

8

LA ARQUITECTURA DE LA COMPLEJIDAD: LOS SISTEMAS JERÁRQUICOS

En este capítulo me gustaría examinar algunas de las cuestiones que he aprendido sobre determinados tipos de sistemas complejos que se hallan presentes en varias disciplinas científicas.¹ Aunque los conceptos que deseo presentar se desarrollaron en el contexto de fenómenos concretos, las formulaciones teóricas que les corresponden no suelen hacer referencia a sus detalles estructurales sino que, por el contrario, aluden esencialmente a la complejidad de los sistemas analizados, sin especificar las características exactas de su complejidad. Como consecuencia de su naturaleza esencialmente abstracta, dichas teorías pueden tener cierta relevancia —la palabra *aplicación* sería demasiado osada— para distintos tipos de sistemas complejos presentes tanto en las ciencias sociales como en la biología o la física.

Al presentar dichas teorías evitaré pues detenerme en detalles técnicos que, por lo general, pueden encontrarse fácilmente en otras fuentes, y procederé a describir cada teoría en el contexto particular en el que surgió para pasar luego a exponer algunos ejemplos de sistemas complejos de disciplinas distintas a las de la aplicación inicial y para los cuales el marco teórico presentado resulta asimismo pertinente. A lo largo de dicha exposición me referiré también a áreas del conocimiento en las que no soy necesariamente un experto, y puede que ni siquiera un iniciado.

¹ Este capítulo es una revisión de un artículo con el mismo título, y ha sido reimpresso con el permiso de *Proceedings of the American Philosophical Society* 106 (Diciembre 1962): 467-482.

Estoy seguro de que al lector no le costará demasiado distinguir entre los enunciados basados en la pura fantasía o en la simple ignorancia de aquellos otros que pueden contribuir a arrojar algo de luz acerca del modo en que la complejidad se pone de manifiesto en la naturaleza.

En este capítulo no me propongo sin embargo ofrecer una definición formal sobre qué es un sistema complejo.² A grandes rasgos, entiendo por sistema complejo aquel sistema formado por un gran número de partes distintas que mantienen entre sí una serie de interacciones. Como ya vimos en el capítulo anterior, en este tipo de sistemas el todo siempre es más que la suma de las partes —en el sentido en cierto modo débil pero importante en términos pragmáticos de la expresión— puesto que, dadas las propiedades de sus distintas partes, así como sus leyes de interacción, no resulta una tarea nada sencilla poder inferir las propiedades del conjunto.³

A lo largo de los cuatro apartados que figuran a continuación se presentan cuatro aspectos distintos de la complejidad. El primero analiza la frecuencia con que la complejidad se organiza de forma jerárquica en la medida en que todo sistema complejo está compuesto por subsistemas que, a su vez, poseen sus propios subsistemas. El segundo apartado lleva a cabo una valoración teórica sobre la relación que existe entre la estructura de un sistema complejo y el tiempo necesario para que se manifieste tras una serie de procesos evolutivos, y concretamente, se avanza la tesis de que los sistemas jerárquicos tienden a evolucionar con mucha mayor rapidez que los sistemas no jerárquicos de tamaño similar. En el tercer apartado se examinan las propiedades dinámicas de los sistemas de base jerárquica y se muestra cómo se pueden descomponer en

² W. Weaver en «Science and Complexity», *American Scientist* 36 (1948): 536, distinguió dos tipos de complejidad, la organizada y la desorganizada. A lo largo de estas páginas, sin embargo, nos centraremos esencialmente en la complejidad organizada.

