de idear. Algunas han sido socialistas e igualitarias, otras jerárquicas y dictatoriales. En unas, por ejemplo, no se cometen delitos; en otras, todos los canallas son exterminados. Algunas son gobernadas por mujeres, en otras no tienen hombres, o, a la inversa, no tienen mujeres. El sexo desempeña un papel notablemente importante en muchas de ellas. Prácticamente todas desafían al doctor Pangloss de Voltaire porque se desvían marcadamente del mundo en que vivimos, lo cual tal vez resulte sorprendente cuando recordamos que una de las acepciones del término “utopía” es “cualquier lugar menos éste”.

En realidad, muy pocas visiones utópicas se han concretado, y las que lo han hecho han fracasado brusca y, con frecuencia, miserablemente. La guerra civil que inspiró la escritura de *Leviatán* también vio el nacimiento de los *diggers*, un grupo de comunistas radicales encabezado por Gerrard Winstanley, quien, en 1649, cultivaba un páramo para escapar de la pobreza endémica de la Inglaterra rural. Su colonia fue perseguida por los terratenientes y por el ejército de Cromwell y al cabo de un año acabó. El noble experimento que, a principios del siglo XIX, fue la comuna radical del socialista Robert Owen en la localidad escocesa de New Lanark gozó de cierto éxito, pero no pudo sobrevivir a su carismático fundador frente al despiadado industrialismo victoriano. (Las sociedades cooperativas formadas para difundir las ideas de Owen han demostrado más solidez.) El mayor experimento del socialismo, que empezó con la Revolución de Octubre de 1917, tiene hoy en día bastante poco de lo que estar orgulloso. Marx y Engels condenaron las utopías en tanto que fantasías estúpidas porque ignoraban la inevitabilidad

histórica de la desaparición del capitalismo y la ascensión del socialismo. Pero el punto de vista marxista no tiene, en retrospectiva, menos de expresión de un mundo arbitrario que sus creadores consideraban deseable. Y en la década de 1930, entre socialistas europeos como el biólogo Julian Huxley ganaba favor la eugenesia, hasta que se convirtió en parte de la terrible sociedad que perfilaba *Mein Kampf*.

Ése es el problema con las utopías: uno nunca puede estar seguro de cómo van a resultar. La naturaleza humana es un elemento impredecible que acaba con los planes más concienzudos; lo cual, sin duda, es el motivo de que, como ha dicho el crítico John Carey: “el objetivo de todas las utopías sea, en mayor o menor medida, eliminar a las personas reales”.⁵ Muchas de las utopías están habitadas por ciudadanos corteses y pasivamente felices entre quienes la disensión y el descontento han sido salvajemente reprimidos o desterrados o, de alguna forma, se los ha hecho desaparecer. Es revelador que las mismas características aparezcan en algunas distopías, como la de *Un mundo feliz* de Aldous Huxley, donde una pasividad bovina se mantiene a base de ingeniería biológica, sexo gratuito, medicamentos y un ocio que consiste en actividades tontas. Se podría argumentar que es en este sentido en el que la teoría microeconómica tradicional tiene también una visión utópica, porque sustituye a las personas por autómatas omniscientes y totalmente racionales para que el mercado pueda lograr un equilibrio ficticio.

El aspecto más sorprendente de las utopías a lo largo de la historia es que, desde nuestra perspectiva presente, muy pocas de ellas nos resultan atractivas. La *República* de Platón es una aristocracia clasista y belicosa en la que la censura es la norma, el arte se desprecia y los niños son apartados de los padres nada más nacer. La *Utopía* original de Tomás Moro pudo ser muy sugerente para el ciudadano del siglo XVI con su ausencia de pobreza y su igualdad de derechos, pero se erige a costa de una regimentación y una conformidad estrictas. El mundo de *Noticias de ninguna parte* –es decir, noticias desde Utopía–, de William Morris, parece agradable, pero es una fantasía romántica e ingenua cuyo artífice apenas ha intentado ocultar los hilos con los que la ha urdido. El Estados Unidos del año 2000 que aparece idealizado en *Looking Backward [Mirando hacia atrás]* (1888), de Edward Bellamy, es plausible hasta el escalofrío: una tierra uniformemente nacionalista y dominada por la Religión de la Solidaridad, dirigida como un enorme sindicato en el que se obliga a

todos los ciudadanos a enrolarse en un “ejército industrial” militarista. Los disidentes están sentenciados al confinamiento en solitario con una dieta a pan y agua. A Bellamy, evidentemente, la idea le parecía estúpida.

Y así sucede con todas las utopías, lo cual pone de relieve la vieja verdad de que la utopía de un hombre es la distopía de otro –porque en la naturaleza humana hay demasiada variedad para que todo se corresponda con un único molde–. “Lo que siempre ha convertido al Estado en un infierno en la tierra –afirmó el poeta Friedrich Hölderling– ha sido que el hombre haya intentado convertirlo en su paraíso”.⁶ Por lo tanto, la idea de que podremos elaborar una “utopía científica” está condenada al absurdo. Ciertamente, una “física de la sociedad” no puede ofrecer nada parecido. No se construye un mundo ideal a partir de una planificación científica del tráfico, del análisis de mercados, de la criminología, del diseño de redes, de la teoría de juegos y del tapiz de las demás ideas que hemos desarrollado en este libro. Casi no hay duda de que las ideas y modelos de la física encontrarán acomodo en otras áreas de las ciencias sociales, pero no van a darnos una teoría exhaustiva de la sociedad, ni van a sustituir a la sociología, a la economía o a las ciencias políticas tradicionales. La cuestión es decidir dónde un modelo cuantitativo y mecanicista resulta apropiado para describir la conducta humana y dónde no va a producir otra cosa que una grotesca caricatura. Es una capacidad que está todavía por desarrollarse y es muy probable que, a lo largo del camino, se cometan algunos errores embarazosos.

Pero aplicada en su justa medida y con sentido común, la ciencia física puede proporcionarnos herramientas muy valiosas en áreas como la planificación cívica, social y económica, y la legislación y la política internacionales. Puede ayudarnos a evitar malas decisiones; si tenemos suerte nos dará perspectiva, y perspicacia. Si hay leyes subyacentes a la mecánica del tráfico de rodados o peatones, a la topología de las redes, al crecimiento urbano, es preciso que las conozcamos con el fin de trazar mejores planes. En cuanto admitimos la diversidad del mundo físico, no debería sorprendernos que el mundo de los asuntos sociales no sea necesariamente una tabla rasa abierta a todas las opciones.

El hecho de que la sociedad sea compleja no la hace totalmente incomprendible. Como hemos visto, la complejidad en la forma y la organiza-

ción pueden surgir de principios subyacentes sencillos que siguen simultáneamente un gran número de individuos. Es algo que ya reconoció en el siglo XIX John Stuart Mill:

La complejidad no surge del número de las leyes, que no es especialmente elevado, sino del extraordinario número y variedad de datos o elementos –o de agentes que, obedeciendo ese pequeño número de leyes, cooperan en pos del mismo resultado.⁷

Por otro lado, la complejidad no es el resultado inevitable de una multitud de interacciones. Quizás sea ésa una de las razones para estar precavidos ante la posibilidad de que la complejidad se convierta en la palabra de moda para un nuevo tiempo de ciencia. La verdadera sorpresa que surge de la física de la sociedad es que, a veces, los modelos de comportamiento social pueden ser muy simples; tanto, que se limitan a observar ciertas *leyes matemáticas*. Los promedios constantes y las recurrentes leyes de error de los pioneros de la estadística social no suscitan hoy el temor de que el libre albedrío no exista, pero los últimos descubrimientos de la física social han añadido nuevos, más profundos y menos intuitivos motivos a los universales de la actividad humana: las transiciones de fase, las leyes de potencia, los modelos autoorganizados, los desplazamientos colectivos, las redes sin escala.

De igual modo, no deberíamos olvidar que hay poco verdaderamente nuevo en un punto de vista que reconoce que la sociedad y la cultura son características que surgen del intercambio de muchos individuos, guiados únicamente por intereses sencillos y locales. El sociólogo alemán Georg Simmel resumió la filosofía de la actual física de la sociedad en 1908: “Sociedad no es más que el nombre de un número de individuos unidos por la interacción”.⁸ Robert E. Park, un sociólogo estadounidense, pulió esta idea en 1927 señalando la forma en que los individuos actúan juntos: “Las instituciones y las estructuras sociales de todo tipo pueden considerarse productos de la acción colectiva”.⁹ En cierto sentido, todo cuanto ahora hacemos es ampliar esta idea, subrayar que la colectividad subyace detrás no sólo de las instituciones estáticas, sino también de los rasgos dinámicos y cambiantes de la sociedad: los atascos, las fluctuaciones económicas, la evolución de los rasgos y las normas culturales.

BIEN DEL MAL

Uno de los temas más potentes surgidos de la física de la sociedad es que, con frecuencia, la conducta individual no predice sus consecuencias sociales. La sociedad no es una persona a mayor escala: el Leviatán es más que la suma de sus partes. El mal que se deriva inintencionadamente de gestos benevolentes, los finales felices surgidos de la mala intención, ambas cosas son dos temas universales de la literatura y el arte. *La riqueza de las naciones* podría servir de prototipo. Actuando por puro interés, dijo Adam Smith, los comerciantes contribuyen a proporcionarnos bienes a todos a un precio asequible y sin dejar lagunas en el mercado:

No es a causa de la benevolencia del carnicero, del cervecero o del panadero que esperamos la cena, sino porque actúan en su propio beneficio. Nosotros apelamos no a su humanidad, sino al amor que tienen por sí mismos, y nunca les hablamos de nuestras necesidades, sino de sus ventajas.¹⁰

Por su parte, afirma Adam Smith, los gobiernos que pretenden regular el comercio en interés de la sociedad como un todo sólo consiguen perjudicar la eficacia del mercado.

La mano invisible y benéfica de Adam Smith fue anticipada ya por Montesquieu con uno de sus comentarios: las acciones que se emprenden por un motivo en particular pueden, para bien o para mal, tener consecuencias muy distintas. A su vez, Montesquieu estuvo influido por un poema satírico, *Fábula de las abejas, o a vicios privados, beneficios públicos*, escrito por el físico holandés Bernard Mandeville (1670-1733) y publicado por primera vez en 1705, en forma de panfleto y con el título *El enjambre rezongante*. Era un texto lleno de malicia, pero, como la mayoría de las sátiras, con un objetivo serio. Mandeville sugiere que *vicios* como la vanidad pueden redundar en beneficio de la sociedad, en este caso, incrementando la demanda de artículos de lujo y, por tanto, dando empleo a quienes los fabrican:

Para gozar de las Comodidades del Mundo,
Obtener fama en la Guerra, pero Vivir Tranquilamente,
Sin grandes Vicios, es vana Utopía

Apoyarse en la Cabeza.
Por la Virtud, las naciones
No viven con Esplendor¹¹

En otras palabras, la sociedad *necesita* positivamente algún vicio para mantener lubricados sus engranajes. Cuando el vicio es suprimido por una ética de la autonegación en el enjambre descrito por Mandeville, la sociedad de las abejas decae, erosionada por la desidia y la pobreza. Mandeville no estaba defendiendo el egoísmo hobbesiano, sino que despreciaba la hipocresía que presentaba la virtud como algo distinto a un engaño necesario para que sistema funcionase. No nos engañemos, insistía. Naturalmente, fue tan vilipendiado como Hobbes y a su poema lo acusaron de alterar el orden público. Sin embargo, él fue ampliando su obra paulatinamente y lo que empezó como un divertimento se convirtió en un sesudo tratado de dos volúmenes que suscitó una discusión seria sobre la filosofía moral que transmitía. No hay mejor ejemplo del principio de Mandeville en acción que la evolución del egoísmo al altruismo en la teoría de juegos. La psicología evolutiva de línea dura afirmarí que no hay virtud que, en algún nivel, no esté motivada por el interés, pero es algo que está lejos de demostrar.

La física de la sociedad está llena de acciones que tienen consecuencias distintas a las esperadas. La prisa por escapar de una habitación atestada aminora el ritmo de evacuación. En un pasillo donde la gente avanza en ambas direcciones, el incremento de la aleatoriedad en el movimiento de los individuos (el aumento de *ruido* o *calor*) puede motivar, de forma antiintuitiva, un bloqueo (*congelación*) que hace más difícil que a contracorriente se formen hileras. Las normas de circulación en los carriles de las autopistas que tratan de segregar a los vehículos rápidos de los lentos pueden terminar reduciendo la velocidad del tráfico. Hay pocas metas más sencillas que las decisiones gubernamentales, regulatorias o de planificación que han conseguido el efecto contrario al que se pretendía. En muchos de esos casos, esos resultados no deseados pueden achacarse a un error para apreciar la naturaleza interactiva e interconectada del sistema de que se trate. El aumento de la congestión del tráfico que puede seguir a la construcción de nuevas carreteras es el ejemplo clásico. La física estadística puede contribuir a liberar a los políticos y a los especialistas en planificación del tráfico de su propensión al pensamiento

lineal y a fomentar una mayor sofisticación en su percepción de las causas y los efectos.

¿ES BUENO QUE CONTEMOS CON UNA SOCIOLOGÍA CIENTÍFICA?

Cuando William Petty aplicó razonamientos estrictamente matemáticos a los fenómenos sociales, particularmente a la hora de hacer recomendaciones sobre impuestos y el gobierno de Irlanda, a algunos de sus coetáneos su enfoque les pareció ridículamente ingenuo. Y en realidad lo era. La insistencia de Petty en desarrollar una política basada en la racionalidad y en los datos cuantitativos más que en las intuiciones y los prejuicios fue pionera; cuando las cosas no se hacen así, con frecuencia, hemos de temer lo peor. Pero Petty tendía a rechazar cualquier consideración de lo que la gente podía o debía tolerar, o la necesidad de adoptar la política y la legislación a la situación y costumbres existentes.

Su afirmación de que las personas que trabajaban podrían pagar más impuestos si dejaban de cenar los viernes (ahorrándose el precio de esa cena) era, por supuesto, perfectamente cierta. Pero sólo alguien totalmente ajeno a las circunstancias y psicología de sus compañeros podría aventurarse a hacer en serio una propuesta como ésa. En 1729, Jonathan Swift satirizó este seco y desapegado estilo de filosofía *científica* proponiendo que los pobres de Irlanda podrían llegar a fin de mes y al mismo tiempo contribuir al bien público vendiendo a algunos de sus hijos como alimento, porque “un niño pequeño sano y bien criado es, con un año de edad, un alimento delicioso, nutritivo y saludable tanto *en estofado, a la brasa, al horno o a la cazuela*; y, de ello no tengo la menor duda, también serviría para un *fricassée* o un *ragoût*”.¹²

Introduciendo la física mecánica en la ciencia social, ¿nos arriesgamos a convertirnos en personas como Petty? Si las personas son reducidas a bolas de billar que interactúan por medio de fuerzas matemáticas definidas, ¿dónde queda espacio para la compasión, la caridad, para los mil y un detalles de nuestra vida cotidiana que no pueden reducirse a cifras y que hacen que vivir valga la pena? Esta fría idealización, epítome del hombre hobbesiano, era, en opinión de Lewis Mumford, una consecuencia desastrosa de la visión de la sociedad propia de la Ilustración:

El nuevo orden establecido con las ciencias físicas se limitaba demasiado a describir o a interpretar hechos sociales [...] Los hombres y las mujeres reales, las empresas y las ciudades reales eran tratadas, en lo que respectaba a la ley y al gobierno, como si fueran organismos imaginarios, mientras que a presuntuosas ficciones como el Derecho Divino, el Gobierno Absoluto, el Estado, la Soberanía, se las trataba como si fueran entes reales. Liberado de esa sensación de dependencia de la corporación y del barrio, el “individuo emancipado” era disociado y deslocalizado: un átomo de poder, a la busca implacable de algún poder que ejercer.¹³

Y, en efecto, la responsabilidad de este cambio ha de recaer en última instancia en Thomas Hobbes. Tanto si estaban de acuerdo con él como si no, la mayoría de los filósofos morales heredaron hasta cierto punto el enfoque racional de Hobbes. Las consecuencias son más evidentes en la más matemática y explícitamente *científica* de las ciencias sociales: la economía.

Aunque Hobbes dijo muy poco del funcionamiento de los mercados económicos, su suposición de que los hombres toman sus decisiones basándose en una valoración racional de su oportunidad de beneficio —es decir, de que las personas actuamos por egoísmo— subyace a todo el pensamiento económico convencional. El implacable mundo de Hobbes es el hábitat natural del maximizador de la razón, del llamado *Homo economicus*. Se podría sostener que las personas *en efecto* actuamos así, lo cual nada tiene que ver con Hobbes. Pero es también acertado preguntarse si el clima económico y político que impera en nuestra época no cultiva y alienta activamente e incluso impele a ese tipo de conducta —si bien los presupuestos básicos de la economía ni son autónomos ni se definen por sí mismos.

Al fin y al cabo, no siempre fue así. En la Edad Media, la idea de “precio justo” dominó el pensamiento económico. El precio de los artículos quedaba fijado donde convenía a comprador y vendedor: el que permitía al primero cubrir sus necesidades sin excesos y permitía al segundo ganarse la vida. El precio justo lo fijaban los gremios, los consejos locales y otros órganos reguladores; la economía era extraordinariamente intervencionista. Era, sin duda, un sistema plagado de ineficiencias y abusos, pero basado en la idea de bienestar social. Los

comerciantes aceptaban, al menos hasta cierto punto, que tenían obligaciones sociales amén de motivos para el beneficio. Hobbes, sin embargo, escribió en una época en la que la expansión del comercio internacional había situado a la economía más allá del control de los Gobiernos y de los Estados. En los mercados internacionales que florecían en las ciudades europeas, nadie regulaba los precios: los comerciantes podían vender al precio que los compradores quisieran aceptar. Era un terreno abonado para el interés egoísta, que acabó floreciendo. Lo que hacía falta, y Adam Smith se encargó de aportarla, era una filosofía que lo justificara.

No obstante, de la idea de que los precios fijaban su propio nivel mediante el equilibrio de la oferta y la demanda se ocupó en primer lugar el francés Richard Cantillon en su *Essai sur la nature du commerce en général* [*Ensayo sobre la naturaleza del comercio en general*] (1730-1734), con el cual *La riqueza de las naciones*, de Adam Smith, está en deuda. La apelación a la “mano oculta” de los comerciantes era evidente: querían verse libres para hacer lo que les placiera, sin los obstáculos de las limitaciones y los límites de precios. Pero los atractivos de esa libertad eran menos evidentes para el propio Adam Smith. No le interesaba ser un apologista de los empresarios codiciosos, no quería formular una teoría económica, sino una filosofía moral y social. Aceptaba sólo a regañadientes la idea de que los hombres estaban motivados únicamente por el interés y deploraba el hecho de que, en consecuencia, en los países civilizados, el esfuerzo y el tiempo de los pobres se sacrificaran en aras del lujo y las comodidades de los ricos.

Pero lo aceptó. ¿Por qué? Porque, al simplificar la teoría económica y hacerla accesible a la cuantificación, el *Homo economicus* permite un análisis científico del mercado. Y eso formaba parte del programa de la Ilustración: llevar la ciencia a los asuntos del hombre.* Este deseo de simplificación por mor del análisis es, como hemos visto, el motivo de que el *Homo economicus* haya sobrevivido tanto tiempo. Hoy en día, muchos economistas siguen teniendo una objeción *smithiana* a toda regulación del mercado y se aferran con determinación a la idea de que toda intervención es necesariamente dañina para el mercado y, por lo tanto —puesto que el crecimiento económico ha sido entronizado como barómetro de la salud de

una nación—, perjudicial para la sociedad en su conjunto. Sin embargo, no existe una sola teoría económica que demuestre que un mercado totalmente libre fija el precio más beneficioso de los artículos o conduce a su distribución óptima.

En realidad, en algunos sentidos sucede más bien al contrario. La demostración de que los nuevos modelos “interactivos” del comercio y la economía acentúan las desigualdades (página 410) es perfectamente acorde con lo que Montesquieu señaló en el siglo XVIII: que el mayor egoísmo se encuentra en las sociedades comerciales *civilizadas*. Por el contrario, las culturas nómadas conservan un fuerte sentido de obligación social y hacen de la hospitalidad un deber casi sagrado. En otras palabras, las desigualdades son, hasta cierto punto, la seña de identidad de las relaciones comerciales. Este punto de vista es un eco de la opinión de Rousseau que da por supuesto que el egoísmo y la descortesía de las personas, lejos de prevalecer en el estado natural de Hobbes, son en parte producto de la sociedad cívica. Esto también es, sin duda alguna, una simplificación excesiva, como indica el contacto más somero con la cruel conducta social de otros animales. Sin embargo, la idea de que las *leyes* de la sociedad siguen los fundamentos básicos de la naturaleza humana tendrá que modificarse para comprender el hecho de que esa naturaleza es moldeada a su vez por las costumbres y normas de la sociedad en que habita. Si admitimos esto, tiene sentido preguntarse hasta qué punto ha influido en nuestras estructuras culturales y en nuestras instituciones el racionalismo científico del siglo XVIII.

Es posible que parezca extraño afirmarlo en un libro acerca del valor de los modelos basados en la física dentro de las ciencias sociales. Pero no es más que una nota de cautela. Creo que el estado actual de la teoría económica convencional, que, por ejemplo, continúa aceptando los cuestionables “principios fundamentales” nacidos a la luz del comprensible exceso de confianza de la Ilustración, nos advierte de la necesidad de esa cautela.

ELECCIÓN Y CERTIDUMBRE

En realidad, la cuestión es si podemos confiar en que seremos capaces de distinguir entre ley física y ley moral. Lo que una física de la socie-

* Adam Smith tuvo sólidos contactos con la ciencia: estudió con detenimiento los *Principia* de Newton y era amigo del químico Joseph Black y del geólogo James Hutton.

dad no puede hacer es decirnos cómo deberíamos vivir, cómo deberíamos definir nuestras responsabilidades individuales y colectivas, cómo deberíamos decidir qué es importante. Pocas cosas hay tan erróneas y peligrosas como buscar en la ciencia una guía moral. No hay leyes de la naturaleza que nos digan cómo comportarnos o cómo gobernar. John Stuart Mill reconoció la locura de intentar construir una utopía sobre la base de *leyes* que supuestamente determinan cómo tienen que ser las cosas en lugar de cómo son:

Una enorme proporción de los que han denunciado el carácter de los políticos filósofos no han intentado establecer secuencias universales, sino determinar preceptos universales. Han imaginado alguna forma de gobierno, o sistema de leyes, válido en todos los casos; una pretensión que bien merece la ridiculización con que se la toman quienes están inmersos en la práctica política.¹⁴

El filósofo escocés Adam Ferguson, colega de Adam Smith, estableció una distinción clara en 1776. Si una ley física nos dice lo que es, dijo, una ley moral dice *lo que debe ser*. La segunda es ley “como consecuencia de su rectitud, o de la autoridad de la que emana [...] no porque sea un hecho”.¹⁵

El problema, por supuesto, es que si no hay forma objetiva de establecer leyes morales, la ley de una persona no tiene mayor fuerza que la de otra, así pues, la primacía depende de la distribución del poder. Para Carlos I era una ley moral que debía ostentar un poder absoluto. Los intentos de Bentham y Mill por evitar ese relativismo recurriendo al principio del utilitarismo –el mayor bien para el mayor número–* nunca fueron muy convincentes: la políticas sociales no las puede determinar la simple aritmética.

Sin embargo, Ferguson identifica el eje ético central de una física de la sociedad: el equilibrio entre elección y determinismo. Ferguson era tan producto de su tiempo como Adam Smith, Comte o Condorcet y, por tanto, creía que *hay* leyes “naturales” que gobiernan la sociedad. “Las naciones –escribió– tropiezan con instituciones que en realidad son el resultado de la acción humana, pero no el resultado de ningún designio

* George Kingsley Zipf ha señalado que esta idea carece de sentido, se trata de la “falacia del doble óptimo”. ¿Es el mayor bien para unos pocos tan deseable como un bien moderado para muchos?

humano”.¹⁶ No creía que esas instituciones debieran gobernar, sino que las leyes que pudieran existir se derivan de la naturaleza de las inevitables consecuencias de ciertas acciones. Si reconocemos esas consecuencias, podemos decidir si son deseables de acuerdo a los preceptos morales que escojamos adoptar. No hay razón para creer que las consecuencias no deseables no pueden paliarse o incluso evitarse. La física de la sociedad apoya esta idea. Los economistas que sostienen que las grandes desigualdades no son más que una de las cosas con las que debemos convivir si deseamos una sociedad mejor que la de la Edad de Piedra no hablan como científicos, sino como dogmáticos. Los mejores modelos de la economía pueden decirnos si, cambiando este o aquel detalle de nuestros hábitos comerciales, podemos conseguir una distribución más equitativa de la renta. De igual modo, se podría determinar qué cambios de las normativas y de las restricciones del tráfico podrían aminorar la tendencia a que en ciertos tramos de carretera se produzcan atascos (los atascos no son exactamente inmorales, pero no son deseables).

Ralph Waldo Emerson, otro que creía en la idea de que la actividad humana está gobernada por ciertas leyes, tenía la impresión de que esas leyes no pueden prescribir un sistema particular de gobierno. En lo relativo a las instituciones, la capacidad de elección prevalece. “Al tratar con el Estado –sostenía–, deberíamos recordar que sus instituciones no son aborígenes, si bien existían antes de que nosotros nacióramos [...] todas son imitables, todas alterables; podemos hacerlo así de bien y podemos hacerlo mejor”.¹⁷ En otras palabras, las cosas no tienen por qué ser como son. Karl Marx estaba de acuerdo: “Los filósofos han pretendido interpretar el mundo. El asunto, sin embargo, es cambiarlo”.¹⁸ Sin embargo, el economista Paul Ormerod sugiere que Marx lo interpretó al revés: “Los políticos han pretendido cambiar el mundo, pero la cuestión es interpretarlo correctamente”.¹⁹ Al final, hemos de hacer ambas cosas: comprender y tener el poder para cambiarlo van de la mano. Los políticos siempre están dispuestos a buscar o prometer cambios que no pueden aplicar o que serían imposibles dentro de los sistemas de gobierno que han creado. (Marx, por el contrario, sólo vislumbraba un sencillo e inevitable futuro, y lo único que pretendía era acelerarlo.)

La idea de utilizar la física para justificar el cambio y predecir sus límites no tiene una política intrínseca. No es libertaria ni represiva, ni de izquierdas ni de derechas. Puede, ocasionalmente, ayudarnos a abrir-

nos paso a través de esas ideologías. Puesto que la mayor parte del pensamiento político empieza con una visión del mundo particular y luego busca la forma de que el mundo real se pliegue a ella, la sugerencia de que puede haber fluctuaciones inevitables y leyes inevitables cuando muchos individuos se unen e interactúan podría resultar muy incómoda para los políticos. Pero si no se enfrentan a ella como una posibilidad real, corren el riesgo de decantarse por opciones que pueden ser fútiles y muy costosas. El historiador Richard Olson resume la cuestión perfectamente al dar cuenta de las conclusiones de Adam Ferguson acerca de la forma de lidiar con las leyes naturales de la sociedad:

Una forma de expresar la relación entre las leyes físicas y morales –esto es, entre la ciencia y la moral– en la formación de la sociedad tal y como Ferguson la comprendía, es decir que los sistemas sociales son *suavemente* deterministas. Abandonados a su suerte, se desarrollarán inevitablemente de acuerdo a ciertas directrices, pero la posibilidad de cambiar esas líneas mediante la intervención consciente e intencional existe. El quid de una “ciencia social”, por lo tanto, está en explorar las oportunidades de acción moral intencional y sus probables consecuencias. Sin la ciencia, la moral está ciega; pero sin la moral, la ciencia es inútil, absurda y parálitica.²⁰

PLANIFICAR PARA LA LIBERTAD

En la Antigüedad, la distinción de Ferguson entre “natural” y “moral” carecía de sentido. Cicerón (166 a. de C.-43 a. de C.) tiene una fe conmovedora en la moralidad natural del universo. En *De legibus [De las leyes]*, dijo que “ahora podemos perder totalmente el juicio, y dentro de poco suponer que la ley y la justicia no se fundamentan en la naturaleza y confiar en las efímeras opiniones de los hombres”.²¹ La historia no respalda su optimismo. Si queremos ley y justicia, debemos construir una sociedad que las fomente y las proteja de los abusos. Es ahí donde interviene el Estado.

A Aristóteles le parecía obvio que la humanidad tuviera una compulsión natural a formar grupos: “el hombre es por naturaleza un animal político”,²² afirmó. Es su opúsculo, *Sobre el gobierno de los príncipes* (c. 1259), Tomás de Aquino no podía estar más de acuerdo: “es natural para el hombre ser un

animal político y social, vivir en grupo, incluso más que todos los demás animales, como las necesidades de su naturaleza indican”.²³ Pero admitía las desventajas: “Allí donde hay muchos hombres juntos y cada uno mira por su propio interés, el grupo se disolvería y dispersaría si no hubiera también alguien que se ocupara de lo que concierne al bien común”.²⁴ Por tanto, un Estado no puede limitarse a ser grupo; tiene que ser un grupo con un dirigente. Dicho de otro modo, el gobierno es inevitable.

Pero desde aquí hay todavía un largo trecho hasta la dictadura necesaria de Hobbes. La crudeza de la solución de gobierno que ofrece Hobbes refleja, obviamente, su visión del ser humano, mucho más negativa. A diferencia de Cicerón, Hobbes no advertía en el hombre ninguna tendencia socializante redentora, sino únicamente la voluntad de explotar y dominar: “a los hombres la compañía no les causa ningún placer (al contrario, les causa un enorme pesar) cuando no hay poder capaz de intimidar a todos”²⁵. El siglo XX vio muchos regímenes con una enorme capacidad de intimidación, lo cual no es precisamente buena publicidad para Hobbes. ¿Cómo nos aseguramos de que la sociedad no sólo es estable sino moral?

Generalmente, en Occidente se da por sentado que la respuesta, o al menos buena parte de ella, es hacer que la sociedad sea democrática. Pero éste es un punto de vista muy moderno; o, al menos, a lo largo del tiempo ha gozado alternativamente del favor de la ciudadanía y ha caído en desgracia. Las democracias liberales de John Locke y John Stuart Mill en modo alguno representaban el futuro previsible de la Europa de los años treinta, vulnerable al fascismo y a un socialismo deformado y dictatorial. Ese telón de fondo nos permite comprender por qué el economista austriaco Friedrich von Hayek se vio impelido a escribir su famosa defensa de la libertad capitalista, *Camino de servidumbre* (1944). Pero la crítica de Hayek del socialismo, que él considera el inicio de un descenso inevitable hacia el totalitarismo, no es sólo una advertencia frente a Hitler, Mussolini y Stalin. También examina las distintas nociones de democracia y aborda la pregunta crucial que todos los demócratas deben hacerse: ¿hasta *dónde* debe llegar el gobierno?

Hayek recoge las ideas de Adam Smith cuando hace del mercado libre el árbitro de la sociedad política y económica. Puesto que desde su punto de vista el capital es la llave de la libertad (y la extrema ingenuidad de esta opinión debe considerarse a la luz del contexto de la época), impo-

ner restricciones a las formas de emplearlo es comprometer la libertad. Que Hayek aprobaba la teoría de Smith resulta evidente cuando le cita:

El estadista, que debería intentar orientar a los ciudadanos sobre la forma en que deberían emplear su capital, no sólo echa sobre sí la carga de una innecesaria atención, sino que asume una autoridad que con toda seguridad no sólo no se podría confiar a una sola persona, sino tampoco a un consejo o a un senado, y que de ningún otro modo puede ser tan peligrosa como en las manos de un hombre víctima de tanta locura y presunción como para creerse con capacidad para ejercerla.²⁶

Por lo tanto, para Hayek, “planificación” significa planificación económica, y eso, y todo lo que se le parezca, suena a socialismo. Mucho mejor confiar en las fuerzas de la competencia para crear un mercado que, si no necesariamente equitativo, al menos sea *justo*, en el sentido de que ofrece igualdad de oportunidades dentro de los límites de un mismo clima cultural. Evidentemente, el debate “regulación del mercado frente a libertad de mercado” es tan relevante hoy como hace sesenta años.

En el consejo de Hayek subyace la firme creencia en los principios autorreguladores que mantienen el equilibrio. Sería fácil interpretarlo como una defensa del *laissez faire* si Hayek no se tomara tantas molestias para explicar la diferencia: “El argumento liberal obra en favor de hacer el mejor uso posible de las fuerzas de la competencia como medio para coordinar los esfuerzos, no es un argumento para dejar las cosas como están”.²⁷ Además, Hayek tiene la impresión de que la economía necesita *cuidados*, de modo que, en tanto que “fuerza espontánea de la sociedad”, pueda operar a mayor beneficio (de esa sociedad):

La actitud del liberal hacia la sociedad es como la del jardinero que cuida una planta y para crear las condiciones más favorables para su crecimiento debe saber cuanto le sea posible de su estructura y de la forma en que funciona.²⁸

Ése es el quid de la cuestión. La negativa de Hayek de que existe un sistema absoluto de valores puede resultar ofensiva –su aseveración de que cada persona debe ser su propio juez parece una receta para el desas-

tre (o para un Hitler)–. Se puede cuestionar su creencia de que las fuerzas del mercado operan inevitablemente en aras de “lo mejor” y, por lo tanto, hay que darles rienda suelta. Pero sin duda incumbe a todo aquel que pretenda encabezar o gobernar una sociedad “saber cuanto le sea posible de su estructura y de la forma en que funciona”. Cuando menos, Hayek tiene derecho a creer que en la sociedad *hay* fuerzas espontáneas. En este libro hemos revisado algunos de los esfuerzos que últimamente se han hecho por definir cuáles son estas fuerzas.

Sin duda, algunas de estas fuerzas son lo que podríamos llamar exógenas: provienen del exterior, de los cambios tecnológicos (como, por ejemplo, la mecanización, el control de natalidad, la informática), o del entorno (sequías y hambre, cambio climático). Pero muchas de las fuerzas que actúan sobre la sociedad son la consecuencia colectiva de interacciones entre una persona y otra, en transacciones comerciales, en la difusión de nuevas modas, en una contienda bélica, en el matrimonio o para evitar un accidente de tráfico. Thomas Schelling señala que esas fuerzas son, normalmente, un conflicto de deseos contrapuestos, una especie de intercambio de atracción y repulsión. Lo que deseamos para nosotros no siempre tiene por qué equivaler a lo que deseamos para los demás:

Buena parte de la organización social –de lo que llamamos sociedad– consiste en acuerdos institucionales para superar las divergencias entre los intereses individuales y algún pacto colectivo [...]. Nos enfrentamos a la frecuente divergencia entre lo que las personas quieren hacer y lo que, juntas, les gustaría conseguir.²⁹

Particularmente (aunque no sólo) cuando nos enfrentamos a esas divergencias entre las metas individuales y las colectivas, nuestras intuiciones sobre lo que ha de resultar de la conducta agregada pueden resultar una pobre guía y para predecir los resultados de nuestras acciones en su lugar necesitamos modelos realistas pero sencillos.

El mayor desafío consiste en decidir si deseamos o no las consecuencias que se derivan de la existencia de esas fuerzas. Hayek no acierta a precisar por qué el mercado libre es lo mejor para la sociedad. Puede ser el más eficiente en cierto sentido –aunque los nuevos modelos económicos arrojan dudas incluso sobre esto–, pero si permite (de hecho, fomenta) enormes divergencias en los beneficios, fuera de toda proporción con el

esfuerzo y la responsabilidad, si permite que se trafique con pornografía infantil (o directamente con niños) con la facilidad con la que comercia con plátanos, si coloca a las naciones pequeñas a merced de las grandes corporaciones, entonces, sin duda, tenemos derecho a preguntarnos si esto es lo que queremos. Como señala Schelling: “Que cada uno lo haga bien a la hora de adaptarse a su entorno social no equivale a que el entorno social que colectivamente todos creamos para todos sea satisfactorio”.³⁰

Ahí es donde acaba la utilidad de la física social. Si se convirtiera en una justificación de las elecciones morales, excedería su cometido. Esto debería ser obvio, pero la ciencia actual se ha granjeado tanta autoridad que, a veces, el pequeño paso a la moralidad y la ética puede pasar desapercibido. Existe ya una tendencia a dividir la ciencia en “buena” y “mala”, tachándola, por ejemplo, de holística o reduccionista. Es descorazonador. Como dice Kenan Malik, un autor inglés, “hay pocas cosas más desalentadoras que convertir la ciencia en fe”.³¹ El propio Hayek clamó contra la inapropiada aplicación de las ideas científicas a los problemas sociales y, en una época en que los progresistas se abrazaban a argumentos pseudo-darwinianos para justificar la eugenesia, tenía motivos para protestar. Saber cómo *son* las cosas nunca puede suplantar la obligación de justificar nuestras preferencias por cómo deberían ser.

Y así, la física de la sociedad es y sólo puede ser un instrumento, nunca una brújula moral. John Stuart Mill identificó con gran elegancia cómo había que emplear esos instrumentos:

El objetivo de la práctica política es arropar a cualquier sociedad con el mayor número posible de circunstancias con tendencias beneficiosas, y acabar con las tendencias perjudiciales o, en la medida de lo posible, contrarrestarlas. Aunque sin el poder de predecir con precisión su resultado conjunto, basta con conocer esas tendencias para obtener una considerable extensión de ese poder.³²

No podemos menos que optar por lo más sabio e investigar esas tendencias; en realidad, podríamos tomárnoslo como una obligación moral. En 1924, el sociólogo estadounidense Franklin Giddings admitió que esa búsqueda es el objetivo principal de las ciencias sociales y que se podría alcanzar la meta con más facilidad si, en efecto, la disciplina pudiera evolucionar y convertirse en una verdadera ciencia:

[L]a ciencia no consiste ni más ni menos que en elucidar los hechos e intentar comprenderlos y [...] lo que la ciencia hace por nosotros no es ni más ni menos que ayudarnos a afrontar esos hechos [...] Al afrontar los hechos que las ciencias sociales nos dan a conocer, y nos permitirán conocer mejor, podremos disminuir la miseria humana y vivir más sabiamente de lo que la especie humana ha vivido hasta ahora.³³

En realidad, eso es lo que Thomas Hobbes quería. Que sus *hechos* apuntaran hacia una institución política que hoy en día consideraríamos intolerable y más susceptible de contribuir a la miseria humana que de acabar con ella constituye una advertencia de lo difícil que es escapar al signo de los tiempos, por muy *científico* que cada cual se esfuerce en ser. No obstante, muchos aspectos de la metodología y la argumentación de Hobbes son notablemente modernos y el filósofo bien puede reclamar un lugar de privilegio en la larga sucesión de intentos de deducir las leyes del comportamiento colectivo de los hombres a partir de las tendencias de su conducta individual.

Como se puede advertir, las repercusiones de una física de la sociedad pueden muy bien formularse con palabras de otras épocas. En realidad, a menudo es en esas palabras donde debemos buscar una perspectiva más amplia de lo que los físicos estadísticos de hoy en día están haciendo. Porque en la actualidad, los científicos tienen buenas razones para interpretar sus hallazgos a la luz de una gran humildad y con conservadurismo. Entretanto, los políticos y los estrategas de la política tienden a abandonar la filosofía política visionaria de sus predecesores y a buscar soluciones rápidas a retos a corto plazo. Lo más urgente, y es una cuestión en la que la física de la sociedad tiene mucho que decir, es saber si podemos construir una sociedad bendecida con la sabiduría y compasión que otras, normalmente en tiempos más duros o más difíciles, fueron capaces de vislumbrar y demandar.

EPÍLOGO TELÓN

Seguramente, el intérprete que se aplaude a sí mismo o se engaña o está desesperado; pero, ¿dónde describir mejor que en la conclusión la siguiente, y deliciosa, manifestación de la física social?

En algunos países y culturas, particularmente del Este de Europa, el aplauso con el que un público satisfecho manifiesta su aprecio por una actuación tiende a oscilar entre la aleatoriedad y la sincronía. Cada uno de los presentes aplaude con su propio ritmo y cientos de aplausos se superponen en un rumor continuado que semeja el del oleaje sobre unos guijarros. Pero entonces ocurre algo notable: el rumor se convierte en un golpeteo regular y cada par de manos aplaude al unísono con los demás. La sincronización dura quizá un minuto o dos y luego vuelve a disolverse en el caos.

Nadie dirige esta *interpretación*, nadie marca el ritmo ni el momento en que empieza la sincronía. Simplemente ocurre, no una, sino varias veces durante una ovación. Y no es difícil que dos o tres personas sincronicen sus palmadas. En realidad, lo difícil sería evitarlo, de igual modo que dos personas tienden a sincronizar sus pasos cuando caminan juntas. Pero el aplauso sincronizado de un público compuesto por centenares de personas es un reto de otro cariz. Que cristalice tan rápidamente es sorprendente; pero, ¿por qué, una vez lograda, la sincronización no perdura? ¿Por qué el aplauso no sigue así, dado que cada miembro del público podría mantenerlo conscientemente sin mucho esfuerzo? ¿A qué se debe este vaivén entre el orden y el caos?

Tamás Vicsek, Albert-László Barabási y sus compañeros se hicieron la misma pregunta. Grabaron el aplauso final del público en varios teatros y óperas de Hungría y Rumania y observaron que el volumen cambiaba entre la ovación sincronizada y la caótica. Se dieron cuenta de que, aunque el aplauso sincronizado produce picos de ruido que pueden superar el nivel de sonido durante el aplauso no sincronizado, con la sincronización, el ruido *medio* desciende (véase figura E.1).

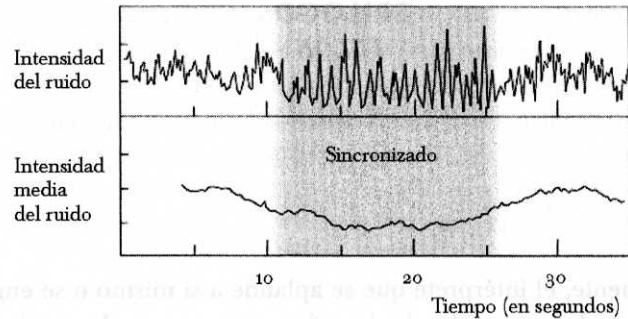


Figura E.1. Los niveles de ruido durante el aplauso del público en un teatro de Europa del Este. El paso del aplauso sincronizado a la ovación aleatoria viene marcado por la aparición de picos marcados y regularmente espaciados de la intensidad del ruido (arriba). Cuando esto ocurre, la intensidad del ruido medio disminuye (abajo), sólo para surgir de nuevo cuando el aplauso sincronizado se disipa.

Este descenso se produce no porque los miembros del público aplaudan con menos vigor cuando lo hacen sincrónicamente, sino porque entonces aplauden *con menos frecuencia*. Cada persona espacia sus palmadas hasta más o menos el doble con la ovación sincronizada. Presumiblemente, esto se produce porque es más difícil aplaudir al unísono con los demás cuando el ritmo es rápido —la sincronización de un aplauso lento desaparece si éste se acelera—. Nadie del público piensa conscientemente en esto: el ritmo medido del aplauso en sincronía se encuentra a sí mismo.

Los investigadores sugieren que la diferencia en el volumen medio explica por qué en las salas de conciertos el aplauso oscila entre la sincronía y el desorden. Un público agradecido quiere hacer mucho ruido. Al parecer, sin embargo, también disfruta de la experiencia compartida, que presta a la multitud una sola voz. Pero las dos cosas están en conflicto, porque con la sincronización el ruido medio decae. Nadie registra este descenso conscientemente, pero habiendo cambiado al modo sincronizado, el público empieza a acelerar el ritmo a fin de recuperar el volumen de ruido de cuando el aplauso no estaba sincronizado. Al hacerlo, pierde la capacidad de mantener la sincronía y ésta se va disipando y regresa el caos. Momentos después, el atractivo de la uniformidad vuelve a surgir y el ciclo se repite.

Un tira y afloja, una tensión entre deseos en conflicto. Esto es cuanto supone amoldar nuestra conducta social a pautas complejas y a menudo impredecibles dictadas por influencias que quedan más allá de nuestra experiencia inmediata y de nuestra capacidad de control. En cuanto entramos a formar parte de un grupo, no podemos estar seguros de lo que puede ocurrir.

NOTAS

INTRODUCCIÓN

- ¹ W. Petty, *Essays on Mankind and Political Arithmetick*, www.gutenberg.org/etext/5619.
² *Ibid.*, prefacio.
³ K. Waltz, *Man, the State, and War*, Nueva York, Columbia University Press, 1954, p. 75.