³ Véase también John. R. Platt, «Properties of Large Molecules that Go beyond the Properties of Their Chemical Sub-groups», *Journal of Theoretical Biology* 1 (1961), págs. 342-358. El tema del reduccionismo holístico constituye una de las principales causas de enfrentamiento entre los científicos y los humanistas, por lo que quizá podría esperarse que la vía de conciliación que proponemos aquí contribuya en algún modo a instaurar la paz entre las llamadas dos culturas. Por mi parte, aunque sin duda tengo algo que decir acerca de la complejidad tanto en el arte como en las ciencias naturales, debo señalar que el pragmatismo de mi propio enfoque holístico es radicalmente distinto a la postura que sostiene W. M. Elsasser en *The Physical Foundation of Biology* (Nueva York: Pergamon Press, 1958).

subsistemas con el fin de analizar su comportamiento. Finalmente, en el cuarto apartado se estudia la relación entre los sistemas complejos y su descripción.

Por consiguiente, la principal hipótesis del presente capítulo es que, muy a menudo, la complejidad suele adoptar una forma jerárquica y que, independientemente de cuál sea su contenido específico, todos los sistemas jerárquicos poseen ciertas propiedades en común. De hecho incluso me atrevería a afirmar que la jerarquía es una de las estructuras elementales que intervienen en la arquitectura de la complejidad.

SISTEMAS JERÁRQUICOS

Por sistema jerárquico o jerarquía entiendo aquel sistema formado por una serie de subsistemas relacionados entre sí cada uno de los cuales posee a su vez una estructura jerárquica hasta el nivel más inferior del subsistema elemental. En la mayoría de los sistemas presentes en la naturaleza resulta relativamente arbitrario determinar el lugar en el cual dicho sistema deja de subdividirse y cuáles son los subsistemas que se adoptan como elementales. Y aunque de hecho la física suele hacer un uso bastante prolífico del concepto de «partícula elemental», lo cierto es que la mayoría de partículas poseen una desconcertante tendencia a no permanecer en estado elemental durante demasiado tiempo. Así, hace apenas dos generaciones, los átomos eran considerados partículas elementales, mientras que, actualmente, cualquier físico nuclear los trata esencialmente como sistemas complejos. Asimismo, en determinadas circunstancias y propósitos, la astronomía considera que una estrella o una galaxia entera son subsistemas, y del mismo modo, en determinado tipo de investigaciones biológicas la célula también se considera como un subsistema elemental mientras que en otras investigaciones se la considera como una molécula proteínica o en una tercera como un residuo de aminoácido.

El simple hecho de por qué un científico se permite la licencia de tratar como sistema elemental un sistema que en realidad es desmesuradamente complejo es una de las cuestiones a las que intentaré responder, pero por el momento partiré de la mera constatación de que los científicos lo hacen todo el tiempo y de que, si proceden con suficiente

rigor, suelen salir airoso de ello.

Etimológicamente, la palabra *jerarquía* siempre se ha utilizado en un sentido bastante más restringido del que yo le doy en estas páginas, y tradicionalmente se ha empleado para referirse a un sistema complejo cada uno de cuyos subsistemas se halla subordinado al sistema al cual pertenece en virtud de una relación de autoridad. Para decirlo de un modo más ilustrativo, en una organización jerárquica formal los sistemas suelen consistir en un «jefe» y en una serie de subsistemas subordinados a éste y, a su vez, cada uno de los subsistemas posee un «jefe» que es el subordinado inmediato del jefe del sistema. Así, puede que deseemos incluir determinados sistemas cuya relación entre los distintos subsistemas que los conforman sea más compleja que en la jerarquía formal que acabamos de describir o bien otros sistemas cuyos subsistemas no presenten entre sí ningún tipo de relación de subordinación (de hecho, incluso en las organizaciones de base humana la jerarquía formal sólo existe sobre papel pues las organizaciones reales de carne y hueso suelen presentar muchas otras relaciones *inter pares* distintas a las establecidas por la autoridad formal). A falta de otro término más adecuado, para referirme a todos los sistemas complejos susceptibles de ser analizados en sucesivos conjuntos de subsistemas, de ahora en adelante utilizaré la palabra *jerarquía* en su sentido más amplio, tal como lo he descrito en los párrafos anteriores, mientras que reservaré el término «jerarquía formal» para hacer referencia al concepto más especializado.⁴