I. DESPERTANDO AL LEVIATÁN

- ¹ B. Fontenelle, citado en A. G. R. Smith, *Science and Society in the 16th and 17th Centuries*, Nueva York, Science History Publications, 1972.
² B. Fontenelle, *Conversations on the Plurality of Worlds* (trad. al inglés de W. Gardiner), Londres, 1715, pp. 11-12.
³ R. M. MacIver, *The Web of Government*, Nueva York, Macmillan, 1947. Citado en R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 493.
⁴ S. Cotgrove, *The Science of Society*, Londres, George Allen & Unwin, 1967, p. 181.
⁵ S. Sturluson, *The Prose Edda* (trad. al inglés de J. Y. Young, con pequeños cambios), California, University of California Press, 1964, p. 86.
⁶ J. Aubrey, *Brief Lives*, Londres, Penguin, 2000, pp. 427-428.
⁷ T. Hobbes, *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, pp. 110-111.
⁸ T. Hobbes, *Philosophical Rudiments Concerning Government and Society*, capítulo 1, sección 7, p. 26. Citado en *Leviathan*, p. 28. [*Rudiments* es una traducción al inglés del propio Hobbes de su texto *De cive*, escrito en latín, 1642.]
⁹ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 82.
¹⁰ R. Descartes, "Meditations on first philosophy", en *Meditations and Selections from the Principles of Philosophy*, Illinois, Open Court, 1952, p. 98.
¹¹ T. Hobbes, *Philosophical Rudiments*, prefacio, pp. 10-11.
¹² T. Hobbes, *De cive*, Nueva York, Appleton-Century-Crofts, 1949, p. 15.
¹³ F. Bacon, *New Atlantis*. Citado en J. Carey (ed.), *The Faber Book of Utopias*, Londres, Faber & Faber, 1999, p. 64 [Para las ediciones en español de ésta y otras utopías véase *Moro, Campanella, Bacon. Utopías del Renacimiento*, México, Fondo de Cultura Económica, 1941].
¹⁴ R. M. MacIver, *The Web of Government*, 1947, citado en Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 493.
¹⁵ L. Mumford, *The Culture of Cities*, Londres, Secker & Warburg, 1946, p. 93.
¹⁶ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 151.
¹⁷ *Ibid.*, p. 161.
¹⁸ *Ibid.*, p. 186.
¹⁹ *Ibid.*, p. 190.
²⁰ Job, 41:8-34.
²¹ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 228.

²² F. L. Nussbaum, *The Triumph of Science and Reason 1660-1685*, Nueva York, Harper & Row, 1965, p. 61.

²³ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 261.

²⁴ *Ibid.*, p. 379.

²⁵ R. Olson, *Science Deified and Science Defied*, California, University of California Press, 1990, vol. 2, p. 41.

²⁶ D. Hume. Citado en R. Tuck, *Hobbes: a Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2002, p. 107.

²⁷ T. Hobbes, *Behemoth, or The Long Parliament*, reimpresso por University of Chicago Press, 1990, p. 126.

²⁸ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 208.

Cita de la Figura 1.2: T. Hobbes, *Leviathan*, p. 227.

II. FUERZAS MENORES

¹ P. Hein, *Grooks*, Massachussets, MIT Press, p. 24.

² A. Einstein. En A. Beck y P. Havas (eds.), *The Collected Papers of Albert Einstein*, Princeton University Press, 1987, carta a Mileva Maric, 13 de septiembre, vol. 1, p. 154.

³ J. C. Maxwell, *Notes and Records of the Royal Society of London*, conferencia inaugural en Aberdeen, 2 de noviembre de 1856, núms. 28 y 69, 1973.

⁴ I. Kant. Citado en F. A. Hayek, *The Road to Serfdom*, Londres, Routledge, 1962, p. xx.

⁵ R. J. Bošković, *Theoria philosophiae naturalis*, Venecia, 1763, traducido como *A Theory of Natural Philosophy*, Chicago, Open Court, 1922, reimpresso por MIT Press, Massachussets, 1966, p. 141.

⁶ P. S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, París, 1814, p. 3, reimpresso en París, Gauthiers-Villars, 1921.

⁷ S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propre à développer cette puissance*, París, Bachelier, 1824. En S. Carnot, *Reflections on the Motive Power of Fire and Other Papers on The Second Law of Thermodynamics* (traducción al inglés de R. H. Thurston), Nueva York, Dover, 1960.

⁸ C. P. Snow, *The Two Cultures*, Cambridge University Press, 1965, pp. 14-15.

⁹ W. Thompson, "On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy", *Philosophical Magazine*, 1852, serie 4.4, pp. 304-306.

¹⁰ E. A. Moelwyn-Hughes, citado en J. M. Thomas, "Royal Institution inaugural lecture", *Royal Institution Proceedings*, 1896, p. 3.

¹¹ L. Boltzmann, "Weitere Studien ubre das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen", *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, Wien II*, 1872, 66, 275-470. En F. Hasenöhl (ed.), *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Leipzig, J. A. Barth, 1909, vol. 1, p. 345.

III. LA LEY DE LOS GRANDES NÚMEROS

¹ W. Wundt, *Beitrage zur Theorie der Sinneswahrnehmung*, Leipzig, 1862, p. xxv.

² J. Herschel, "Quetelet on probabilities", *Edinburgh Review*, núm. 92, 1850, p. 42.

³ H. Spencer, *The Study of Sociology*, Osnabrück, Otto Zeller, 1966, p. 39.

⁴ L. Boltzmann. En W. Hoefflechner (ed.), *Ludwig Boltzmann: Leben und Briefe*, Graz, Publikationen aus dem Archiv der Universität Graz, Akademische Druck-und Verlagsanstalt, 1994, p. 244.

talt, 1994. [Traducción al inglés de F. Rohrlch, "A poem by Ludwig Boltzmann", *American Journal of Physics*, núm. 60, 1992, pp. 972-973.]

⁵ D. L. Goodstein, *States of Matter*, Nueva York, Prentice Hall, 1975, p. 1.

⁶ R. Musil, *The Man Without Qualities*, traducción al inglés de E. Wilkins y E. Kaiser, Londres, Secker & Warburg, 1953-1960. [Traducción al español: *El hombre sin atributos*. Trad. de José M. Sáez, dos volúmenes. Barcelona, Seix Barral, 2001.]

⁷ W. Petty, "The political anatomy of Ireland". En C. H. Hull (ed.), *The Economic Writings of Sir William Petty*, Cambridge University Press, 1899, vol. 1, p. 129.

⁸ J. Graunt, "Observations upon the Bills of Mortality". En Hull, *The Economic Writings of Sir William Petty*, vol. 2, p. 334.

⁹ Citado en D. J. Boorstin, *The Discoverers*, Nueva York, Vintage, 1985, p. 668.

¹⁰ T. Short, *A Complete History of the Increase and Decrease of Mankind*, Londres, 1767.

¹¹ I. Kant, *On History*, Indianápolis, Bobbs-Merrill, 1963, p. 11.

¹² J. A. N. de Condorcet, *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*, 1785. Citado en J. Carey (ed.), *The Faber Book of Utopias*, Londres, Faber & Faber, 1999, pp. 161-162.

¹³ J. A. N. de Condorcet, *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, 1795. Citado en Carey, p. 165.

¹⁴ J. A. N. de Condorcet, *Esquisse*. Citado en R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 68.

¹⁵ J. T. Desagulier, *The Newtonian System of the World*, líneas 17-18, 1728. Citado en M. C. Jacob, *The Radical Enlightenment: Pantheists, Freemasons and Republicans*, Londres, Allen & Unwin, 1981, p. 124.

¹⁶ D. Hume, "That politics may be reduced to a science", 1741. En S. Copley and A. Edgar (eds.), *Selected Essays*, Oxford University Press, 1993, pp. 13-24.

¹⁷ J. Swift, *Gulliver's Travels*, Londres, Penguin, 1985, libro 11, p. 176. [Traducción al español: *Viajes de Gulliver*, Barcelona, Galaxia Gutenberg, 2006.]

¹⁸ E. Burke, *Reflections on the Revolution in France*, Londres, J. Dodsley, 1790, párrafo 98. Reimpresión: Londres, Penguin, 1982. [Traducción al español: *Reflexiones sobre la Revolución en Francia*, Madrid, Alianza, 2003.]

¹⁹ A. Comte, *Cours de philosophie positive*. Citado (en inglés) en Bierstedt, p. 192.

²⁰ A. Quetelet, "Lettre à M. le Bourgmestre, 15 dec. 1831", *Annuaire de l'observatoire de Bruxelles*, núm. 1, 1834, p. 285, "Letter to Bouvard", 5 de noviembre de 1830. Citado en J. Lotin, *Quetelet: Statisticien et Sociologue*, Lovaina, Institut Supérieur de Philosophie, 1912, p. 52.

²¹ A. Quetelet, "Notice scientifique", en *Annuaire de l'Observatoire de Bruxelles*, núm. 7, 1840, p. 230.

²² A. Quetelet, "Recherches sur le penchant au crime aux différents ages", *Nouveaux mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-lettres de Bruxelles*, vol. 7, 1832, p. 80.

²³ A. Quetelet, *Sur l'homme et le développement de ses facultés, ou essai de physique sociale*, París, Bachelier, 1835, p. 289.

²⁴ A. Quetelet, "Recherches sur le penchant au crime aux différents ages", p. 6.

²⁵ J. Herschel, "Quetelet on probabilities", *Edinburgh Review*, núm. 92, 1850, p. 14.

²⁶ J. S. Mill, *A System of Logic*, 1862. En *Collected Works*, University of Toronto Press, 1973, vols. 7-8, p. 932. [Traducción parcial al español: *El utilitarismo*, Madrid, Alianza, 1999.]

²⁷ H. T. Buckle, *History of Civilization in England*, Nueva York, Hearst International Library, 1913, vol. 2, p. 244.

- ²⁸ I. Kant, "Idea of a universal history from a cosmopolitan point of view". Véase I. Kant, *On History*, Indianápolis, Bobbs-Merrill, 1963, p. 11.
- ²⁹ H. T. Buckle, *History of Civilization in England*. Véase F. Stern (ed.), *Varieties of History from Voltaire to the Present*, Londres, Macmillan, 1970 (2ª ed.), pp. 121-132.
- ³⁰ W. Newmarch, "Some observations on the present position of statistical inquiry with suggestions for improving the organization and efficiency of the International Statistical Congress", *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 23, 1860, p. 362.
- ³¹ N. W. Senior, "Opening address of Nassau W. Senior, Esq...", *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 23, 1860, p. 359.
- ³² F. K. Hunt, "A few facts about matrimony", *Household Words*, núm. 1, 1850, p. 374.
- ³³ R. W. Emerson, "Fate", *The Conduct of Life & Other Essays*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1908, p. 159.
- ³⁴ M. Twain, *Autobiography*, Nueva York, Harper & Brothers, 1924, vol. 1, cap. 20.
- ³⁵ F. Nietzsche, *Untimely Meditation. Second Part: Of the Use and Disadvantage of History for Life*, Leipzig, E. W. Fritzsche, 1874.
- ³⁶ Citado en L. Campbell y W. Garnett, *The Life of James Clerk Maxwell*, Londres, Macmillan, 1882, pp. 294-295.
- ³⁷ J. C. Maxwell, "Molecules" (conferencia pronunciada en 1873), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, 1890, vol. II, p. 374.
- ³⁸ Citado en Campbell y Garnett, pp. 438-439.
- ³⁹ L. Boltzmann. Citado en "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen", en *Wissenschaftliche Abhandlungen*, Leipzig, J. A. Barth, 1909, núm. 1 (ed. por F. Hasenörl), p. 317.
- ⁴⁰ P. G. Tait, "On the foundations of the kinetic theory of gases", *Scientific Papers*, Cambridge University Press, vol. II, 1898-1900, p. 126.
- ⁴¹ C. S. Pierce, "The fixation of belief", en *Popular Science Monthly*, núm. 12, 1886, pp. 1-15, reimpresso en *Collected Papers*, Massachusetts, Harvard University Press, 1974, vol. V, p. 226 [Quiero dar las gracias a Vincent Bauchau por llamar mi atención sobre esta cita].
- ⁴² F. Galton, *English Men of Science: Their Nature and Nurture*, Nueva York, D. Appleton, 1875, p. 17.
- ⁴³ A. A. Cournot, *Exposition de la théorie des chances et des probabilités*, París, Hachette, 1843, p. 181.
- ⁴⁴ J. J. Fox, "On the province of the statistician", en *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 23, 1860, p. 331.
- ⁴⁵ A. Taillandier, reseña de "Compte general de l'administration de la justice criminelle en France", *Revue encyclopédique*, núm. 40, 1828, p. 612.
- ⁴⁶ "Introduction", en *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 1, 1838, p. 3.
- ⁴⁷ W. Farr, citado en M. Diamond y M. Stone, "Nightingale on Quetelet", en *Journal of the Royal Statistical Society A.*, núm. 144, 1981, p. 70.
- ⁴⁸ A. de Candolle, "Considérations sur la statistique des délits", en *Bibliothèque universelle des sciences, belles-lettres et arts*, núm. 104, 1830, p. 160.
- ⁴⁹ I. Kant, *On History*, p. 11.
- ⁵⁰ A. Quetelet, "De l'influence de libre arbitre de l'homme sur les faits sociaux", *Bulletin de la commission centrale de statistique*, núm. 3, 1847, p. 142.
- ⁵¹ A. Quetelet, *Sur l'homme...*, p. 9.
- ⁵² W. Cyples, "Morality of the doctrine of averages", *Cornhill Magazine*, núm. 10, 1864, p. 224.

- ⁵³ "The address of the Prince Consort on opening as President the Fourth Session of the International Statistical Congress", *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 23, 1860, p. 280.
- ⁵⁴ F. Dostoyevski, *Letters from the underworld*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1913, p. 32. [Traducción al español: *Memorias del subsuelo*, Losada, Madrid, 2004.]
- ⁵⁵ *Ibid.*, pp. 29-30, p. 32.
- ⁵⁶ *Ibid.*, p. 31.
- ⁵⁷ L. N. Tolstoi, *War and peace*, Londres, Penguin, 1969, p. 1404. [Traducción al español: *Guerra y paz*, Barcelona, Random House-Mondadori, 2005.]
- ⁵⁸ *Ibid.*, p. 1426.
- ⁵⁹ *Ibid.*, p. 1440.
- ⁶⁰ M. R. Hare. Citado en N. Ferguson, *Virtual History*, Londres, Picador, 1997, p. 446.
- ⁶¹ A. Tennyson, "Lucretius", Massachusetts, impreso para circulación privada, 1868, p. 10.
- ⁶² J. C. Maxwell, "Molecules". Citado en W. D. Niven, p. 373.
- ⁶³ J. C. Maxwell, carta a P. G. Tait, en C. G. Knott, *Life and Scientific Work of Peter Guthrie Tait*, Cambridge University Press, 1911, pp. 213-214.
- ⁶⁴ M. Smoluchowski, "Über den Begriff des Zufalls und den Ursprung der Wahrscheinlichkeitgesetz in der Physik". En *Oeuvres*, Cracovia, 1924-1928, núm. 3, p. 87.

IV. EL GRAN KABOOM

- ¹ R. W. Emerson, *The Conduct of Life*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1908, p. 210.
- ² J. C. Maxwell. En W. D. Niven (ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, 1890, vol. 2, pp. 715-717.
- ³ I. Newton, "Queries", en *Opticks*, reimpresso en Nueva York, Dover, 1952.
- ⁴ K. Vonnegut, *Cat's Cradle*, Londres, Penguin, 1965, p. 163.
- ⁵ M. Gladwell, *The Tipping Point*, Londres, Little, Brown & Co., 2000.
- ⁶ C. Jenks, *The Architecture of the Jumping Universe*, Londres, Academy Editions, 1995.
- ⁷ T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1962. [Traducción al español: *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de Cultura Económica, 1971.]
- ⁸ J. F. W. Herschel, *Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, Londres, Longman, Rees, Orme, Brown & Green, 1830, p. 188.
- ⁹ T. Andrews, "On the continuity of the gaseous and liquid states of matter", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, núm. 159, 1869, p. 575.
- ¹⁰ J. C. Maxwell, "Van der Waals on the continuity of the gaseous and liquid states", *Nature*, vol. X, 1874, pp. 477-480, aquí p. 478.

V. DEL CRECIMIENTO Y LA FORMA

- ¹ S. Hales, *Vegetables Staticks*, Londres, W. & J. Innys & T. Woodward, 1727.
- ² H. Spencer, *The Principles of Sociology*, 1876. Citado en R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 262.
- ³ G. C. Lichtenberg, citado en F. Cramer, *Chaos and Order*, Weinheim, VCH, 1993, p. 2.
- ⁴ H. D. Thoreau, *The Journal of Henry David Thoreau*, Massachusetts, Houghton Mifflin, 1906, vol. VIII, pp. 87-88.

⁵ J. W. Gibbs, "On the equilibrium of heterogeneous substances", en H. A. Bumstead y R. G. Van Name (eds.), *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*, Nueva York, Longman Green, 1906, vol. 1.

⁶ D'A. W. Thompson, *On Growth and Form*, 1917, p. 503. Edición revisada publicada por Cambridge University Press en 1942, reimpressa en Nueva York, Dover, 1992.

⁷ D'A. W. Thompson, p. 505.

⁸ I. Prigogine, *From Being To Becoming*, Nueva York, W. H. Freeman, 1980, p. 106.

⁹ J. L. Borges, "The Garden of Forking Paths", *Labyrinths*, Londres, Penguin, 1970, pp. 44-45. Versión original: "El jardín de los senderos que se bifurcan", *Ficciones*, 1944.

¹⁰ I. Prigogine, p. 106.

VI. LA MARCHA DE LA RAZÓN

¹ G. C. Lichtenberg, citado en F. Cramer, *Chaos and Order*, Weinheim, VCH, 1993, p. 114.

² E. A. Ross, *Social Control*, 1901. En R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 336.

³ H. von Kleist, "On the Marionette Theatre", *Berliner Adendblätter*, diciembre 12-15. Traducción de I. Parry, *Times Literary Supplement*, 20 de octubre de 1978.

⁴ A. van Leeuwenhoek. En C. Dobell (trad. y ed.), *Anthony van Leeuwenhoek and His "Little Animals"*, Nueva York, Russell and Russell, 1958.

⁵ T. Hobbes, *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, p. 228.

⁶ J. K. Parrish y L. Edelstein-Keshet, "Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation", *Science*, núm. 284, 1999, pp. 99-101.

⁷ C. Reynolds, citado en S. Levy, *Artificial Life*, Londres, Jonathan Cape, 1992, p. 74.

⁸ E. O. Wilson, citado en R. Lewin, *Complexity*, Londres, Macmillan, 1992, p. 178.

⁹ T. Hobbes, *Leviathan*, p. 225.

¹⁰ *Ibid.*, pp. 225-226.

¹¹ L. F. Henderson, "The statistics of crowd fluids", *Nature*, núm. 229, 1971, p. 381.

¹² B. Hillier y J. Hanson, *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press, 1984, p. 266.

¹³ *Ibid.*

¹⁴ M. Batty, J. Desyllas y E. Duxbury, "Safety in numbers? Modelling crowds and designing control for the Notting Hill Carnival", *Urban Studies*, vol. 40, 2003, pp. 1573-1590.

¹⁵ Parrish y Edelstein-Keshet, p. 101.

¹⁶ P. Ackroyd, *London: The Biography*, Londres, Chatto & Windus, 2000, p. 2.

¹⁷ *Ibid.*, p. 103.

¹⁸ H. Kett, citado en *Ibid.*, p. 517.

¹⁹ D. D. T. Chen, "The science of smart growth", *Scientific American*, diciembre 2000, pp. 84-92.

²⁰ *Ibid.*

²¹ L. Mumford, *The Culture of Cities*, Londres, Secker & Warburg, 1938, p. 233.

²² *Ibid.*, p. 7.

²³ H. Spencer, *Principles of Sociology*, citado en Bierstedt, 1876, p. 262.

²⁴ H. E. Stanley. Citado en I. Petersen, "The shapes of cities", *Science News*, 6 de enero de 1996, p. 9.

²⁵ H. Simon, *The Sciences of the Artificial*, Massachussets, MIT Press, 1996, pp. 33-34.

VII. EN EL CAMINO

¹ T. C. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*, Nueva York, W. W. Norton, 1978, p. 121.

² J. W. Gibbs. Citado en A. T. Winfree, *The Geometry of Biological Time*, Nueva York, Springer-Verlag, 1980.

³ R. Kipling, versos de *The Story of the Gadsbys*, Allahabad, A. H. Wheeler & Co., 1890.

⁴ R. Moe, discurso sobre la expansión urbanística, cena festiva de Red Hills Spring, Tall Timbers Research Station, Florida, 24 de marzo de 1999.

VIII. RITMOS EN EL MERCADO

¹ S. Johnson. Citado en R. Heilbroner, *The Worldly Philosophers*, Londres, Penguin, 2000, p. 41.

² Atribuido a G. B. Shaw.

³ J. W. von Goethe. Citado en R. W. Emerson, *The Conduct of Life*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1908, p. 197.

⁴ Heilbroner, p. 57.

⁵ D. Defoe, *Review*, núm. 2, 1706, p. 26. Citado en R. Donoghue, *England, Their England: Commentaries on English Language and Literature*, Nueva York, Alfred A. Knopf, 1988, p. 65.

⁶ Citado en J. G. A. Pocock, "Josiah Tucker on Burke, Locke, and Price", en *Virtue, Commerce and History: Essays on Political Thought and History, Chiefly in the Eighteenth Century*, Cambridge University Press, 1985, pp. 157-191.

⁷ R. W. Emerson, p. 202.

⁸ *Ibid.*

⁹ J. Kay, "Cracks in the crystal ball", *Financial Times*, 29 de septiembre de 1995.

¹⁰ I. Fisher. Citado en Heilbroner, p. 251.

¹¹ P. Krugman, *Peddling Prosperity*, Nueva York, W. W. Norton, 1994, p. xi.

¹² *Ibid.*

¹³ K. Marx y F. Engels, *The Communist Manifesto*, trad. de S. Moore, Londres, Junius Publications, 1996, p. 25. [Traducción al español: *El manifiesto del Partido Comunista*. Madrid, Turner, 2005.]

¹⁴ *Ibid.*, p. 48.

¹⁵ P. H. Cooter (ed.), *The Random Character of Stock Market Prices*, Massachussets, MIT Press, 1964.

¹⁶ Citado en G. Stix, "A calculus of risk", *Scientific American*, mayo de 1998, pp. 70-75.

IX. AGENTES DE LA FORTUNA

¹ R. Heilbroner, *The Worldly Philosophers*, Londres, Penguin, 2000, pp. 316-317.

² R. W. Emerson (1860), *The Conduct of Life*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1908, p. 199.

³ W. B. Arthur. Citado en M. M. Waldrop, *Complexity*, Londres, Penguin, 1994, p. 328.

⁴ T. Carlyle (1849), "The Nigger question", en *Miscellaneous Essays*, Londres, Chapman & Hall, 1888, vol. 7, pp. 79-110. (Para un comentario sobre la crítica de Carlyle a la "ciencia económica" y sus opiniones sobre las consecuencias económicas de la emancipación de los esclavos recomendando P. Groenewegen, "Thomas Carlyle, 'the dismal science', and the contemporary political economy of slavery", *History of Economics Review*, núm. 34, 2001, pp. 74-94.)

- ⁵ F. Y. Edgeworth, "Tests of accurate measurement", en *Papers Relating to Political Economy*, Londres, Macmillan, 1925, vol. 1, p. 331.
- ⁶ F. Y. Edgeworth, *Mathematical Psychics: An Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences*, Londres, Kegan Paul & Co., 1881, pp. 12-13.
- ⁷ F. W. Edgeworth, *Mathematical Psychics*, p. 50.
- ⁸ R. Heilbroner, p. 176.
- ⁹ J. M. Keynes, "Francis Ysidro Edgeworth", *Essays in Biography*, Nueva York, W. W. Norton, 1963, p. 224.
- ¹⁰ P. Krugman, *Peddling Prosperity*, Nueva York, W. W. Norton, 1994, p. xi.
- ¹¹ R. Heilbroner, p. 317.
- ¹² D. Howell, *The Edge of Now*, Londres, Macmillan, 2000.
- ¹³ J. Kay, "Economic with the truth", *Prospect*, octubre 2000, p. 70.
- ¹⁴ J. M. Keynes, *The General Theory of Employment, Interest and Money*, Londres, Macmillan, 1973, p. 161.
- ¹⁵ G. Soros. Citado en la introducción a W. B. Arthur, S. N. Durlauf y D. A. Lane (eds.), *The Economy as a Complex Evolving System II*, Massachussets, Addison-Wesley, 1997, p. 15.
- ¹⁶ J. Kay, p. 70.
- ¹⁷ A. Kirman, "Some observations on interactions in economics", documento presentado en un Taller sobre Cambio Estructural, Universidad Manchester Metropolitan, 20-21 de mayo de 1996.
- ¹⁸ *Ibid.*
- ¹⁹ W. B. Arthur *et al.*, p. 9.
- ²⁰ C. Davenant, "An Essay on the East-India Trade", Londres, 1696, p. 25.
- ²¹ A. Smith, *The Theory of Moral Sentiments*, Oxford, Clarendon Press, 1976, p. 82.
- ²² E. Burke, carta del 23 de mayo a Arthur Young, en *The Works and Correspondence of the Right Honourable Edmund Burke*, Londres, Francis & John Rivington, 1852, vol. II, p. 398.
- ²³ Y. Louzoun, S. Solomon, J. Goldenberg y D. Mazursky, "The risk at being unfair: World-size global markets lead to economic instability", 2002 (sin publicar).
- ²⁴ J. M. Epstein y R. Axtell, *Growing Artificial Societies*, Massachussets, MIT Press, 1996, p. 136.

X. DE PROPORCIÓN DESCOMUNAL

- ¹ G. K. Zipf, *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, Nueva York, Hafner, 1965, p. 27.
- ² H. Simon, *The Sciences of the Artificial*, Massachussets, MIT Press, 1996, p. 2.
- ³ P. Anderson. En W. B. Arthur, S. N. Durlauf y D. A. Lane (eds.), *The Economy as a Complex Evolving System II*, Massachussets, Addison-Wesley, 1997, p. 566.
- ⁴ L. Laloux, M. Potters, R. Cont, J.-P. Aguilar y J.-P. Bouchard, "Are financial crashes predictable?", *Europhysics Letters*, 1999, núm. 45, pp. 1-5.
- ⁵ P. Bak, *How Nature Works*, Oxford University Press, 1997, pp. 187-188.
- ⁶ *Ibid.*, p. 191.
- ⁷ A. Tennyson, "Locksley hall", en *Locksley Hall and Other Poems*, Londres, Ernest Nister, 1842, p. 20, verso 137.
- ⁸ B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, Nueva York, Freeman & Co., 1983.

- ⁹ E. Wolf. "Trends in household wealth during 1989-1992". Documento de la Secretaría de Trabajo, Nueva York. Véase también J. Díaz-Giménez, V. Quadri y J. V. Ríos-Rull, "Dimensions of inequality: Facts on the US distributions of earnings, income and wealth", *Quarterly Review of the Federal Reserve Bank of Minneapolis*, 1997, núm. 21, pp. 3-21.
- ¹⁰ C. Snyder, *Capitalism the Creator*, Nueva York, Macmillan, 1940, p. 417.
- ¹¹ Z.-F. Huang y Solomon, "Finite market size as a source of extreme wealth inequality and market instability", *Physica A*, núm. 294, pp. 503-513.
- ¹² G. K. Zipf, p. 543.
- ¹³ *Ibid.*, p. 544.

XI. OBRA DE MUCHAS MANOS

- ¹ C. Handy, *Understanding Organizations*, Londres, Penguin, 1993, p. 313.
- ² J. B. S. Haldane, "Shapes and weights", en *What Is Life?*, Welwyn Garden City, Alcuin Press, 1949, p. 186.
- ³ E. F. Schumacher, *Small Is Beautiful*, Londres, Sphere, 1974, p. 55.
- ⁴ Citado en G. Monbiot, *Captive State*, Londres, Macmillan, 2000, pp. 166-167.
- ⁵ *A Review of Monopolies and Mergers Policy: A consultative document*, Londres, cmnd 7198, HMSO, 1978, pp. 136-137.
- ⁶ A. Smith, *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations* (versión resumida), L. Dickey (ed.), Indianápolis, Hackett Publishing Co., p. 5.
- ⁷ Monbiot, p. 179.
- ⁸ R. Axtell, "Zipf distribution of US firm sizes", *Science*, núm. 293, 2001, pp. 1.818-1.820.
- ⁹ J. Sutton, "Gibrat's legacy", *Journal of Economic Literature*, núm. 35, 1997, pp. 42-43.
- ¹⁰ R. Axtell, "The emergence of firms in a population of agents: Local increasing returns, instable Nash equilibria, and power law size distributions", Washington DC., Center on Social and Economic Dynamics, Brookings Institution, 1999, documento de trabajo núm. 3, p. 3.
- ¹¹ J. Sutton, p. 57.
- ¹² J. Kay, "The real economy", *Prospect*, mayo 2003, p. 28.
- ¹³ R. Axtell, 1999, p. 87.

XII. UNASE AL CLUB

- ¹ J. S. Mill, *A System of Logic*, Londres, Longman, Green & Co., 1884, pp. 572-573.
- ² E. Hobsbawm, *Age of Extremes*, Londres, Abacus, 1994, p. 147. [Traducción al español: *Historia del siglo XX*, Buenos Aires, Crítica, 1998.]
- ³ L. N. Tolstoi, *War and Peace*, trad. de R. Edmundo, Londres, Penguin, 1969, vol. 2, p. 1426.
- ⁴ Tucídides, *History of the Peloponnesian War*, trad. B. Jowett, Londres, Oxford University Press, 1900, libro III, párrafo, 11.
- ⁵ R. Axelrod y D. S. Bennett, "Una teoría paisajística de la agregación", *British Journal of Political Science*, núm. 23, pp. 211-233.
- ⁶ K. Waltz, *Theory of International Politics*, Massachussets, Addison-Wesley, 1979, p. 167.

⁷ G. H. Snyder, "The security dilemma in alliance politics", *World Politics*, núm. 36, 1984, pp. 461-495.

⁸ E. Hobsbawm, p. 162.

⁹ M. Oakeshott, *Experience and its Modes*, Cambridge University Press, 1933, p. 128.

¹⁰ Citado en N. Ferguson (ed.), *Virtual History*, Londres, Picador, 1997, p. 1.

¹¹ H. Trevor-Roper, "History and imagination", en V. Pearl, B. Worden y H. Lloyd-Jones (eds.), *History and Imagination: Essays in Honour of H. R. Trevor-Roper*, Londres, Duckworth, 1981, p. 364.

¹² Ferguson, p. 85.

¹³ *Ibid.*

XIII. MULTITUDES EN EL VALLE DE LA DECISIÓN

¹ K. Mannheim, *Ideology and Utopia*, Nueva York, Harcourt, Brace & Co., 1936. Citado en R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 505.

² J. Epstein, "Learning to be thoughtless: social norms and individual computation", *Computational Economics*, núm. 18 (1), 2001, pp. 9-24.

³ M. Gladwell, *The Tipping Point*, Londres, Abacus, 2001, p. 259.

⁴ *The Onion*, núm. 36 (40), 9 de noviembre de 2000. www.theonion.com/onion3640/bush_or_gore

⁵ O. V. Bismarck. Citado en M. J. Hinich y M. C. Munger, *Analytical Politics*, Cambridge University Press, 1997, p. 3.

⁶ Epstein, "Learning to be thoughtless..."

⁷ T. C. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*, Nueva York, W. W. Norton, 1973, p. 20.

⁸ *Ibid.*, p. 23.

⁹ P. Ormerod, "Sense and segregation", *Prospect*, febrero de 2002, pp. 12-14.

¹⁰ M. Lind, "Are there global political values?", *Prospect*, diciembre de 2001, p. 20.

¹¹ F. Dostoyevski, *Crime and Punishment*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1911, p. 64.

¹² M. Gladwell, p. 8.

¹³ G. B. Shaw, *Getting Married*, 1908, p. 111. Citado en *Selected Papers from the Works of Bernard Shaw*, Londres, Constable & Co., 1912, p. 142.

¹⁴ *Ibid.*, p. 30. En *Selected Pasajes*, p. 145.

¹⁵ G. S. Becker, *A Treatise on the Family*, Massachusetts, Harvard University Press, 1991, p. 325.

¹⁶ *Ibid.*, p. 232.

¹⁷ *Ibid.*, p. 32.

¹⁸ *Ibid.*, p. 59.

¹⁹ *Ibid.*, p. 4.

²⁰ *Ibid.*

²¹ *Ibid.*, p. 19.

²² T. C. Schelling, p. 36.

²³ W. Newmarch, "Some observations on the present position of statistical inquiry with suggestions for improving the organization and efficiency of the International Statistical Congress", *Journal of the Statistical Society of London*, núm. 23, 1860, pp. 362-363.

²⁴ W. B. Arthur, "Inductive reasoning and bounded rationality", *American Economic Review*, núm. 84, 1994, pp. 406-411.

²⁵ *Ibid.*

XIV. LA COLONIZACIÓN DE LA CULTURA

¹ J.-J. Rousseau, "Considérations sur le Gouvernement de Pologne", en C. E. Vaughan (ed.), *The Political Writings of Jean Jacques Rousseau*, Cambridge University Press, vol. II, 1915, p. 432.

² C. Gilday. Citado en J. Mander, "Technologies of globalization", en E. Goldsmith y J. Mander (eds.), *The Case Against the Global Economy*, Londres, Earthscan, 2001, p. 52.

³ S. George. Citado en "Globally locally", *New Scientist*, 27 de abril de 2002, p. 44.

⁴ J. M. Epstein y R. Axtell, *Growing Artificial Societies*, Massachusetts, MIT Press, 1996, p. 163.

⁵ J. M. Epstein. Citado en I. Peterson, "The gods of Sugarscape", *Science News*, 23 de noviembre de 1996, p. 332.

⁶ Epstein y Axtell, p. 52.

XV. QUÉ PEQUEÑO ES EL MUNDO

¹ E. Durkheim, *Revue philosophique*, diciembre de 1879.

² M. E. J. Newman, "Ego-centered networks and the ripple effect", *Social Networks*, núm. 25, 2003, pp. 83-95.

³ S. Milgram. Citado en M. Gladwell, *The Tipping Point*, Londres, Abacus, 2001, p. 36.

⁴ J. Guare, *Six Grades of Separation: A Play*, Nueva York, Vintage, 1990.

Figura 15.2

Kevin Bacon - Eddie Albert: *The Big Picture [La gran película]*

Kevin Bacon - Meryl Streep: *El río salvaje*

Kevin Bacon - Jack Nicholson: *Algunos hombres buenos*

Kevin Bacon - Maximilian Schell: *Ídolos, mentiras y rock and roll*

Kevin Bacon - Allison Caine: *Diner [Cena]*

Kevin Bacon - Diane Lane: *Mi perro Skip*

Rod Steiger - Humphrey Bogart: *Más dura será la caída*

Rod Steiger - Eddie Albert: *El día más largo*

Rod Steiger - Jack Nicholson: *Mars Attacks!*

Rod Steiger - Diane Lane: *La leyenda de Bill Doolin*

Rod Steiger - Karl Malden: *La ley del silencio*

Rod Steiger - Marlon Brando: *La ley del silencio*

Rod Steiger - Maximilian Schell: *The Chosen [Los elegidos]*

Marlon Brando - Karl Malden: *La ley del silencio*

Marlon Brando - Maximilian Schell: *El novato*

Marlon Brando - Jack Nicholson: *Missouri*

Jack Nicholson - Meryl Streep: *Ironweed*

Humphrey Bogart - Eddie Albert: *The Wagons Roll at Night [Los carros ruedan de noche]*

Karl Malden - Allison Cane: *Loca*

Maximilian Schell - Meryl Streep: *Julia*

XVI. TEJIENDO LA RED

¹ M. Castells, *The Internet Galaxy: Reflections on the Internet, Business, and Society*, Oxford University Press, 2001.

² G. Cardoso, *Para una sociología do ciberespaço: comunidades virtuais em português*, Oeiras (Portugal), Celta Editora, 1998, p. 116.

³ W. Shakespeare, *Othello*, 1602-1604, acto III, escena IV, v. 69.

⁴ I. Irving, citado en E. Wasserman, "Feds take steps against threat of cyber terrorism", CNN, 25 de septiembre de 1998, <<http://www.cnn.com/TECH/computing/9809/25/cyberterrorism.idg>>.

⁵ T. Hobbes, *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, capítulo XXIX, p. 353.

⁶ Castells, p. 1.

⁷ *Ibid.*, p. 36.

⁸ *Ibid.*, p. 282.

⁹ S. Dalzell. Citado en J. Naughton, *A Brief History of the Future*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 1999, pp. 190-191. Véase también <www-epic.org/cda/cad_dc_opinion.html>.

¹⁰ *Ibid.*, p. 192.

¹¹ T. Berners-Lee, "Information management: A proposal", CERN Internal Report, mayo de 1990, p. 9. Véase también <www.w3.org/History/1989/proposal.html>.

¹² FBI Definitions, 28 Code of Federal Regulations Section 0.85.

¹³ A.-L. Barabási, "We're all on the Grid together", *New York Times*, 16 de agosto de 2003.

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ A.-L. Barabási; conversación personal en 2002.

¹⁶ W. B. Arthur, S. N. Durlauf y D. A. Lane, *The Economy as a Complex Evolving System*, Maryland, Addison-Wesley, 1997, vol. II, p. 9.

XVII. ORDEN EN EL EDÉN

¹ W. Temple, "An essay upon the origin and nature of government", *Works*, 1751, vol. I, p. 99. Citado en la introducción a T. Hobbes (1651), *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, p. 61.

² J. Locke, *Essay on Civil Government* (segundo *Treatise on Government*). En *Two Treatises of Government*, Londres, J. M. Dent, 1993, p. 118.

³ I. Hay, *The First Hundred Thousand*, Londres, William Blackwood, 1916, pp. 224-225.

⁴ S. Freud, *Civilization and its Discontents*, Londres, Hogarth Press, 1973, pp. 32-33. [Traducción al español: *El malestar en la cultura*, Madrid, Alianza, 1998.]

⁵ J. Locke, segundo *Treatise on Government*. En *Two Treatises of Government*, Cambridge University Press, 1970, p. 433.

⁶ K. Popper, *The Lesson of This Century*, Londres, Routledge, 1997, p. 35. [Traducción al español: *La lección de este siglo*, Buenos Aires, Temas Grupo Editorial, 1998.]

⁷ S. Freud, p. 60.

⁸ J. Locke, p. 124.

⁹ *Ibid.*, p. 117.

¹⁰ *Ibid.*, p. 124.

¹¹ A. A. Cooper, *Characteristics of Men, Manners, Opinions, Times*, Londres, Wyatt, vol. II, p. 67. Reeditado en Oxford, por Clarendon Press, en 1999.

¹² Génesis, 9: 6.

¹³ J. Locke, p. 178.

¹⁴ J. S. Mill, *On Liberty*, Londres, Penguin, 1985, p. 68.

¹⁵ J. S. Mill, "Utilitarianism", en J. S. Mill y J. Bentham, *Utilitarianism and Other Essays*, Londres, Penguin, 1987, p. 278.

¹⁶ J. J. Rousseau, "Discourse on inequality", citado en B. Russell, *A History of Western Philosophy*, Londres, Unwin Paperbacks, 1984, p. 663.

¹⁷ C. Darwin, *Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*, Londres, John Murray, 1874, p. 64.

¹⁸ T. Hobbes, *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, capítulo 51.

¹⁹ E. Kant, *Perpetual Peace*.

²⁰ R. Kagan, "Power and weakness", *Policy Review*, junio/julio 2002, p. 113.

²¹ E. Hobsbawm, *Age of Extremes*, Londres, Abacus, 1994, pp. 24-26.

²² G. Dagle, *Stand to Arms*, Londres, Wells Gardner, Darton & Co., 1916, p. 74.

²³ *Ibid.*, p. 74.

²⁴ T. Ashworth, *Trench Warfare 1914-1918: The Live and Let Live System*, Nueva York, Holmes & Meier, 1980, p. 144.

²⁵ Hobbes, p. 190.

²⁶ *Ibid.*

²⁷ R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, Nueva York, Basic Books, 1984, p. 124.

²⁸ K. Popper, p. 70.

²⁹ Oración fúnebre de Pericles relatada por Tucídides en *Historia de la guerra del Peloponeso*, libro II. La paráfrasis es de Popper, p. 72.

³⁰ K. Popper, pp. 36-37.

XVIII. LA VICTORIA DE PAVLOV

¹ N. Maquiavelo, *The Prince*, trad. de L. G. Bull, Londres, Penguin, 1981, cap. XV, p. 91.

² K. N. Waltz, *Man, the State, and War*, Nueva York, Columbia University Press, 1954, p. 108.

³ K. Popper, "Reflections on the theory and practice of the democratic state", charla ofrecida en Munich el 9 de junio de 1988 y reproducida en *The Lesson of This Century*, Londres, Routledge, 1997, p. 79.

⁴ Deuteronomio, 19:19-21.

⁵ M. A. Nowak y K. Sigmund, "Tit for tat in heterogeneous populations", *Nature*, núm. 355, 1992, pp. 250-253.

⁶ E. Burke, "Thoughts on the causes of the present discontents". Citado en M. J. Hinich y M. C. Munger, *Analytical Politics*, Cambridge University Press, 1997, p. 136.

⁷ K. Popper, p. 4.

⁸ *Ibid.*, p. 55.

⁹ H. Kahn, *Thinking About the Unthinkable in the 1980s*, Nueva York, Simon & Schuster, 1984, p. 59.

¹⁰ B. Skyrms, *Evolution of the Social Contract*, Cambridge University Press, 1996, p. 24.

¹¹ Citado en N. Sheehan y E. W. Kenworthy (eds.), *Pentagon Papers*, Nueva York, Time Books, 1971, p. 432.

¹² K. Sigmund, *Games of Life*, Londres, Penguin, 1995, p. 191.

¹³ R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*, Nueva York, Basic Books, 1984, p. 184.

¹⁴ D. Jones. Citado por F. Goodall, *A Question of Conscience*, Stroud, Sutton Publishing Group, 1997, p. 198.

¹⁵ C. Davies. Citado en Goodall, p. 199.

¹⁶ K. Popper, p. 91.

XIX. ¿HACIA UTOPIA?

¹ R. W. Emerson, *The Conduct of Life*, Londres, J. M. Dent & Sons, 1908, p. 176.

² G. Lundberg, *Foundations of Sociology*, Londres, Macmillan. En R. Bierstedt (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959, p. 518.

³ H. Simon, *The Sciences of the Artificial*, Massachussets, MIT Press, 1996, p. 139.

⁴ J. Barnes, *A History of the World in ten and a Half Chapters*, Londres, Jonathan Cape, 1989.

⁵ J. Carey (ed.), *The Faber Book of Utopias*, Londres, Faber & Faber, p. xii.

⁶ Citado en F. A. Hayek, *The Road to Serfdom*, Londres, Routledge, 1962, p. 18.

⁷ J. S. Mill, *A System of Logic*, libro 6. En Bierstedt, p. 205.

⁸ G. Simmel, en *The Sociology of Georg Simmel*, ed. y trad. de H. Wolf, Illinois, Free Press, 1950.

⁹ R. E. Park, "Human nature and collective behavior", *American Journal of Sociology*, núm. 32, 1927, p. 733.

¹⁰ A. Smith, *An Inquiry in the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, versión resumida, L. Dickey (ed.), Indianápolis, Hackett Publishing Co., 1993, p. 11.

¹¹ B. Mandeville, *The Fable of the Bees*, Londres. Citado en B. Willey, *The Eighteenth Century Background*, Nueva York, Columbia University Press, 1940, p. 96.

¹² J. Swift, "A modest proposal for preventing the children of poor people in Ireland from being a burden to their parents or country and for making them beneficial to the public". En H. Hayward (ed.), *Selected Prose Works of Jonathan Swift*, Londres, Cresset Press, 1949, p. 430.

¹³ L. Mumford, *The Culture of Cities*, Londres, Secker & Warburg, 1938, p. 93.

¹⁴ J. S. Mill, *Logic*. En Bierstedt, p. 203.

¹⁵ A. Ferguson, *Institutes of Moral Philosophy*, 1766. Citado en G. Bryson, *Man and Society*, Princeton University Press, 1945, p. 35.

¹⁶ A. Ferguson. *An Essay on the History of Civil Society*, Edinburgh University Press, 1966, p. 122.

¹⁷ R. W. Emerson, "On politics", en *The Essays of Ralph Waldo Emerson*, Londres, Grant Richards, 1903, p. 325.

¹⁸ K. Marx, *Theses on Feuerbach*, 1845, núm. 11. (Publicado y editado por F. Engels, como apéndice a F. Engels, *Ludwig Feuerbach und der Ausgang der klassischen deutschen Philosophie*, Stuttgart, J. H. W. Dietz, 1988.)

¹⁹ P. Ormerod, *Butterfly Economics*, Londres, Faber & Faber, 1998, p. 182.

²⁰ R. Olson, *Science Deified and Science Defied*, California, University of California Press, 1990, vol. 2, pp. 210-211.

²¹ Cicerón, *De Legibus*. En Bierstedt, p. 41.

²² Aristóteles, *Politics*, trad. De W. D. Ross. En Bierstedt, p. 24.

²³ Tomás de Aquino, *On the Governance of Rulers*, trad. de G. B. Phelan. En Bierstedt, p. 52.

²⁴ *Ibid.*, p. 53.

²⁵ T. Hobbes, *Leviathan*, Londres, Penguin, 1985, p. 185.

²⁶ Smith, p. 130.

²⁷ F. von Hayek, *The Road to Serfdom*, 1962, p. 27.