Sistemas sociales

En el apartado anterior he dado un ejemplo de un tipo de jerarquía que suele ser bastante frecuente en las ciencias sociales: el de la organización formal. Así, tanto las empresas como la administración pública o las universidades poseen una estructura claramente visible que se halla organizada en elementos-dentro-de-elementos. Sin embargo, las organizaciones formales no son el único tipo de jerarquía social que existe, ni siquiera el más común. Prácticamente todas las sociedades

⁴ El término matemático *partición* no resulta apropiado para lo que en estas páginas designo como jerarquía puesto que el conjunto de subsistemas y los subconjuntos de cada uno de ellos definen la partición, independientemente de los sistemas de relaciones que existan entre los subconjuntos. Por *jerarquía* entiendo la partición y las relaciones entre los subconjuntos.

poseen unidades básicas llamadas familias, que a su vez se pueden agrupar para formar aldeas o tribus, y de nuevo, incluirse en grupos sucesivamente mayores. Si realizamos un diagrama de las interacciones sociales en función de quién habla con quién, los nodos que correspondan a una mayor interacción dibujarán una estructura jerárquica bastante bien definida y, al mismo tiempo, basándonos en algún tipo de medición de la frecuencia de la interacción podremos definir de un modo más operativo los distintos grupos que constituyen la estructura resultante utilizando una matriz sociométrica.

Sistemas biológicos y físicos

La estructura jerárquica de los sistemas biológicos suele ser un hecho comúnmente aceptado. Así, si partimos de la célula como bloque de construcción primario podemos hallar células organizadas en tejidos, tejidos organizados en órganos, y órganos que constituyen sistemas. Dentro mismo de la célula existen distintos subsistemas claramente definidos como por ejemplo el núcleo, la membrana celular, los microsomos y las mitocondrias.

La estructura de muchos otros sistemas físicos resulta igualmente nítida. Hasta ahora he mencionado las dos series principales y, mientras que a nivel microscópico tenemos las partículas elementales —átomos, moléculas y macromoléculas—, a nivel macroscópico tenemos los sistemas de satélites, los sistemas planetarios y las galaxias. Sin embargo, en todos los rincones del espacio la materia se halla distribuida de un modo sorprendentemente no uniforme, y las distribuciones más aleatorias que existen, los gases, no son en realidad distribuciones aleatorias de partículas elementales, sino distribuciones aleatorias de sistemas complejos, es decir, de moléculas.

El término *jerarquía*, tal como lo he definido, subsume una considerable variedad de tipos estructurales distintos. Así, de acuerdo con dicha definición, un diamante es jerárquico va que es una estructura cristalina formada por átomos de carbono que, a su vez, pueden descomponerse en protones, neutrones y electrones. Sin embargo, es una jerarquía muy «plana» en la cual el número de subsistemas de primer orden que pertenecen al cristal puede ser arbitrariamente grande. En el mismo sentido, un volumen de gas molecular constituye una jerarquía «plana». En el lenguaje común solemos reservar la palabra *jerarquía* para

referirnos a un sistema que está dividido en un número *pequeño* o *moderadamente grande* de subsistemas, cada uno de los cuales puede subdividirse a su vez. Por consiguiente, por lo general no solemos concebir o referirnos a un diamante o a un gas como una estructura jerárquica. Igualmente, un polímero lineal es simplemente una cadena, que puede ser muy larga, de subpartes idénticas: los monómeros. A nivel molecular, pues, es una jerarquía muy plana.

En las organizaciones formales, el número de subordinados que están directamente vinculados a un único jefe se conoce como *amplitud de control*. Igualmente, me referiré a la amplitud de un sistema para hacer referencia al número de subsistemas en que éste se divide. Así, un sistema jerárquico será plano a un determinado nivel si tiene una *amplitud* grande en dicho nivel: un diamante tiene una amplitud grande en el nivel cristalino pero no en el nivel inmediatamente inferior, el atómico.