²⁸ *Ibid.*, p. 14.

²⁹ T. C. Schelling, *Micromotives And Macrobehavior*, Nueva York, W. W. Norton, 1978, pp. 127-128.

³⁰ *Ibid.*, p. 19.

³¹ K. Malik, "Natural science", *Prospect*, agosto-septiembre 2000, p. 37.

³² J. S. Mill, *Logic*. En Bierstedt, p. 209.

³³ F. Giddings, *The Scientific Study of Human Society*, 1924. En Bierstedt, p. 362.

BIBLIOGRAFÍA

- Abul-Magd, A. Y., "Wealth distribution in an ancient Egyptian society", *Physical Review E*, núm. 66, 2002, 057104.
- Adamic, L., "The Small World Web", borrador, Xerox Palo Alto Research Center, 1999, <<http://www.hpl.hp.com/shl/papers/smallworld/smallworldpaper.html>>.
- Alberich, R., J. Miro-Juliá y F. Rosselló, "Marvel Universe looks almost like a real social network", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0202174>>.
- Albert, R. y A.-L. Barabási, "Topology of evolving networks: Local events and universality", *Physical Review Letters*, núm. 85, 2000, pp. 5-234-5-237.
- , "Statistical mechanics of complex networks", *Reviews of Modern Physics*, núm. 74, 2002, pp. 47-97.
- Albert, R., H. Jeong, y A.-L. Barabási, "Diameter of the World-Wide Web", *Nature*, núm. 401, 1999, pp. 130-131.
- , "Error and attack tolerance of complex networks", *Nature*, núm. 406, 2000, pp. 378-382.
- Allingham, L., *Choice Theory: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2002.
- Allsop, V., *Understanding Economics*, Londres, Routledge, 1995.
- Amaral, L. A. N., A. Scala, M. Barthélémy y H. E. Stanley, "Classes of small-world networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 97, 2000, pp. 11-149-11-152.
- Anderson, P. W., K. J. Arrow y D. Pines (eds.), *The Economy as an Evolving Complex System*, California, Addison-Wesley, 1988.
- Andersson, C., A. Hellervik, K. Lindgren, A. Hagson y J. Tornberg, "The urban economy as a scale-free network", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0303535>>.
- Anghel, M., M. Toroczkai, K. E. Bassler y G. Korniss, "Competition in social networks: Emergence of a scale-free leadership structure and collective efficiency", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0307740>>.
- Arthur, W. B., "Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events", *Economic Journal*, núm. 99, 1989, pp. 116-131.
- , "Inductive reasoning and bounded rationality (the El Farol problem)", *American Economic Review*, núm. 84, 1994, pp. 406-411.
- , "Complexity and the economy", *Science*, núm. 284, 1999, pp. 107-109.
- Arthur, W. B., S. N. Durlauf y D. A. Lane, *The Economy as a Complex Evolving System II*, Massachusetts, Addison-Wesley, 1997.
- Aubrey, J., *Brief Lives*, ed. de J. Buchanan-Brown, Londres, Penguin, 2000.
- Avery, J., *Progress, Poverty and Population*. Londres, Frank Cass, 1997.
- Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, Nueva York, Basic Books, 1984. [Traducción al español: *La evolución de la cooperación* (trad. de Luis Bou), Madrid, Alianza, 1996.]

- , “The dissemination of culture”, *Journal of Conflict Resolution*, núm. 41, 1997, pp. 203-226.
- , “Advancing the art of simulation in the social sciences”, en R. Conte, R. Hegselmann y P. Terna (eds.), *Simulating Social Phenomena*, Berlín, Springer-Verlag, 1997, pp. 21-40.
- , “On six advances in cooperation theory”, *Analyse and Kritik*, núm. 22, 2000, pp. 130-151.
- Axelrod, R. y D. S. Bennett, “A landscape theory of aggregation”, *British Journal of Political Science*, núm. 23, 1993, pp. 211-233.
- Axelrod, R., W. Mitchell, R. E. Thomas, D. S. Bennett y E. Bruderer, “Coalition formation in standard-setting alliances”, *Management Science*, núm. 41, 1995, pp. 1.493-1.508.
- Axtell, R., “The emergence of firms in a population of agents: local increasing returns, unstable Nash equilibria, and power law size distributions”, Washington DC., Brookings Institution, documento de trabajo núm. 3, 1999.
- , “Zipf distribution of U.S. firm sizes”, *Science*, núm. 293, 2001, pp. 1818-1820.
- Axtell, R., R. Axelrod, J. M. Epstein y M. D. Cohen, “Aligning simulation models: A case study and results”, *Computational and Mathematical Organization Theory*, núm. 1, 1996, pp. 123-141.
- Bak, P., *How Nature Works*. Oxford University Press, 1997.
- Bak, P., K. Chen y M. Creutz, “Self-organized criticality in the ‘Game of Life’”, *Nature*, núm. 342, pp. 780-781.
- Ball, P., *The Self-Made Tapestry*, Oxford University Press, 1998.
- , “Jams tomorrow”, *New Scientist*, núm. 15, enero de 2002, pp. 34-38.
- , “The physical modeling of society: A historical perspective”, *Physica A*, núm. 314, pp. 1-14.
- Bankes, R. C., “Agent-based modeling: A revolution?”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2002, pp. 7.199-7.200.
- Barabási, A.-L., “The physics of the Web”, *Physics World*, julio de 2002, p. 33.
- , *Linked*, Cambridge, Perseus, 2002.
- Barabási, A.-L. y R. Albert, “Emergence of scaling in random networks”, *Science*, núm. 286, 1999, pp. 509-512.
- Barabási, A.-L., R. Albert y H. Jeong, “Mean-field theory for scale-free random networks”, *Physica A*, núm. 272, 1999, pp. 173-187.
- Batten, D. F., *Discovering Artificial Economics*, Colorado, Westview Press, 2000.
- Batty, M., “Predicting where we walk”, *Nature*, núm. 388, 1997, pp. 19-20.
- , “Agent-based pedestrian modelling”. En P. Longley y Batty, M., (eds.), *Advanced Spatial Analysis*, capítulo V, Londres, ESRI Press, 2003.
- , “The emergence of cities: Complexity and urban dynamics”, borrador, 2003.
- Batty, M., J. Desyllas y E. Duxbury, “Safety in numbers? Modelling crowds and designing control for the Notting Hill Carnival”, *Urban Studies*, núm. 40, 2003, pp. 573-590.
- Batty, M. y Longley, P., *Fractal Cities*, Londres, Academic Press, 1994.
- Becker, G. S., “Crime and punishment: An economic approach”, *Journal of Political Economy*, núm. 76, 1968, pp. 443-478.
- , *A Treatise on the Family*, Massachusetts, Harvard University Press. [Traducción al español: *Tratado sobre la familia* (trad. de Carlos Peralta de Grado), Madrid, Alianza Editorial, 1986.]
- Bentley, W. A. y W. J. Humphreys, *Snow Crystals*, Nueva York, McGraw-Hill Book Co., 1931; reimpresso en 1962 por Dover.
- Bernardes, A.T., D. Stauffer y J. Kertész, “Election results and the Sznajd model on the Barabási network”, 2001, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0111147>>.
- Berry, B. J. L., L. D. Kiel y V. Elliott, “Adaptive agents, intelligence, and emergent human organization: Capturing complexity through agent-based modeling”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2001, pp. 7.187-7.188.
- Bicchieri, C., R. Jeffrey y B. Skyrms, *The Logic of Strategy*, Oxford University Press, 1999.
- Bierstedt, R. (ed.), *The Making of Society*, Nueva York, Random House, 1959.
- Boorstin, D. J., *The Discoverers*, Nueva York, Vintage Books, 1985. [Traducción al español: *Los descubridores* (trad. de Susana Lijtmaer), Barcelona, Crítica, 2005.]
- Borland, L., “Option pricing formulas based on a non-gaussian stock price model”, *Physical Review Letters*, núm. 89, 2002, 098701.
- Bouchard, J.-P., P. Cizeau, L. Laloux y M. Potters, “Mutual attractions: Physics and finance”, *Physics World*, enero de 1999, p. 25.
- Bouchard, J.-P. y M. Mézard, “Wealth condensation in a simple model of economy”, *Physica A*, núm. 282, 2000, pp. 536-545.
- Brams, S. J., *Game Theory and Politics*, Nueva York, Free Press, 1975.
- , *The Presidential Election Game*, Connecticut, Yale University Press, 1978.
- Brown, L. R., *Eco-Economy*, Londres, Earthscan, 2001. [Traducción al español: *Ecoeconomía* (trad. de Mireia Bofill), Barcelona, Editorial Hacer, 2004.]
- Buchanan, M., *Ubiquity*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2000.
- , “That’s the way the money goes”, *New Scientist*, 19 de agosto de 2000, pp. 22-26.
- , *Small World*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2002.
- Burda, Z., D. Johnston, J. Jurkiewicz, M. Kamiriski, M. A. Nowak, G. Papp, y I. Zahed, “Wealth condensation in Pareto macroeconomies”, *Physical Review E*, núm. 65, 2002, 026102.
- Camazine, S., J.-L. Deneubourg, N. R. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz y E. Bonabeau, *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, 2001.
- Campbell, M. y P. Ormerod, “Social interaction and the dynamics of crime”, borrador.
- Capocci, A., G. Caldarelli, R. Marchetti y L. Pietronero, “Growing dynamics of Internet providers”, *Physical Review E*, núm. 64, 2001, 035105.
- Carvalho, R. y A. Penn, “Scaling and universality in the microstructure of urban space”, 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0305164>>.
- Castellano, C., M. Marsili y A. Vespignani, “Nonequilibrium phase transition in a model for social influence”, *Physical Review Letters*, núm. 85, 2000, pp. 3.536-3.539.
- Castells, M., *The Internet Galaxy: Reflections on the Internet, Business, and Society*, Oxford University Press, 2001.
- Cercignani, C., *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms*, Oxford University Press, 1998.
- Challet, D., M. Marsili y G. Ottino, “Shedding light on El Farol”, 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0306445>>.
- Challet, D., M. Marsili y Y.-C. Zhang, “Modeling market mechanism with minority game”, 1999, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/9909265>>.

- Challet, D. y Y.-C. Zhang, "Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game", *Physica A*, núm. 246, 1997, pp. 407-418.
- Chen, D. D. T., "Smart growth", *Scientific American*, diciembre de 2000, pp. 85-91.
- Cohen, D., "All the world's a net", *New Scientist*, abril de 2002, pp. 24-29.
- Cohen, M. C., R. L. Riolo y R. Axelrod, "The role of social structure in the maintenance of cooperative regimes", *Rationality and Society*, núm. 13, 2000, pp. 5-32.
- Cohen, R., K. Erez, B. Ben-Avraham y S. Havlin, "Resilience of the Internet to random breakdowns", *Physical Review Letters*, núm. 85, 2000, pp. 4.626-4.628.
- Collins, J. J. y C. C. Chow, "It's a small world", *Nature*, núm. 393, 1998, pp. 409-410.
- Conte, R., "Modelling economic randomness: Statistical mechanics of market phenomena", en M. T. Batchelor y L. T. Wille (eds.), *Statistical Physics on the Eve of the 21st Century: The James B. McGuire Festschrift*, Singapur, World Scientific, 1999, pp. 47-64.
- , "Statistical properties of financial time series", conferencia pronunciada en el Simposio sobre Matemática Financiera, Universidad de Fudan, Shanghai, 10-24 de agosto de 1999.
- Conte, R., "Agent-based modeling for understanding social intelligence", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2002, pp. 7.189-7.190.
- Conte, R., y J.-P. Bouchard, "Herd behavior and aggregate fluctuations in financial markets", *Macroeconomic Dynamics*, núm. 4, 2000, pp. 170-196.
- Conte, R., M. Potters y J.-P. Bouchard, "Scaling in stock market data: Stable laws and beyond", en B. Dubrulle, F. Graner y D. Sornette (eds.), *Scale Invariance and Beyond*, actas del Taller sobre Invariancia de Escala del Centre National de la Recherche Scientifique, Les Houches, Berlin, Springer-Verlag, 1997.
- Costa Filho, R. N., M. P. Almeida, J. S. Andrade (hijo) y J. E. Moreira, "Scaling behavior in a proportional voting process", *Physical Review E*, núm. 60, 1999, pp. 1067-1068.
- Cramer, F., *Chaos and Order*, Weinheim, VCH, 1993.
- Csányi, F. y B. Szendrői, "Structure of a large social network", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0305580>>.
- Cuniberti, G., A. Valleriani y J. L. Vega, "Effects of regulation on a self-organized market", 2001, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0108533>>.
- Czirók, A., A.-L. Barabási y T. Vicsek, "Collective motion of self-propelled particles: kinetic phase transition in one dimension", *Physical Review Letters*, núm. 82, 1999, pp. 209-212.
- Czirók, A., M. Vicsek y T. Vicsek, "Collective motions of organisms in three dimensions", *Physica A*, núm. 264, 1999, pp. 299-304.
- Czirók, A., y T. Vicsek, "Collective motion". En D. Reguera, M. Rubi y J. Vilar (eds.), *Statistical Mechanics of Biocomplexity*, ponencias del XV Congreso Sitges, volumen 527, Berlín, Springer-Verlag, 1999, pp. 152-164.
- , "Collective behavior of interacting self-propelled particles", *Physica A*, núm. 281, 2000, pp. 17-29.
- David, P. A., "Path-dependence and predictability in dynamical systems with local network externalities: A paradigm for historical economics". En D. Foray, y C. Freeman (eds.), *Technology and Wealth of Nations: The Dynamics of Constructed Advantage*, Londres, Pinter, 1993.
- Davidson, J., H. Ebel y S. Bornholdt, "Emergence of a small world from local interactions: Modelling acquaintance networks", *Physical Review Letters*, núm. 88, 2002, 128701.
- Davidson, C., "E-immune from attack", *New Scientist*, 31 de marzo de 2001, pp. 35-37.
- De Fabritiis, G., F. Pammolli y M. Riccaboni, "On size and growth of business firms", *Physica A*, núm. 324, 2003, pp. 38-44.
- Dezso, Z. y A.-L. Barabási, "Can we stop the aids epidemic?", *Physical Review E*, núm. 65, 2001, 055103(R).
- Dodds, P. S., R. Muhamad y D. J. Watts, "An experimental study of search in global social networks", *Science*, núm. 301, 2003, pp. 827-829.
- Dorogovtsev, S. N. y J. F. F. Mendes, "Evolution of networks with aging of sites", *Physical Review E*, núm. 62, 2000, pp. 1.842-1.845.
- Ebel, H., L.-I. Mielsch y S. Bornholdt, "Scale-free topology of e-mail networks", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0201476>>.
- Eguíluz, V. M. y K. Klemm, "Epidemic threshold in structured scale-free networks", *Physical Review Letters*, núm. 89, 2000, 108701.
- Eguíluz, V. M. y M. G. Zimmermann, "Transmission of information and herd behavior: An application to financial markets", *Physical Review Letters*, núm. 85, 2000, pp. 5.659-5.662.
- Emerson, R. W., "The conduct of life", 1860. En *The Conduct of Life and Other Essays*, Londres, J. M. Dent, 1908.
- Epstein, J. M., "Learning to be thoughtless: social norms and individual computation", *Computational Economics*, núm. 18(i), 2001, pp. 9-24.
- Epstein, J. M. y R. Axtell, *Growing Artificial Societies: Social Science From the Bottom*, Washington DC, Brookings Institution Press, 1996.
- Eriksen, K. A., I. Simonsen, S. Maslov y K. Sneppen, "Modularity and extreme edges of the Internet", *Physical Review Letters*, núm. 90, 2003, 148701.
- Farkas, I., D. Helbing y T. Vicsek, "Mexican waves in an excitable medium", *Nature*, núm. 419, 2002, pp. 131-132.
- Farmer, D., "Physicists attempt to scale the ivory towers of finance", *Computing in Science and Engineering*, noviembre-diciembre de 1999, pp. 26-39.
- Fehr, E. y S. Gächter, "Altruistic punishment in humans", *Nature*, núm. 415, 2002, pp. 137-140.
- Ferguson, N. (ed.), *Virtual History*, Londres, Picador, 1997.
- Florian, R. y S. Galam, "Optimizing conflicts in the formation of strategic alliances", *European Physical Journal B*, núm. 16, 2000, pp. 189-194.
- Föllmer, H., "Random economies with many interacting agents", *Journal of Mathematical Economics*, núm. 1, 1974, pp. 51-62.
- Frank, T., "Talking bull", *Guardian*, suplemento de fin de semana, 17 de agosto de 2002, p. 21.
- Freud, S., *Civilization and its Discontents*, trad. de J. Riviere, Londres, Hogarth Press, 1973. [Traducción al español: *El malestar de la cultura* (trad. de Ramón Rey Ardid), Madrid, Alianza, 1998.]
- Gauthier, D., *The Logic of Leviathan*, Oxford, Clarendon Press, 1969.
- Giardina, I. y J.-P. Bouchard, "Bubbles, crashes and intermittency in agent-based market models", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0206222>>.

- Gimblett, R., C. A. Roberts, T. C. Daniel, M. Ratliff, M. J. Meitner, S. Cherry, D. Stallman, R. Bogle, R. Allred, D. Kilbourne y J. Bieri, "An intelligent agent-based model for simulating and evaluating river trip scenarios along the Colorado River in Grand Canyon National Park", en H. R. Gimblett (ed.), *Integrating GIS and Agent Based Modeling Techniques for Understanding Social and Ecological Processes*, Oxford University Press, 2000, pp. 245-275.
- Gladwell, M., *The Tipping Point*, Londres, Abacus, 2001.
- Glance, N. S. y B. A. Huberman, "The dynamics of social dilemmas", *Scientific American*, marzo de 1994, pp. 76-81.
- Gleiser, P. M. y L. Danon, "Community structure in jazz", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0307434>>.
- Goldsmith, E. y J. Mander (eds.), *The Case Against the Global Economy and for a Turn Towards Localization*, Londres, Earthscan Publications, 2001.
- Gopikrishnan, P., V. Plerou, L. A. Nunes Amaral, M. Meyer y H. E. Stanley, "Scaling of the distribution of fluctuations of financial market indices", *Physical Review E*, núm. 60, 1999, pp. 5.305-5.316.
- Granovetter, M., "The strength of weak ties", *American Journal of Sociology*, núm. 78, 1973, pp. 1.360-1380.
- , "Ignorance, knowledge, and outcomes in a small world", *Science*, núm. 301, 2003, pp. 73-74.
- Guare, J., *Six Degrees of Separation: A Play*, Nueva York, Vintage, 1990.
- Handy, C., *Understanding Organizations*, Londres, Penguin, 1993.
- Harman, P. M., *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*, Cambridge University Press, 1998.
- Hayek, F. A., *The Road to Serfdom*, Londres, Routledge, 1962. [Traducción al español: *Camino de servidumbre* (trad. de José Vergara Doncel), Madrid, Editorial de Derecho Reunidas, 1950.]
- Hayes, B., "Statistics of deadly quarrels", *Computing Science*, enero-febrero de 2002.
- Helbing, D., "A mathematical model for the behavior of individuals in a social field", *Journal of Mathematical Sociology*, núm. 19, 1994, pp. 189-219.
- , "A stochastic behavioral model and a 'microscopic' foundation of evolutionary game theory", *Theory and Decision*, núm. 40, 1996, pp. 149-179.
- , "Traffic and related self-driven inany-particle systems", *Reviews of Modern Physics*, núm. 73, 2001, pp. 1.067-1.141.
- Helbing, D., I. Farkas y T. Vicsek, "Simulating dynamical features of escape panic", *Nature*, núm. 396, 2000, pp. 487-490.
- Helbing, D., A. Hennecke y M. Treiber, "Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities", *Physical Review Letters*, núm. 82, 1999, pp. 4.360-4.363.
- Helbing, D. y B. A. Huberman, "Coherent moving states in highway traffic", *Nature*, núm. 296, 1998, pp. 738-740.
- Helbing, D., J. Keltsch y P. Molnar, "Modelling the evolution of human trail systems", *Nature*, núm. 388, 1997, pp. 47-49.
- Helbing, D. y P. Molnar, "Social force model for pedestrian dynamics", *Physical Review E*, núm. 51, 1995, pp. 4.282-4.286.
- Helbing, D., P. Molnar, I. J. Farkas y K. Bolay, "Self-organizing pedestrian movement", *Environment and Planning B: Planning and Design*, núm. 28, 2001, pp. 361-383.
- Helbing, D. y M. Schreckenberg, "Celular automata simulating experimental properties of traffic flow", *Physical Review E*, núm. 59, 2001, R2.505-2.508.
- Helbing, D. y T. Vicsek, "Optimal self-organization", *New Journal of Physics*, núm. 1, 1999, 13.1-13.7.
- Henderson, L. F., "The statistics of crowd fluids", *Nature*, núm. 229, 1971, pp. 381-383.
- Hillier, B. y J. Hanson, *The Social Logic of Space*, Cambridge University Press, 1984.
- Hinich, M. J. y M. C. Munger, *Analytical Politics*, Cambridge University Press, 1997. [Traducción al español: *Teoría analítica de la política* (trad. de Gabriela Ventureira), Barcelona, Gedisa, 2003.]
- Hobbes, T. (1651), *Leviathan*, edición de C. B. Macpherson, Londres, Penguin, 1985. [Traducción al español: *Leviatán, o la materia, forma y poder de una república eclesiástica y civil*, México, Fondo de Cultura Económica, 1940.]
- Hobsbawm, E., *Age of Extremes*, Londres, Abacus, 1995. [Traducción al español: *Historia del siglo XX*, Barcelona, Crítica, 1998.]
- Hod, S. y E. Nakar, "Self-segregation versus clustering in the evolutionary minority game", *Physical Review Letters*, núm. 88, 2002, 238702.
- Huang, Z.-F. y S. Solomon, "Finite market size as a source of extreme wealth inequality and market instability", *Physica A*, núm. 294, 2001, pp. 503-513.
- Huberman, B. A. y L. A. Adamic, "Growth dynamics of the World Wide Web", *Nature*, núm. 401, 1999, p. 131.
- Huberman, B. A. y R. M. Lukose, "Social dilemmas and Internet congestion", *Science*, núm. 277, 1997, pp. 535-537.
- Jencks, C., *The Architecture of the Dumping Universe*, Londres, Academic Editions, 1995.
- Jeong, H., B. Tombor, R. Albert, Z. N. Oltvai y A.-L. Barabási, "The large-scale organization of metabolic networks", *Nature*, núm. 407, 2000, pp. 651-654.
- Kagan, R., "Power and weakness", *Policy Review*, núm. 113, junio-julio de 2002, <<http://www.hoover.org/publications/policyreview/3460246.html>>.
- Keen, S., *Debunking Economics: The Naked Emperor of the Social Sciences*, Sydney y Londres, Pluto Press y Zed Books, 2001.
- , "Standing on the toes of pygmies: Why econophysics must be careful of the economic foundations on which it builds", *Physica A*, núm. 324, 2003, pp. 108-116.
- Keen, S., J. Legge, G. Fishburn y R. Standish, "Aggregation problems in the non-interactive equilibrium theory of markets", borrador, 2003.
- Kerner, B. S., "Experimental features of self-organization in traffic flow", *Physical Review Letters*, núm. 81, 1998, pp. 3.797-3.800.
- , "The physics of traffic", *Physics World*, agosto de 1999, pp. 25-30.
- , "Control of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0309017>>.
- Kerner, B. S., S. L. Klenov y D. E. Wolf, "Cellular automata approach to three-phase traffic theory", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0206370>>.

- Kerner, B. S. y H. Rehborn, "Experimental features and characteristics of traffic jams", *Physical Review E*, núm. 53, 1996, R1.297-R1.300.
- , "Experimental properties of phase transitions in traffic flow", *Physical Review Letters*, núm. 79, 1997, pp. 4.030-4.033.
- Kirchner, A. y A. Schadschneider, "Simulation of evacuation processes using a bio-nics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0203461>>.
- Kirman, A., "Some observations on interactions in economics", documento presentado en el Taller de Cambio Estructural, Manchester Metropolitan University, 20-21 de mayo de 1996. Se puede consultar en <<http://cfpm.org/pub/workshop/kirman.html>>.
- , "Economies with interacting agents", documento de trabajo 94-05-030, Nuevo México, Santa Fe Institute, 1994.
- Klemm, K. y V. M. Eguíluz, "Growing scale-free networks with small-world behavior", *Physical Review E*, núm. 65, 2002, 057102.
- Klemm, K. y V. M. Eguíluz, R. Toral y M. San Miguel, "Global culture: A noise induced transition in finite systems", 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0205188>>.
- Knospe, W., L. Santen, A. Schadschneider y M. Schreckenberg, "Human behaviour as the origin of traffic phases", *Physical Review E*, núm. 65, 2001, 015101.
- Krugman, P., *Peddling Prosperity*, New York, W. W. Norton, 1994. [Traducción al español: *Vendiendo prosperidad* (trad. de Ester Rabasco), Barcelona, Ariel, 1994.]
- , *The Self-Organizing Economy*, Oxford, Blackwell, 1996. [Traducción al español: *La organización espontánea de la economía*, Barcelona, Bosch, 1998.]
- Kurtz, S., "The future of 'history'", *Policy Review*, núm. 113, junio-julio 2002, <<http://www.hoover.org/publications/policyreview/3449176.html>>.
- Laloux, L., M. Potters, R. Cont, J.-P. Aguilar y J.-P. Bouchard, "Are financial crashes predictable?", *Europhysics Letters*, núm. 45, 1999, pp. 1-5.
- Landauer, R., "Inadequacy of entropy and entropy derivatives in characterizing the steady state", *Physical Review A*, núm. 12, 1975, pp. 636-638.
- Latora, V. y M. Marchioro, "Efficient behaviour of small-world networks", *Physical Review Letters*, núm. 87, 2001, 198701.
- Lawrence, S. y C. L. Giles, "Searching the World Wide Web", *Science*, núm. 280, 1998, pp. 98-100.
- LeBaron, B., "Short-memory traders and their impact on group learning in financial markets", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2002, pp. 7.201-7.206.
- Lee, H. Y., H.-W. Lee y D. Kim, "Phase diagram of congested traffic flow: An empirical study", *Physical Review E*, núm. 62, 2000, pp. 4.737-4.741.
- Lewin, R., *Complexity*, Nueva York, Macmillan, 1992. [Traducción al español: *Complejidad* (trad. de Juan Gabriel López Guix), Barcelona, Tusquets, 1995.]
- Li, W. y X. Cai, "Statistical analysis of airport network of China", 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0309236>>.
- Liljeros, F., C. R. Edling, L. A. Nuñez Amaral, H. E. Stanley y Y. Åberg, "The web of human sexual contacts", *Nature*, núm. 411, 2001, pp. 907-908.
- Lillo, F. y R. N. Mantegna, "Variety and volatility in financial markets", *Physical Review E*, núm. 62, 2000, pp. 6.126-6.134.
- , "Symmetry alteration of ensemble return distribution in crash and rally days of financial markets", *European Physical Journal B*, núm. 15, 2000, pp. 603-606.
- Litan, R. E. y A. N. Rivlin, "The economy and the Internet: What lies ahead?", informe núm. 4, Brookings Institution, Washington DC.
- Locke, J., *Two Treatises of Government* (1689), edición de M. Goldie, Londres, J. M. Dent, 1993. [Traducción al español: *Dos ensayos sobre el gobierno civil*, Barcelona, Planeta-De Agostini, 1996.]
- Lombardo, M. P., "Mutual restraint in tree swallows: A test of the TIT FOR TAT model of reciprocity", *Science*, núm. 227, 1985, pp. 1.363-1.365.
- Louzoun, Y., S. Solomon, J. Goldenberg y D. Mazursky, "The risk at being unfair: World-size global markets lead to economic instability", borrador, 2002.
- Lübeck, S., M. Schreckenberg y K. D. Usadel, "Density fluctuations and phase transition in the Nagel-Schreckenberg traffic flow model", *Physical Review E*, núm. 57, 1998, pp. 1.171-1.174.
- Lux, T. y M. Marchesi, "Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market", *Nature*, núm. 397, 1999, pp. 498-500.
- Makse, H. A., J. S. Andrade (hijo), M. Batty, S. Havlin y H. E. Stanley, "Modelling urban growth patterns with correlated percolation", *Physical Review E*, núm. 58, 1998, pp. 7.054-7.062.
- Makse, H. A., S. Havlin y H. E. Stanley, "Modelling urban growth patterns", *Nature*, núm. 377, 1998, pp. 608-612.
- Mandelbrot, B., "The variation of certain speculative prices", *Journal of Business*, núm. 35, 1963, pp. 394-419.
- , *The Fractal Geometry of Nature*, Nueva York, W. H. Freeman, 1977. [Traducción al español: *La geometría fractal de la naturaleza*, Barcelona, Tusquets, 1997.]
- , "A multifractal walk down Wall Street" *Scientific American*, febrero de 1999, pp. 70-73.
- Mantegna, R. N. y H. E. Stanley, "Scaling behaviour in the dynamics of an economic index", *Nature*, núm. 376, 1995, pp. 46-49.
- , "Turbulence and financial markets", *Nature*, núm. 383, 1996, pp. 587-588.
- , *An Introduction to Econophysics*, Cambridge University Press, 1999.
- Mathias, N. y V. Gopal, "Small worlds: How and why", *Physical Review E*, núm. 63, 2001, 021117.
- Matthews, R., "Get connected", *New Scientist*, 4 de diciembre de 1999, pp. 24-28.
- May, R., "More evolution of cooperation", *Nature*, núm. 327, 1987, pp. 15-17.
- May, R. M. y A. L. Lloyd, "Infection dynamics on scale-free networks", *Physical Review E*, núm. 64, 2001, 066112.
- Mikhailov, A. S. y D. H. Zanette, "Noise-induced breakdown of coherent collective motion in swarms", *Physical Review E*, núm. 60, 1999, pp. 4.571-4.575.
- Milgram, S., "The small world problem", *Psychology Today*, núm. 2, 1967, pp. 60-67.
- Milinski, M., "TIT FOR TAT in sticklebacks and the evolution of cooperation", *Nature*, núm. 325, 1987, pp. 433-435.

- Mill, J. S. (1859), *On Liberty*, ed. de G. Himmelfarb, Londres, Penguin, 1985. [Traducción al español: *Sobre la libertad*, Madrid, Alianza, 1996.]
- , *System of Logic*. Longman, Green, Reader & Dyer, Londres, 1872.
- Mill, J. S. y J. Bentham, *Utilitarianism and Other Essays*, ed. de A. Ryan. Londres, Penguin, 1987.
- Mitzenmacher, M., “A brief history of generative models for power law and lognormal distributions”, borrador, Harvard University, 2003.
- Moore, C. y M. E. J. Newman, “Epidemics and percolation in small world networks”, *Physical Review E*, núm. 61, 2000, pp. 5.678-5.682.
- More, T., *Utopia*. Londres, Everyman’s Library, 1992. [Traducción al español: *Moro, Campanella, Bacon. Utopías del Renacimiento*, México, Fondo de Cultura Económica, 1941.]
- Mossa, S., M. Barthélémy, H. E. Stanley y L. A. Nuñez Amaral, “Truncation of power law behavior in ‘scale-free’ network models due to information filtering”, *Physical Review Letters*, núm. 88, 2002, 138701.
- Muchnik, L. y S. Solomon, “Statistical mechanics of conventional traders may lead to non-conventional market behaviour”, borrador, 2003.
- Mumford, L., *The Culture of Cities*, Londres, Secker & Warburg, 1938.
- Naughton, J., *A Brief History of the Future*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 1999.
- Néda, Z., E. Ravasz, Y. Brechet, T. Vicsek y A.-L. Barabási, “Self-organizing processes: ‘The sound of many hands clapping’”, *Nature*, núm. 403, 2000, pp. 849-850.
- Neubert, L., L. Santen, A. Schadschneider y M. Schreckenberg, “Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis”, *Physical Review E*, núm. 60, 1999, pp. 6.480-6.490.
- Newman, M. E. J., “Models of the small world: A review”, 2000, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0001118>>.
- , “Ego-centred networks and the ripple effect”, 2001, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0111070>>.
- , “The structure of scientific collaboration networks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 98, 2001, pp. 404-409.
- Newman, M. E. J., S. Forrest y J. Balthrop, “Email networks and the spread of computer viruses”, *Physical Review E*, núm. 66, 2002, 035101.
- Newman, M. E. J. y J. Park, “Why social networks are different from other types of networks”, borrador, 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0305612>>.
- Nowak, M. y R. M. May, “Evolutionary games and spatial chaos”, *Nature*, núm. 359, 1992, pp. 826-829.
- , “The spatial dilemmas of evolution”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, núm. 3, 1993, pp. 35-78.
- Nowak, M., R. M. May y K. Sigmund, “The arithmetics of mutual help”, *Scientific American*, junio de 1999, pp. 50-55.
- Nowak, M. y K. Sigmund, “TIT FOR TAT in heterogeneous populations”, *Nature*, núm. 355, 1993, pp. 250-253.
- , “Chaos and the evolution of cooperation”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 90, 1993, pp. 5.091-5.094.
- , “A strategy of win-stay, lose-shift that outperforms tit-for-tat in the Prisoner’s Dilemma game”, *Nature*, núm. 364, 1993, pp. 56-58.
- Nussbaum, L., *The Triumph of Science and Reason 1660-1685*, Nueva York, Harper & Row, 1965.
- Olson, R., *Science Defied and Science Defied*, vol. 2, University of California Press, California, 1990.
- Ormerod, P., *Butterfly Economics*, Londres, Faber & Faber, 1998.
- , “The Keynesian micro-foundations of the business cycle: Some implications of globalisation”, borrador, 2000.
- , “The US business cycle: Power law scaling for interacting units with complex internal structure”, *Physica A*, núm. 314, 2002, pp. 774-785.
- , “Sense on segregation”, *Prospect*, febrero de 2002, pp. 12-14.
- Ormerod, P. y M. Campbell, “The evolution of family structures in a social context”, borrador, 2000.
- Parrish, J. K. y L. Edelstein-Keshet, “Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation”, *Science*, núm. 284, 1999, pp. 99-101.
- Pastor-Satorras, R. y A. Vespignani, “Epidemic spreading in scale-free networks”, *Physical Review Letters*, núm. 86, 2001, pp. 3.200-3.203.
- , “Immunization of complex networks”, 2001, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0107066>>.
- Pérez, J., G. Tapang, M. Lim y C. Saloma, “Streaming, disruptive interference y power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians”, *Physica A*, núm. 312, 2002, pp. 609-618.
- Peterson, I., “The shapes of cities”, *Science News*, núm. 149, 1996, pp. 8-9.
- , “The Gods of Sugarscape”, *Science News*, 23 de noviembre de 1996, p. 332.
- Plerou, V., P. Gopikrishnan, L. A. Nuñez Amaral, M. Meyer y H. E. Stanley, “Scaling of the distribution of price fluctuations of individual companies”, *Physical Review E*, núm. 643, 1999, pp. 6.519-6.529.
- Popper, K., *The Lesson of this Century*, Londres, Routledge, 1997. [Traducción al español: *La lección de este siglo*, Buenos Aires, Temas Grupo Editorial, 1998.]
- Porter, R., *Enlightenment*, Londres, Penguin, 2000.
- Porter, T. M., *The Rise of Statistical Thinking 1820-1900*. Princeton University Press, 1986.
- Potters, M., R. Cont y J.-P. Bouchard, “Financial markets as adaptive ecosystems”, *Europhysics Letters*, núm. 41, 1998, pp. 239-244.
- Potts, W. K., “The chorus-line hypothesis of manoeuvre coordination in avian flocks”, *Nature*, núm. 309, 1984, pp. 344-345.
- Prigogine, I., *From Being to Becoming*, Nueva York, W. H. Freeman, 1981.
- Ravasz, E. y A.-L. Barabási, “Hierarchical organization in complex networks”, 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0206130>>.
- Rawcliffe, C., *Medicine and Society in Later Medieval England*, Londres, Sandpiper, 1999.
- Read, D., “A multitrajectory, competition model of emergent complexity in human social organization”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2002, pp. 7.251-7.256.
- Reynolds, C. W., *Boids*, 1995, <<http://www.red3d.com/cwr/boids>>, última actualización: 6 de septiembre de 2001.

- , “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”, *Computer Graphics*, núm. 21(4), 1987, pp. 25-34.
- Richardson, L. F., *Statistics of Deadly Quarrels*, ed. de Q. Wright y C. C. Lienau, Pittsburgh, Boxwood Press, 1960.
- Roberts, C. A., D. Stallman y J. A. Bieri, “Modeling complex human-environment interactions: The Grand Canyon river trip simulator”, *Journal of Ecological Modelling*, núm. 153, 2002, pp. 181-196.
- Rowlinson, J. S. (ed.), *J. D. van der Waals: On the Continuity of the Gaseous and Liquid States*. *Studies in Statistical Mechanics* XIV, Ámsterdam, North-Holland, 1988.
- Russell, B., *A History of Western Philosophy*, Londres, Unwin Paperbacks, 1984. [Traducción al español: *Historia de la filosofía occidental*, Pozuelo de Alarcón, Espasa Calpe, 1984.]
- Saloma, C., G. J. Pérez, G. Tapang, M. Lim y C. Palmes-Saloma, “Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic”, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 100, 2003, pp. 11.947-11.952.
- Schechter, B., “Birds of a feather”, *New Scientist*, 23 de enero de 1999, p. 30-33.
- Schelling, T. C., *Micromotives and Macrobehavior*. Nueva York, W. W. Norton, 1978.
- Schneewind, J. B. (ed.), *Moral Philosophy from Montaigne to Kant*, Vol. II. Cambridge University Press, 1990.
- Schweitzer, F. (ed.), *Modelling Complexity in Economic and Social Systems*, Singapur, World Scientific, 2002.
- Sen, P., S. Dasgupta, A. Chatterjee, P. A. Sreeram, G. Mukherjee y S. S. Manna, “Small-world properties of the Indian Railway network”, 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0208535>>.
- Serrano, M. A. y M. Boguñá, “Topology of the world trade web”, *Physical Review E*, núm. 68, 2003, 015101(R).
- Shvetsov, V. y D. Helbing, “Macroscopic dynamics of multilane traffic”, *Physical Review E*, núm. 59, 1999, pp. 6.328-6.339.
- Sigmund, K., *Games of Life*, Oxford University Press, 1993.
- Sigmund, K., E. Fehr y M. A. Nowak, “The economics of fair play”, *Scientific American*, enero de 2002, pp. 82-87.
- Simon, H. A., *The Sciences of the Artificial* (3ª ed.), Massachusetts, MIT Press, 1996.
- Skyrms, B., *Evolution of the Social Contract*, Cambridge University Press, 1996.
- Smith, A., *An Inquiry into the Nature y Causes of the Wealth of Nations*, 1776, edición de L. Dickey, Indianápolis, Hackett Publishing, 1993. [Traducción al español: *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones*, México, Fondo de Cultura Económica, 1958.]
- Solomon, S., “Behaviorally realistic simulations of stock market traders with a soul”, *Computer Physics Communications*, núm. 121-122, 1999, p. 161.
- Sornette, D., *Why Stock Markets Crash*, Princeton University Press, 2003.
- , “Critical market crashes”, 2003, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0301543>>.
- Soros, G., *George Soros on Globalization*, Nueva York, Perseus, 2002. [Traducción al español: *Globalización*, Barcelona, Planeta, 2002.]
- Stanley, M. H. R., L. A. N. Amaral, S. V. Buldyrev, S. Havlin, H. Leschhorn, P. Maass, M. A. Salinger y H. E. Stanley, “Scaling behaviour in the growth of companies”, *Nature*, núm. 379, 1996, pp. 804-806.
- Stix, G., “A calculus of risk”, *Scientific American*, mayo de 1998, pp. 92-97.
- Sutton, J., “Gibrat’s legacy”, *Journal of Economic Literature*, núm. 35, 1997, pp. 40-59.
- Sznajd-Weron, K. y R. Weron, “How effective is advertising in duopoly markets?”, 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0211058>>.
- Thompson, D’A., *On Growth and Form: A New Edition*, Cambridge University Press, reimpresso por Dover, Nueva York, 1992.
- Tjaden, B. y G. Wasson, “The Oracle of Bacon at Virginia”, 1997, <<http://www.cs.virginia.edu/oracle/>>.
- Toner, J. y Y. Hu, “Flocks, herds, y schools: A quantitative theory of flocking”, *Physical Review E*, núm. 58, 1998, pp. 4.828-4.858.
- , “Long-range order in a two-dimensional dynamical XY model: How birds fly together”, *Physical Review Letters*, núm. 75, 1995, pp. 4.326-4.329.
- Treiber, M. y D. Helbing, “Microsimulations of freeway traffic including control measures”, 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0210096>>.
- Treiber, M., A. Hennecke y D. Helbing, “Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations”, *Physical Review E*, núm. 62, 2000, pp. 1.805-1.824.
- Tuck, R., *Thomas Hobbes: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, 2002.
- Vicsek, T., A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen y O. Shochet, “Novel type of phase transition in a system of self-driven particles”, *Physical Review Letters*, núm. 75, 1995, pp. 1.226-1.229.
- Vines, S., *Market Panic*, Londres, Profile, 2003.
- Waldrop, M. M., *Complexity*, Londres, Penguin, 1994.
- Waltz, K. N., *Man, the State, and War*, Nueva York, Columbia University Press, 1954.
- Ward, M., *Universality*, Londres, Macmillan, 2001.
- Watts, D. J., *Small Worlds*, Princeton University Press, 1999.
- Watts, D. J., P. S. Dodds y M. Newman, “Identity and search in local networks”, *Science*, núm. 296, 2002, pp. 1.302-1.305.
- Watts, D. J. y S. H. Strogatz, “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”, *Nature*, núm. 393, 1998, pp. 440-442.
- Weidlich, W., *Sociodynamics: A Systematic Approach to Modelling in the Social Sciences*, Ámsterdam, Harwood Academic, 2000.
- Wilkinson, G. S., “Reciprocal food sharing in the vampire bat”, *Nature*, núm. 308, 2000, pp. 181-184.
- Wilson, D. O., *Consilience*, Nueva York, Alfred A. Knopf, 1998.
- Winch, P., *The Idea of a Social Science and its Relation to Philosophy*, Londres, Routledge, 1958.
- Wolf, D., “Cellular automata for traffic simulations”, *Physica A*, núm. 263, 1999, pp. 438-451.
- Wu, J. y R. Axelrod, “How to cope with noise in the iterated Prisoner’s Dilemma”, *Journal of Conflict Resolution*, núm. 39, 1995, 1995, pp. 183-189.

- Wyart, M. y J.-P. Bouchard, "Statistical models for company growth", borrador, 2002, <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0210479>>.
- Yang, I., H. Jeong, B. Kahng y A.-L. Barabási, "Emerging behavior in electronic bidding", *Physical Review E*, núm. 68, 2003, 016102.
- Yook, S.-H., H. Jeong, y A.-L. Barabási, "Modeling the Internet's large-scale topology", *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, núm. 99, 2002, p. 13382-13386.
- Zhou, W.-X. y D. Sornette, "2000-2003 real estate bubble in the UK but not in the USA", *Physica A*, núm. 329, 2003, pp. 249-263.
- Zipf, G. K., *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, Nueva York, Hafner, 1965.

AGRADECIMIENTOS

Mientras escribía este libro han sido muchas las veces que me he sentido igual que si estuviera trabajando en equipo, por lo que estoy impaciente por atribuir algunos de los méritos (al tiempo que, por supuesto, soy responsable de todos sus fallos). Por sus sabias, perspicaces y tolerantes sugerencias y consejos y por proporcionarme material y referencias, estoy en deuda con muchas personas que son verdaderas expertas en la materia, en particular Robert Axelrod, Robert Axtell, Albert-László Barabási, Eshel Ben-Jacob, Rama Cont, Dirk Helbing, Steve Keen, Thomas Lux, Mitsugu Matsushita, Joe McCauley, Mark Newman, Paul Ormerod, Craig Reynolds, Sorin Solomon, Gene Stanley, Alessandro Vespignani y Tamás Vicsek. El apoyo de mis editores, Ravi Mirchandani, Caroline Knight y John Glusman, ha sido vital, y gracias al esmero y atención de John Woodruff, corrector del libro, hemos limado muchas de las aristas del texto. Me han alentado, como siempre, el buen juicio de Peter Robinson, mi agente, y el respaldo de Julia, mi esposa.

PHILIP BALL
Londres, octubre 2003

CRÉDITOS FOTOGRÁFICOS

- 1.1. Portada del *Leviatán*, de Hobbes, 1651, Londres; © Bettman/CORBIS
- 2.1. Grabado de James Clerk Maxwell a partir de una fotografía de Fergus; © CORBIS.
- 3.1. Alphonse Quetelet; cortesía de AKG Images.
- 5.1. (a) Manuel Velarde, Universidad Complutense, Madrid. (b) Tomado de M. C. Cross y P. Hohenberg, *Reviews of Modern Physics*, núm. 65, 1993, pp. 851-1112. (c) David Cannell, Universidad de California en Santa Barbara.
- 5.3. Mitsugu Matsushita, Universidad de Chuo.
- 5.4. Fotografías de Mitsugu Matsushita.
- 5.5. Tomado de W. A. Bentley y W.J. Humphreys, *Snow Crystals*, 1931, reimpresso en Nueva York, Dover, 1962.
- 5.6, 6.1. Eshel Ben-Jacob, Universidad de Tel-Aviv.
- 6.2. (b) Norbert Wu.
- 6.3. Tamás Vicsek, Universidad de Eötvös-Loránd.
- 6.8, 6.9. Dirk Helbing, Universidad Tecnológica de Dresden.
- 6.11, 6.12. Michael Batty, University College London.
- 6.13. Hernán Makse, City University, Nueva York.
- 6.14. Rui Carvalho y Alan Penn, University College London.
- 7.3, 7.4. Tomado de D. E. Wolf, *Physica A*, núm. 263, 1999, pp. 438-451.
- 10.1. Alastair Bruce, Universidad de Edinburgo.
- 13.2, 13.3. Tomado de J. M. Epstein, *Computational Economics*, núm. 18, vol. 1, 2001, pp. 9-24.
- 13.4. Paul Ormerod, Volterra Consulting.
- 16.3. Hawoong Jeong, Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea.
- 16.4. Cortesía de Hawoong Jeong.
- 16.6. Hawoong Jeong.
- 16.8. Albert-Laszlo Barbási, Universidad de Notre-Dame.
- 18.5. (a), (b) Martin Nowak, Universidad de Oxford. (c) Tomado de M. A. Nowak y R. M. May, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, núm. 3, vol. 1, 1993, pp. 35-78.

ÍNDICE DE NOMBRES Y MATERIAS

- abejas 51-53, 146, 154, 532-533
Achenwall, Gottfried 67
Ackroyd, Peter: *London: The Biography* 176, 556
Adamic, Lada 451, 567, 573
ADL, véase agregación por difusión limitada
africanas, naciones 408
agar, gel 134-135, 143
agentes comerciales, mercado de valores 236, 244, 248, 251-252, 255-257; pronosticadores y fundamentalistas 252, 257, 258, 262
agentes, modelos basados en 285, 307ss, 394-396, 413
agregación por difusión limitada (ADL) 133-135, 146, 151, 178, 180
Aguilar, Jean-Pierre 268, 276, 278
ajedrez 328-330, 335, 410, 490, 514
Akerlof, George 250
Alberich, Ricardo 464
Albert, Eddie 415-416, 423-424, 434
Albert, Réka 447-448, 450-452, 459, 463-464, 467-468
Alberto, príncipe consorte de Inglaterra 92
aleatoriedad 47, 53-54, 55, 58, 67, 72, 75-78, 83, 94, 111, 128-129, 131, 152-153
alianzas 343-347, 410; y guerra 339
Amaral, Luis Nuñez 462
America Online (AOL) 443, 452
amistades, véase redes sociales
Anaxágoras 45
Anderson, Philip 267, 290
Andrews, Thomas 102
aplauso 547-548
Aquino, Tomás de: *Sobre el gobierno de los príncipes* 540
Aristóteles 23, 44, 45, 61, 154, 359, 540
Aritmética política (Petty) 9-11, 13, 64, 534-535
ARPANET (ARPA, *Advanced Research Projects Agency* [Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada]) 442-444
Arrow, Kenneth 360-361
Arthur, W. Brian 242, 260-261, 322; el problema de El Farol 390-392
Ashworth, Tony: *Trench Warfare 1914-1918* 488
Asimov, Isaac: *El sol desnudo* 429
asistencia, cifras de 391-392
astronomía/astrónomos 46, 74-75; véase también universo
AT&T 323-324
atascos 113, 161, 185-187, 196-197, 200-201, 203, 204, 207-209, 439, 531, 539
Atenas 182, 183, 321, 477, 499
atomista, física 45
Aubrey, John: *Brief Lives* 22
Ausloos, Marcel 276, 278
autómata 24-25, 40, 46; autómata celular 149-152, 190, 203, 207
aves: comportamiento colectivo 147
Axelrod, Robert; *The Evolution of Cooperation* 498, 505-506, 523; teoría paisajística (con D. S. Bennett) 324, 326, 332-337, 344, 346, 357;
Axtell, Robert 304, 306; modelo de crecimiento empresarial 307-310, 312-318; véase también Epstein, Joshua

- Babbage, Charles 89
 Bacon, Francis 21, 45, 63; *New Atlantis* 28-29
 Bacon, Kevin 415-416, 418, 423-424, 432-434
 Bacon, número de/juego película-actor 423-424, 427, 432-434, 463, 464, 468
 bacterianas (*Bacillus*) colonias 134-135, 137-138, 142; autómatas 151-153
 Bachelier, Louis 227-229, 231-232, 234
 Bak, Per 280-286, 290
 Bangkok 182
 Barabási, Albert-László 447, 459, 469, 547; (con Albert) 463, 464, 466-468; (con Albert y Jeong) 452, 457-458
 Baran, Paul 444-446, 454
 Barcelona 182
 Barnes, Julian: *A History of the World in 10 and a Half Chapters* 528
 Barrett, William 107
 Batty, Michael 165, 173-174, 178-179
 Beck, Harry: plano del metro de Londres 424
 Becker, Gary 397; *A Treatise Oil the Family* 405-9, 413
 Bellamy, Edward: *Looking Backward* 529
 Bénard, Henri 126-128, 136
 Ben-Jacob, Eshel 142-143, 151
 Bennett, D. Scott véase Axelrod, Robert
 Bentham, Jeremy: *Felicit Calculus* 38-39, 79, 217, 309
 Bentley, Wilson A. y Humphreys, W. J.: *Snow Crystals* 121, 137
 Berlín 178, 181, 369
 Berners-Lee, Tim 442-443, 448
 Bernoulli, Daniel 45, 50, 104
 Bernoulli, Jacob 76
 bifurcaciones en desequilibrio 130-131
 Biham, Ofer 207
 Bismarck, Otto von 361
 Black, Duncan 357
 Black, Fischer 238
 Black-Scholes, modelo de 238-239
 bloques de pisos 167
 Bogart, Humphrey 415-416, 424
 boides (Reynolds) 148, 150-152, 158
 Bolay, Kai 159
 Boltzmann, Ludwig 57-59, 62, 85, 87, 97, 100, 117, 120, 155-156, 243; "Beethoven en el Cielo" 61
 Borda, Jean Charles de 360
 Borges, Jorge Luis: "El jardín de los senderos que se bifurcan" 129, 341
 Bornholdt, Stefan 461
 Boscovich, Roger Joseph: *A Theory of Natural Philosophy* 45
 Boston, Massachusetts 168, 180
 Bouchard, Jean-Philippe 239, 292
 Boulding, Kenneth 241
 Boyle, Robert 47, 51
 Brahe, Tycho 10
 Brando, Marlon 424, 434
 Brasil, sistema electoral de 353, 355
 Brecon, Gales 295-297, 318
 Brinton, Thomas, obispo de Rochester 36
 Brock, William 254
 Brown, Robert / movimiento browniano 55, 133, 227
 Buccleuch, duque de 71
 Buckle, Henry Thomas; *History of Civilization in England* 80-85, 92-93
 Buchanan, Mark: *Ubiquity* 287-288
 Burda, Zdzislaw 264
 Burke, Edmund; *Reflections on the Revolution in France* 72, 263, 517
 Bush, George W. 350-351
 Cagniard de la Tour, Charles, barón 102
 Campbell, Michael 375-377, 386, 388
 campo molecular, teoría del 254-255, 274-275
 Candolle, Alphonse de 90
 Cantillon, Richard: *Essai sur la nature du commerce en général* 536
 caos, teoría del 12-13, 227, 285, 423
 capilaridad, teoría de 103
 capitalismo 38, 167, 218, 264, 297, 299-300, 304, 529
 Cardiff 179
 Cardoso, Gustavo 437
 Carey, John 529
 Carlos I de Inglaterra 16-17, 22, 26, 65, 477, 538
 Carlos II de Inglaterra 17-18, 27, 36-37, 65
 Carlyle, Thomas 242
 Carnot, Nicolas Sadi 47-48; "ciclo de Carnot" 48, 50
 carteles 302-303
 Carvalho, Rui 182
 Castells, Manuel: *The Internet Galaxy* 437, 439-441
 catástrofes, teoría de las (Thom) 12, 101
 censos 66, 85, CERN 442-443
 ciberterrorismo 439, 456-457, 460
 Cicerón: *De legibus* 540
 ciclo económico de las empresas, teoría del véase empresas y compañías
 ciclo económico real, teoría del 248, 257, 260
 ciclos económicos 221, 223, 227, 262; véase también real
 ciudades véase urbano, crecimiento; urbana, planificación
 Clark, Wesley 445-446
 Clausius, Rudolph 49, 51, 57, 85-86, 94, 120
 Clinton, Bill 445, 500
 Coase, Ronald 310
 Cobb, G. Belton: *Stand to Arms* 486, 496
 Coconut Grove, club nocturno de Boston, 168
 Cohen, Michael 412
 comercio 10, 176, 211-217, 242, 263, 296, 298, 400, 410, 446, 465, 532, 536-537; véase también empresas y compañías; agentes bursátiles, mercado de valores
 complejidad, teoría de la 12, 150
 Comte, Auguste 72, 74, 81, 342, 538; *Cours de philosophie positive* 72
 Condorcet, Marie-Jean-Antoine-Nicolas Caritat de 67-71, 88, 359-360, 538; *Esbozo de un cuadro histórico de los progresos del espíritu humano* 68-69; *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix* 68
 conducta colectiva 116, 175, 304, 368
 conformidad, véase convenciones sociales
 congelación 100, 106, 108-109, 113, 123-124, 193-194, 196, 272, 378, 379
 Contrarreforma 18-19
 contrato social 34, 36, 38, 474, 478, 480
 convección, modelos de 126-128, 130, 131, 136
 convenciones sociales 63, 362
 Conway, John Horton: Juego de la vida 149-150
 cooperación 14, 33, 144, 303, 410-411, 481-482, 485, 488, 491-496, 498-499, 501-502, 505-506, 508-514, 516-519, 521, 523-525; véase también alianzas
 Cootner, Paul 231
 Copérnico, Nicolás 19
 copos de nieve 120-121, 124, 137-138, 142, 325, 517
Cornhill Magazine 92
 Costa Filho, Raimundo 353-354
 Cotgrove, Stephen: *The Science of Society* 15
 Cournot, Antoine Augustin 88
 crackers 456
 crecimiento urbano 176-177, 180, 530
 criticalidad autoorganizada (CAR) 280, 282-284, 290, 353, 449 y la economía 284-286; y la historia 286-288
 críticos, exponentes 270-271, 273, 275
 cromodinámica cuántica 116
 Cromwell, Oliver 16-18, 37, 65, 335, 528
 culturas 397-400; difusión de las 400-404 véase también segregación racial; véase también difusión cultural, modelos de

- Curie, Pierre 107, 254; punto de Curie 112-116, 130-131, 194, 271-272, 274; modelo Curie-Weiss 254; *véase también* campo molecular
- curvas en campana 114, 156
- Cyples, William 92
- Czirók, András 151-152
- Challet, Damien, y Yi-Cheng Zhang: juego de las minorías 392-393
- Charles, Jacques 51
- Chen, Donald 177
- Chen, Kan 285
- Churchill, Winston 338, 340
- D'Alembert, Jean Le Rond 68
- Dalzell, juez Stewart 441-442
- Dallas, Texas 188, 207
- darwinismo 39, 87, 481
- Darwin, Charles 66, 69, 86-87, 122, 184, 480-481, 507-508, 512; *El origen del hombre* 86; *El origen de las especies* 86
- Davenant, Charles 263
- Davies, Cecil 524
- Dean, James 416
- decisión, teoría de la 360
- decisiones 39, 146, 184, 247, 250-251, 291, 311, 314, 334, 361, 364-366, 368, 375, 382, 385, 398, 410, 508, 530, 533
- decisiones, toma de 14, 68, 94, 155, 187, 249, 250, 260, 265, 271, 349-355, 357, 361-363, 386, 390-394, 396, 535; interdependencia de las 356; *véase también* decisiones
- Defoe, Daniel 214
- delincuencia y delincuentes 373-380, 386-387; Internet 457
- democracias 20, 36-37, 39, 350-352, 483, 503, 541
- Demócrito 45
- Denver, Colorado 185
- derecho divino de los reyes 19, 477, 480, 535
- deriva cultural 406
- derivados, transacciones de 238-239
- Desagulier, Jean Théophile: *The Newtonian System of the World* 71
- Descartes, René 19, 22, 25, 27, 45
- descomposición dieléctrica, modelo de (MDD) 179
- desequilibrio, estados de *véase* equilibrio, estados de
- determinismo 46, 59, 77, 91-92, 95, 130, 384, 538
- Devonshire, conde de 21
- Dezso, Zoltan 463
- Dhaka 182
- diagramas de fase 135-136, 204
- diagramas morfológicos 135-136, 142, 204
- Dickens, Charles 82, 176
- Dictyostelium discoideum* (moho del limo) 144
- difusión 54-56
- difusión cultural, modelo de 400-408, 412; y el torneo del dilema del prisionero 516
- diggers* 18, 528
- dilema del prisionero, el 490-493, 507, 509, 512, 514; y Ojo por ojo (OPO) 494, 500-501; y cooperación 495-497
- Disraeli, Benjamin 83
- distribución de la riqueza 264, 289-292, 410-411, 467, 539
- distribución de probabilidades 75-77, 181-183, 229, 231-233, 258, 279-282, 284, 304-305, 308; y pautas de voto 353-361; y la World Wide Web 447-452
- distribución normal 75
- distribuciones sin escala 465
- divergencias 269-271
- Dostoyevski, Fiódor 92-93, 374; *Crimen y castigo* 374; *Apuntes del subsuelo* 92
- Dow, Charles 223
- Downs, Anthony 375
- Dresher, Melvin 489-490
- Dugas, Gaetan 422
- Duisburgo 188, 202, 207
- Durkheim, Émile: *Revue philosophique* 415
- Durlauf, Steven 254
- economía 211-213, 241, 535-536; economía de libre mercado 212-213, 261-266, 540-545; fundamentos 246-249; e interacción 253-256, 263-264; e Internet 438, 447; fluctuaciones del mercado y crisis 220-227, 227-240, 246-248, 257-261, 276-279; e índices matrimoniales 381-390; y el juego de las minorías 305, 390-394; y la física 214-216, 227, 242-243, 253-254; y la racionalidad y la irracionalidad 249-253, 260-261; recesiones 219-220, 221, 261-262; y la criticalidad autoorganizada 284-285; teorías y modelos 69-70, 215-216, 223-224, 227-232, 237-240, 242-256, 257-258, 263-264, 267-268, 535-536; *véase también* ciclos económicos; capitalismo; Keynes, John Maynard; Smith, Adam; y agentes del mercado bursátil, distribución del ingreso, econofísica/econofísicos 214-215, 470
- Edelstein-Keshet, Leah 146
- Eden, M. 134
- Edgeworth, Francis 217, 242-244, 246, 252 *Mathematical Psychics* 217, 242
- Ehrenfest, Paul 62
- Eindhoven 182
- Einstein, Albert 43, 54, 55, 227, 248, 417
- elecciones/sistemas electorales 349-352, 353-357
- electrodeposición 133-134
- Elephant and Castle, Londres 166
- Elliot, Ralph 223
- emergencia 150
- Emerson, Ralph Waldo 31; *The Conduct of Life* 99, 214-215, 241, 527; "Destino" 83; "De la política" 531
- empresas y compañías 298-299; y competencia 300-302, 321-324; acciones judiciales 499; índice de crecimiento/tamaños 297-298, 303-312; fusiones y alianzas 320, 323-326, 332-333; monopolios 301, 302; oligopolios 301-303; y producción 300; y beneficios 301, 303, 316-317; motivos de fracaso 315-316; interacción con los trabajadores 317-318
- empresas, *véase* empresas y compañías
- energía 49-50, 53, 124
- energía, paisajes de 327-328, 330-332, 338-339
- Engels, Friedrich: *Comunista Manifiesto* 220, 528
- entropía 49, 57-59, 95, 97, 130, 121, 124-125, 128, 336
- Epicuro 45
- epidemiología 460-462
- Epstein, Joshua 349, 367 (con Robert Axtell) *Growing Artificial Societies/Sugarscape*, modelo de 263, 265, 361-366, 371, 409-412
- equilibrio y desequilibrio, estados de 120-131, 137, 139, 154, 154, 179-180; *véase también* Nash
- equilibrio de
- Erdős, Paul 423; números de Erdős 417; (con Rényi) 425-426, 455, 466
- error, curvas de 75-78, 80, 85, 228
- estadística 53, 55-56, 61-62, 66-67, 81-92, 96-97
- estadísticas demográficas 62-68
- estadística gaussiana 76, 229-234, 248, 290-291
- Euclides: *Elements of Geometry* 21, 88
- eugenesia 87, 529, 544
- Euler, Leonhard 417n

- Fama, Eugene 233
 Farkas, Illés 158, 169-170
 Farr, William 89
 fatalismo 90, 92, 95
 Fehr, Ernst 501
 Ferguson, Adam 538, 540
 Ferguson, Niall: *Virtual History* 341-342
 Fibonacci, secuencia de 223-224
 Filmer, Robert: *Patriarcha* 447
 Fisher, Irving 215, 224, 227
 física estadística 52, 55, 117-118, 215
 física, y economía 213-216, 227, 242, 244-245, 253-255, 268; y sociedad 11-14, 20-21, 39-41, 59, 62-63, 529-531, 534-535, 537-540, 543-545
 Flood, Merrill 489-490
 Florian, Razvan 334n
 fluidos 272; véanse también puntos críticos; transiciones de fase; Waals, Johannes van der; densidad 104-105, 112
 Flynn, Errol 416
 Föllmer, Hans 254
 Fontenelle, Bernard: *Entretiens sur la pluralité des Mondes*, 15
 Fourier, Joseph 78
 Fox, J. J. 88
 fractales 132-134, 138-139, 179, 231, 235, 288n
 Freud, Sigmund, *El malestar en la cultura*, 474-475
 función de correlación 237
 futuros 238
- Gächter, Simon 501
 Galam, Serge 334n
 Galileo Galilei 19, 23, 44-45, 72
 Galton, Francis; *Hereditary Genius* 87
 gases, teoría cinética de los 51, 55-57, 85-86, 100, 102-104, 155, 228
 Gassendi, Pierre 27, 45
 Gauthier, David 498
 Gauss, Carl Friedrich 75
- Gay-Lussac, Joseph Louis 51
 Geller, Uri 63
 General Motors (Warren, Michigan) 190, 315
 geometría 21-22, 36, 88, 123, 288
 George, Susan 397
 Gibbs, Josiah Willard 123-125, 130, 185, 243, 387-388; *Elementary Principles in Statistical Mechanics* 120
 Gibrat, Robert: *Inegalités économiques* 304-307, 313
 Giddings, Franklin: *The Scientific Study of Human Society* 544-545
 Gilday, Cindy 397
 Gladwell, Malcolm: *El punto clave* 101, 268, 349, 380-381
 gobierno monárquico 17-19, 36, 477, 498
 gobierno(s) 26-27, 69-71, 80, 82, 473-480, 482-484, 497, 499-500, 503, 532-533, 540-542; y la economía 261-262, 264-266; véase también democracias; gobierno monárquico
 Goethe, Johann Wolfgang von 211
 Goodstein, David: *States of Matter* 62
 Gopal, Venkatesh 470
 grafos 423; ordenados 426; aleatorios 423-427, 447, 453, 466; y recableado aleatorio 430-432; relacionales 423-426
 Granovetter, Mark 419
 Graunt, John 65, 67, *Observaciones sobre los datos de mortalidad* 64
 Graves, Robert: *Adiós a todo eso* 487
 gregarismo 172, 253, 256-257, 356n, 394
 Grocio, Hugo: *Leyes de la guerra y de la paz* 29, 32
 Guare, John: *Six Degrees of Separation* 421
 guerra civil inglesa 16, 18, 27, 211, 477, 528
 guerra de los Treinta Años 18, 65
 Guerra Fría 444, 476, 491, 502, 505, 520, 522, 525
- guerras 65-66, 70, 91, 287-289, 319, 346, 359-360, 399-401, 411, 473-474, 483, 484, 503, 519; véanse también guerra civil inglesa, guerras mundiales
 guerras mundiales; Primera 288, 488, 496; Segunda 222, 288, 335-336, 339, 490, 513, 523
 Guillermo III 9
 gusano nematodo 457, 458
 Gutenberg, Beno 283, ley de Gutenberg-Richter 288
- hackers* y *crackers* 456n
 Haldane, J. B. S. 295
 Hales, Stephen: *Vegetable Staticks* 119
 Halley, Edmond 74
 Hamilton, William 289
 Handy, Charles: *Understanding Organizations* 295
 Hanson, Julianne 166-167, 182
 Hare, Maurice Evan 93
 Harrington, James: *Oceana* 211
 Havlin, Shlomo 180
 Hay, Ian: *The First Hundred Thousand* 473
 Hayek, Friedrich von: *Camino de servidumbre* 541-543, calor, teorías sobre el 46-47, 50; véase termodinámica, capacidad calórica
 Hegel, Friedrich 507
 Heilbroner, Robert: *The Worldly Philosophers* 213, 241, 243-245
 Hein, Piet: *Grooks* 43
 Heisenberg, Werner 97, 417; incertidumbre, principio de 97
 Helbing, Dirk 156-159, 162-166, 170, 172, 190, 202-209, 245
 helio 115-116, 270
 Helmholtz, Hermann von 50, 95
 Henderson, L. F. 154-156
 Hennecke, Ansgar 203-204
 Heráclito 121
 Herapath, John 50
 Herschel, John 61, 80, 85, 102
 Hillier, Bill 166-167, 182
- Hillsborough, desastre de 168
 hipevínculos 443, 447-449, 451, 466
 Hirn, Gustave-Adolphe 104
 histeresis 196, 200
 historia 80-82, 92-94, 341-343, 346, 397-398
 Hitler, Adolf 110, 336, 340-341, 543
 Hobbes, Thomas 13, 22-25, 29-32, 154, 157, 474-475, 477-478, 482-483, 497-498, 435-437, 541, 545; *Behemoth* 38; *De cive* 26-27; *Leviatán* 15-21, 32-38, 63-64, 211-213, 438; *Philosophical Rudiments Concerning Government and Society* 24, 26
 Hobsbawm, Eric: *Historia del siglo XX* 319, 338, 484
 Hod, Shahar 395-396
 Hölderlin, Friedrich 530
 Hollar, Wenceslas 36
 hombre medio, teoría del (Quetelet) 79, 290
 Hong Kong 182, 433; Hang Seng, índice 235, 277
 Hopkinson, John 107
 Hopper, Dennis 434
 hormigas 146, 151, 154
 Horney, Karen 157
Household Words (boletín) 82
 Houston, Texas 186
 html (Hypertext Markup Language) 159, 448-449
 Huang, Zhi-Fen 292
 Huberman, Bernardo 207-208, 451
 humanismo 18, 30
 Humboldt, Wilhelm von: *Ideas para una definición de los límites de la acción del Estado* 479
 Hume, David 37; *Tratado de la naturaleza humana* 71
 Hunt, Frederick 82
 Huxley, Aldous: *Un mundo feliz* 529
 Huxley, Julian 529

- IBM 324, 334
 idiomas 398-401
 Iglesia católica 19, 216, 383, 505
 Ilustración 19, 38, 44, 66, 68, 71-72, 213-214, 289, 293, 474, 484, 534, 536-537
 imposibilidad, teorema de la (Arrow) 360
 incendios forestales 268, 283
 informática 150, 323-324, 326, 333, 347, 393, 438, 444, 489, 494, 543; y ciberterrorismo 439, 455-457, 460; virus 437-439, 460-463, 496
 Inquisición 19, 24
 interacción 253-256, 263-264, 317-318, 351-353; véase también alianzas; conducta colectiva
 Internet 150, 188, 429, 435, 437-443, 445-447, 451-457, 471; *chats* 427-429, 441; y ciberterrorismo 439, 455-457, 460; virus 437-439, 460-463, 496
 Isabel I de Inglaterra 176-177
 Ising, Ernst 109-110, 131; modelos de magnetismo 110, 112, 117, 254, 272-273, 275, 327, 329, 331-332, 343, 354, 516
 Israel 346, 505, 513, 519
 Jaime II 9, 65
 Jefferson, Thomas 71
 Jencks, Charles 101
 Jeong, Hawoong (con Albert y Barabási) 447, 452
 Jevons, Stanley 225
 Johnson, Samuel 211
 Jones, David 523
 Juego de la vida (Conway) 149-150
 juegos 327-330, 335-336; véase también juegos, teoría de
 juegos, teoría de 255, 303, 375, 476, 484, 489-490, 493, 496-498, 500, 502, 504, 508, 510, 512-513, 521, 523-525, 530, 533; véase también dilema del prisionero
 Kagan, Robert 483-484
 Kahn, Hermann: *Thinking About the Unthinkable in the 1980s* 520-521
 Kamerlingh Onnes, Heike 115
 Kant, Immanuel 43, 66, 91, 94, 288, 342, 475, 479, 483, 519; *Idea de una historia universal desde un punto de vista cosmopolita* 81; *Para la paz perpetua* 483
 Kapitsa, Piotr 116
 Kapteyn, Jacobus 304
 Karinth, Frigyes 421n
 Kay, John 215, 249, 253, 317
 Keltsch, Joachim 161
 Kepler, Johannes 10, 138
 Kerner, Boris 198, 200-202
 Kett, Henry 177, 218
 Keynes, John Maynard 226-227, 243, 246, 250-251, 256, 261-262, 267
 Kinnock, Neil 351, 356
 Kipling, Rudyard 185
 Kirman, Alan 252, 254-255, 257
 Kleist, Heinrich von 141
 Klemm, Konstantin 406n
 Kochen, Manfred 419
 Kondratieff, Nikolai: ciclos 224-225
 Kraines, David y Vivien 506
 Kropotkin, Piotr: *El apoyo mutuo* 481-482, 502
 Krugman, Paul: *Vendiendo prosperidad* 216-217, 223n, 244, 262, 265n
 Krushchev, Nikita 521
 Kubrick, Stanley: *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú* 505, 522
 Kuhn, Thomas 101
 La Haya 182
laissez faire 81, 187, 213, 263, 542
 Lambert, John 17
 Laplace, Pierre-Simon 46, 74-75, 77-78, 84, 86, 88, 95, 103
 Las Vegas 183
 Lavoisier, Antoine: *Traité élémentaire de chimie* 125; ley de los grandes números (Poisson) 77, 79, 95, 97, 293
 Lee, Christopher 434
 Leeuwenhoek, Antoni van 141-142
 Leibniz, Gottfried 26, 88
 Lenz, Wilhelm 107-110
 Leucipo 45
levellers 18
 Levi, Primo: "For a Good Purpose" 438
 Lévy, Paul: vuelos de Lévy 231-235
 Lewin, Kurt 157
 leyes de potencias 270-271, 279, 281, 282-284, 307; y el crecimiento de las empresas 312, 314-315; y la distribución de la renta 291-293; y redes 449, 464-465, 467-469
 leyes naturales/derecho natural 29-30, 33, 44, 70, 72-73, 88, 288-289, 479, 481, 538, 540
 libre albedrío 13, 25, 46, 63, 88, 90-91, 93-96, 133, 317, 531; y la economía 245-246
 Lichtenberg, Georg Christoph 119, 141
 Lidl, supermercados 296
 Lighthill, James 189-190, 203
 Lillo, Fabrizio 235
 límites de fase 136
 Lind, Michael 373
 líquidos 99-106, 111-112, 114-115; véanse también fluidos; congelación
 Locke, John 38, 478-482, 484, 497, 504, 525; *Two Treatises of Government* 473-476
 Londres 82, 88-89, 92, 107, 113-114, 142, 165, 173-184, 255, 303, 306, 362n, 369, 390, 424-425, 447
 Londres, plano del metro de 425, 447
 Longfellow, Henry Wadsworth 80n
 Longley, Paul 178-179
 Los Ángeles 176, 185-186, 278, 283, 369, 421
 Love Bug, virus informático 438, 462
 Lucrecio: *De rerum natura* 45
 Lundberg, George: *Foundations of Sociology* 527
 Lutero, Martín 18-19, 441
 Lux, Thomas 257-259
 MacIver, Robert M.: *The Web of Government* 15, 31
 Mach, Ernst 54
 magnetismo véase Ising, modelos de magnetismo
 Makse, Hernán 180
 Malik, Kenan 544
 Malthus, Thomas 89, 267, 480; *Ensayo sobre el principio de la población* 66, 70
 Mandelbrot, Benoit 231-235, 288n; *La geometría fractal de la naturaleza* 290
 Mandeville, Bernard: *Fábula de las abejas* 532-533
 Mannheim, Karl: *Ideología y utopía* 349
 Mantegna, Rosario 233-235
 mapas axiales 182-183
 Maquiavelo, Nicolás, *El príncipe* 503
 máquinas de vapor 47-48, 50
 Marchesi, Michele 257-259
 Markowitz, Harry 250
 Marshall, Alfred 243-244, 310
 Marvel, cómics de la 464
 Marx, Karl/marxismo 39, 66, 80, 217-221, 224, 226, 246, 299-301, 528-529, 539; (con Engels) *Manifiesto comunista* 220
 Mathias, Nisha 470
 matrimonio 19, 66, 82, 91, 212, 381-390, 543
 Matsushita, Mitsugu 132-134, 136, 142-143, 178
 Maurois, André 341
 Maxwell, James Clerk 43, 51-57, 59, 83-87, 95-97, 99-100, 105-106, 117, 120, 151, 155-156, 228, 242-243, 387
 May, Robert 516-517
 McNamara, Robert 522
 McNaughton, John 522
 MDD véase descomposición dieléctrica
 mecánica cuántica 97, 116

- mecánica estadística 59, 62-63, 86, 97, 100, 106, 116-118, 120, 131, 243, 276, 318, 326
- mecanicistas, teorías 13, 19, 25, 27, 29, 37, 39, 44, 56, 73, 86-87, 91, 120, 157, 217, 530
- mecanografía 322
- mercados eficientes, hipótesis de los 236, 247, 258, 263
- mercurio 115
- Merchant, Carolyn: *The Death of Nature* 39
- Mersenne, Marin 27
- Merton, Robert 237-238
- metabolismo 418, 457-458
- metaestables estados/metaestabilidad 191-203, 343-347, 378-381, 387, 406
- microeconomía 243, 248, 254, 308
- Microsoft 320, 325, 443
- Milgram, Stanley 419-421, 427, 435
- Mill, John Stuart 39, 246, 541; *Sobre la libertad* 479-480; *Un sistema de la lógica* 80, 319, 531, 538, 544
- minimización 120, 130
- minorías, juego de 399-400, 465
- modelos de crecimiento en espiral 142
- modelos de magnetismo; véase Ising, Ernst
- Moe, Richard 186
- Moelwyn-Hughes, Emyr Alun 52
- moho del limo véase *Dictyostelium discoideum*
- Moivre, Abraham de: curva de error 76-78, 228
- Molnár, Péter 157-159, 161, 164
- Monbiot, George: *Captive State* 296, 297, 302
- moneda al aire 76
- Monk, George 17
- Montesquieu, barón de (Charles Louis Secondat de la Brède) 532, 537; *El espíritu de las leyes* 70
- Morales, leyes 61, 538
- Morgenstern, Oskar: *Theory of Games y Economic Behavior* 490
- Moro, Tomás: *Utopía*
- Morris, William: *Noticias de ninguna parte* 529
- movimientos en espiral 142, 226, 261, 373
- Moynihan, Daniel Patrick 371
- Mumford, Lewis: *The Culture of Cities* 31, 178, 534
- Musil, Robert, *El hombre sin atributos* 62
- Naciones Unidas 399, 483, 519
- Nagel, Kai 188, 190-191, 207
- Nagel-Schreckenberg (NaSch) modelo de 189-190, 195-198, 200, 203
- Nakar, Ehud 395-396
- Nakaya, Ukichiro 137
- Napier, John 24
- Napoleón Bonaparte 241, 268, 320
- Nash, equilibrio de 311-312, 326
- Netscape 443
- Neumann, John von 149, 489-490
- New Lanark, Escocia 528
- Newman, Mark 415, 417n, 461
- Newmarch, William 82, 390
- Newton, Isaac 10, 19, 23, 26, 44-46, 50, 56, 58-59, 67-68, 70-75, 88, 94-95, 116, 122, 147, 151, 156, 176, 189, 214, 289; *Opticks* 99; *Principia mathematica*, 536n
- Nietzsche, Friedrich 83
- Nightingale, Florence 80, 90
- Nixon, Richard 371
- Nobel, ganadores del Premio 55, 106, 125, 238, 250, 275, 310, 382
- Notting Hill, Carnaval de, Londres 173-174
- Nowak, Martin 508-510, 516-517
- nucleación 193-194, 202, 379, 387
- Nueva Orleans 182
- Nueva York: índice de delincuencia 380
- Nussbaum, Frederick: *The Triumph of Science and Reason* 36
- Oakeshott, Michael: *Experience and its Modes* 341
- objeción de conciencia 523-524
- Ojo Por Ojo (estrategia OPO) 493, 494-497, 502, 506-509, 511, 514-516, 519-521, 524-525; Ojo Por Ojo Generosa (OPOG) 506, 509-512, 519; Ojo Por Ojo Arrepentida (OPOA) 506, 519
- Olson, Richard: *Science Deified and Science Defied* 37, 540
- Onion, *The* 349
- Ono, S. 112
- Onsager, Lars 110, 123-125, 275
- opalescencia crítica 269, 273
- opciones, precio de 238-239
- Open Software Foundation (OSF) 324, 333-334
- Ormerod, Paul 232, 259-260, 269-270, 275-278, 286-287, 289; *Butterfly Economics* 539
- Osborne, M. F. M. 225n
- Oscuro Gatillo, estrategia del 511
- OSF véase Open Software Foundation
- Osiander, Andreas 19
- Ostwald, ley de 325
- OTAN 335, 346, 504, 513
- Owen, Robert 524
- Owen, Wilfred 528
- Paczuski, Maya 191
- Paine, Thomas; *Los derechos del hombre*, 69
- paisajística, teoría 341, 343-346
- paradigma, cambios del (Kuhn) 101
- Pareto, Vilfredo 225-226, 290-292, 411
- Park, Robert E. 531
- Parrish, Julia 146, 175
- Pascal, Blaise 24
- Pasteur, Louis 132
- Pastor-Satorras, Romualdo 461, 463
- path dependence* 322n
- Pavlov (estrategia) 506, 510-512, 519
- peces: conducta colectiva 145-146, 496
- Peierls, Rudolf 110n
- Pierce, Charles 86
- película-actor, juego véase Bacon, número de
- Penn, Alan 182
- Pericles 499
- Perrin, Jean 55
- Petty, William 9-11, 13, 64-65, 534; véase también *Aritmética política*
- planificación de galerías comerciales 165-166
- planificación urbanística; véase también senderos
- Platón 20, 27-28, 477; *La República* 429
- Pleasence, Donald 434, 435
- poder 21, 30-33, 37-38, 211-212, 270
- Poincaré, Henri 227
- Poisson, Siméon-Denis 75, 77-78
- póquer (juego) 490
- poliginia 383
- política/ciencia política 11, 19-21, 70-72, 539-540; partidos 262, 320, 335, 357-358, 500; véase también democracias; elecciones; gobierno(s)
- Pool, Ithiel de Sola 419
- Popper, Karl: *The Lessons of This Century* 475, 499, 500, 503, 519-521, 525
- positivismo 83
- Potts, Wayne 147
- Prigogine, Ilya 125, 128-130
- principio de incertidumbre 97
- probabilidades, distribución 76, 181, 183, 229, 231, 232n, 233n, 234n, 235, 258, 269, 279-284, 286, 288, 290, 304-305, 308, 353, 426, 448, 449-452, 469; véase también ley de potencias
- probabilidades, teoría de 252
- procesos estocásticos 76
- puertas, y conducta colectiva 160-161, 172-173
- punto clave (Gladwell) 101, 311, 380-381

- puntos críticos 102, 105, 108-109, 112-115, 131-132, 267-270; y fluctuaciones 271-274, 279; y crisis bursátiles 276-279
- puntos espinodales 344-345, 379-381
- Quesnay, François: *Tableau économique* 71
- Quetelet, Adolphe 73-74, 78-82, 85, 87, 91, 92, 156, 228, 290; *Physique sociale* 72
- quimiotaxis 146
- Quincke, Georg Hermann 126n
- RAND Corporation 489, 491, 520
- Rapaport, Anatol 425, 493, 494, 507
- Rayleigh-Bénard, modelos de convección de 127, 128, 136
- Reagan, Ronald 416
- recesiones 219-224, 260-262, 266
- redes 415, 418-419, 421-422; y proceso de agrupamiento 346-347, 420, 427-429, 432, 464-465; estudios de; y teorías 418-422, 425-434, 435-436; véase también Bacon, número de; véase también redes sin escala
- redes sin escala 448-449, 452-454, 457, 461-471
- redes sociales véase redes
- Redner, Sidney 286, 287
- Reforma 18, 30
- Rehborn, Hubert 198, 200-202
- religión 28, 37, 72, 92, 337, 346, 370, 382, 390, 407, 475
- renormalización 275
- Rényi, Alfred 423, 425, 426, 455, 466
- retroalimentación negativa 219-220
- Revolución Industrial 46, 47, 66, 167, 217, 224, 298, 299
- Reynolds, Craig 147-148, 150, 152
- Ricardo, David 218, 267
- Richardson, Lewis Fry 287, 288
- Richter, Charles 283
- Rodolfo, príncipe heredero de Austria 62
- Ross, Edward A.: *Social Control* 141
- Rousseau, Jean-Jacques 38, 69, 480, 483, 491, 537
- Royal Institution 47n
- Royal Society, Londres 65, 142
- ruido 128, 152, 153, 169, 191, 227-229, 233, 244, 246, 252, 257, 260, 273, 364, 366, 466, 506, 507, 509, 510, 511, 533
- Safeway, supermercados 295-296
- Saint-Simon, Claude-Henri de Rouvroy, conde de 70-71
- Salinger, Michael 307
- Sander, Len 133-134, 136
- Santa Fe: El Farol (bar) 391
- Savoy, teatro, Londres 362n
- Scheinkman, José 285
- Schelling, Thomas: *Micromotives and Macrobehavior* 185, 366-372, 375, 386, 413, 543, 544
- Schoenberg, Arnold 62
- Scholes, Myron 237, 238, 239
- Schreckenberg, Michael 188, 190, 191, 198, 202, 203, 207; véase también Nagel-Schreckenberg, modelo de
- Schrödinger, Erwin 48n, 97, 417
- Schumacher, E. F.: *Small Is Beautiful* 295
- Schumpeter, Joseph 223, 243; *Ciclos económicos* 223n, 224-225
- Seattle 182, 186
- segregación racial 369-373, 400
- selección natural 86-87, 123, 372, 458, 480, 481, 497, 509
- senderos/modelos de senderos 161-165, 245
- Senior, Nassau 82
- Shaftesbury, lord Ashley Cooper, tercer conde de 478
- Shannon, Claude 96
- Shaw, George Bernard 211, 381, 401
- Shiller, Robert 248, 256
- Shirras, George Findlay 291
- Short, Thomas: *A Complete History of the Increase y Decrease of Mankind* 65
- SIDA 422, 462-463
- Sigmund, Karl 508-510; *Games of Life* 523
- SimCity (juego de ordenador) 409
- simetría, ruptura de la 130
- Simmel, Georg 531
- Simon, Herbert: *The Sciences of the Artificial* 184, 267, 413, 527
- Sinatra, Frank 434
- Sinclair, John: *Statistical Account of Scotland* 67
- Skyrms, Brian: *Evolution of the Social Contract* 521
- Smart Growth America 177
- Smith, Adam 71, 72, 81, 211-216, 217-219, 225, 246, 262, 263, 299, 300, 367, 382, 538, 541; *Investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones* 38, 71, 212, 213, 532, 536
- Smith, John Maynard 506
- Smoluchowski, Marian 97
- Snow, C. P.: *Las dos culturas* 48
- Snyder, Carl: *Capitalism the Creator* 291
- Snyder, Glenn 336
- Sociedad Estadística de Londres 82, 88, 89, 390
- Solomon, Sorin 264, 292
- Sornette, Didier 277, 278
- Soros, George 252
- Spence, Michael 250
- Spencer, Herbert: *The Principles of Sociology* 61, 87, 119, 179
- Spinoza, Baruch 491
- Stalin, Josif 338, 340, 341
- Stanley, Gene 180, 182, 233, 234, 307, 462, 468
- Steiger, Rod 424, 434, 464
- Stiglitz, Joseph 250
- Strogatz, Steven, y Duncan Watts 428-429, 430, 432, 434, 449, 450, 452, 457, 461, 463, 466, 469
- Stuttgart, Universidad de, 157, 162, 163
- Sugarscape*, véase Epstein, Joshua
- Sun Microsystems 324, 326
- superconductores 268
- superfluidos 118, 270
- supermercados 56, 296
- susceptible-infectado-susceptible (SIS), modelos 460, 461
- Süssmilch, Johann Peter 65, 66, 91
- Sutherland, Donald 434
- Sutton, John 306, 307
- Swift, Jonathan: *Los viajes de Gulliver* 71; "A modest proposal for preventing..." 534
- Szilard, Leo 483
- Taillandier, A. 89
- Tait, Peter Guthrie 86
- Tang, Chao 280-281, 284, 286
- Tate Gallery de Londres 165
- Temple, sir William 473
- Tennyson, Alfred, lord: *In Memoriam* 480; "Locksley Hall" 287; "Lucretius" 95
- tentación 489-490; véase también dilema del prisionero
- termodinámica 48, 50, 97, 120-125, 130, 243; primera ley 48, 96; segunda ley 48-49, 57, 59, 95-97, 120, 124; tercera ley 48
- terremotos 283, 285, 287
- Thom, René 12, 101
- Thompson, Benjamin (posteriormente: conde de Rumford) 47
- Thompson, D'Arcy Wentworth: *Sobre el crecimiento y la forma* 122, 123, 127
- Thomson, William (posteriormente: lord Kelvin) 49
- Thoreau, Henry David 119
- Tokio 176, 183, 235, 255
- Tolstoi, León: *Guerra y Paz* 93

- tráfico, convenciones del 362
 tráfico, planificación del 55, 186-188,
 194-195; modelos 187-192, 195-198,
 202-204, 206-209; *véase también*
 atascos
 transiciones de fase 99-101, 105-109, 113,
 116-118, 129-130, 152-153, 343; crítica
 (de segundo orden) 109, 110-112,
 130-131, 193-194, 271, 381; de primer
 orden 109, 194, 379-380
 trayectorias aleatorias 54-55, 133, 144,
 227, 231-232
 Treiber, Martin 203, 204, 208, 209
 Trevor-Roper, Hugh 342
 Tristão Bernardes, Américo 354-355
 Tucídides 327, 477
 Tucker, Josiah, deán de Gloucester 214
 Twain, Mark 83

 Ulam, Stanislaw 149
 Uniform Resource Locator (URL) 447
 Unión Europea 398, 399, 483
 universalidad 112, 113, 179, 275, 284,
 293, 297, 307, 314, 418
 universo, teorías del 25-26, 50, 56,
 117-118, 224-225
 Unix International Incorporated (UII)
 324, 333, 334
 URL *véase* Uniform Resource Locator
 Usenet 442
 utilidad 246-248, 309-311, 314, 316,
 382-386
 utilitarismo 38, 80, 217, 309, 479,
 524, 538
 utopías 20, 27-28, 37-39, 41, 67,
 527-530, 537

 Veblen, Thorstein 251, 252
 Verschaffelt, Jules 271
 Vespignani, Alessandro 405, 461, 463
 Vicsek, Tamás 151-152, 158, 168-170, 547

 vidrio de spin 327-332, 341
 Voltaire 68, 528
 Vonnegut, Kurt: *Cuna de gato* 99, 100,
 124, 194
 voto, *véase* elecciones

 Waals, Johannes Diderik van der
 103-107, 113-115, 120, 158, 268-271,
 273-275, 326, 343, 387, 388
 Walras, Léon 226
 Waltz, Kenneth: *Man, the State, and*
War 11, 503; *Theory of International*
Politics 335
 Wall Street, crash de (1929) 215, 223,
 261, 262n
 Washington DC 185, 263, 304,
 412, 483
 Watts, Duncan 435, 436; *véase también*
 Strogatz, Steven
 Weiss, Pierre 107, 254, 274
 Wells, H. G. 483
 Whewell, William 89
 Whitham, Gerald 189, 203
 Wiedemann, Rainer 190
 Wiesenfeld, Kurt 280-281, 284
 Wilde, Oscar 401n
 Wilson, Edward O. 150, 372, 497
 Wilson, Kenneth 275
 Winstanley, Gerrard 528
 Witten, Tom 133-134, 136
 Wittgenstein, Ludwig 62
 Woodford, Michael 284, 285
 World Wide Web (www) 438-440,
 442, 447-452; buscadores 443, 451
 Wundt, Wilhelm 61

 Zhang, YiCheng *véase* Challet, Damien
 Zhou, Wei-Xing 278n
 Zipf, George Kingsley: *Human Behavior*
and the Principle of Least Effort 267,
 289-290, 293, 367, 467, 538n