En la mayor parte de nuestra construcción teórica a lo largo de los siguientes apartados vamos a centrarnos en jerarquías de rango moderado pero ocasionalmente me referiré al grado en el que las teorías presentadas se puedan o no aplicar a jerarquías esencialmente planas.

Existe una diferencia importante entre las jerarquías físicas y biológicas, por un lado, y las jerarquías sociales, por otro. La mayoría de jerarquías físicas y biológicas se describen en términos espaciales. Detectamos los orgánulos de una célula de la misma manera que detectamos las pasas en un bizcocho —son subestructuras claramente diferenciadas que se ubican en una estructura mayor—. Por otro lado, para identificar las jerarquías sociales proponemos que no nos fijemos en quién vive cerca de quién sino que más bien observemos quién interactúa con quién. Estos dos puntos de vista se pueden reconciliar definiendo la jerarquía en términos de la intensidad de la interacción pero teniendo en cuenta que en la mayor parte de los sistemas biológicos y físicos la presencia de una interacción relativamente intensa suele ir acompañada de una relativa cercanía espacial. Una de las características interesantes que comparten las células nerviosas y los cables telefónicos es que ambos permiten intensas interacciones específicas a grandes distancias. En la medida en que las interacciones se canalizan mediante sistemas de comunicación y transpone especializados, la cercanía espacial resulta menos determinante para la estructura.

Sistemas simbólicos

Existe una clase de sistemas de extrema importancia que hasta ahora he omitido de mis ejemplos: se trata de los sistemas de producción simbólica humana. De hecho, un libro es una jerarquía en sí —en el sentido en que utilizo dicho término en estas páginas— pues suele estar dividido en capítulos, los capítulos a su vez en apartados, los apartados en párrafos, los párrafos en oraciones, las oraciones en cláusulas y sintagmas, y las cláusulas y sintagmas en palabras. Así, podemos tomar la palabra como nuestra unidad básica o bien seguir subdividiéndola como suelen hacer los lingüistas en unidades más pequeñas. Igualmente, en el caso de un libro de tipo narrativo, éste se puede dividir en «episodios» en lugar de apartados, pero seguirá habiendo divisiones.

La estructura jerárquica de la música, basada en unidades como movimientos, partes, temas y frases, es bien conocida. La estructura jerárquica de las artes plásticas es más difícil de caracterizar, aunque algo diré al respecto más adelante.

LA EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS COMPLEJOS

A continuación me propongo introducir el concepto de evolución mediante una parábola. Hace mucho tiempo existieron dos relojeros, Hora y Tempus. Aunque ambos estaban muy bien considerados y en sus respectivos talleres de relojería los teléfonos no dejaban de sonar con encargos de nuevos clientes, mientras que con el tiempo Hora fue prosperando, Tempus fue empobreciéndose cada vez más hasta que al final tuvo que cerrar su negocio. Pero, ¿cuál fue la razón de ello?

Los relojes que hacían ambos artesanos estaban formados por unas 1000 piezas cada uno. Tempus montaba sus relojes de tal modo que, si ya tenía una parte montada y tenía que dejarla un instante —por ejemplo, para contestar al teléfono—, inmediatamente se le desmontaba por completo y tenía que volver a empezar de cero y montarla pieza por pieza. Cuanto más éxito tenían sus relojes entre sus clientes, más le llamaban para encargarle otros nuevos, y más difícil le resultaba encontrar el tiempo suficiente para poder terminar un reloj sin interrupciones.

Los relojes que Hora construía no eran menos complejos que los de Tempus; pero los había diseñado de tal modo que podía montar

componentes de unas diez piezas cada uno. Diez componentes de esos a su vez podían montarse como un componente mayor; y un sistema de diez de estos últimos componentes formaban finalmente el reloj. Por consiguiente, cuando Hora tenía que dejar un momento un reloj parcialmente montado para contestar al teléfono, sólo perdía una pequeña parte de su trabajo de modo que construía sus relojes en sólo una fracción del tiempo que le tomaba al otro relojero.

Resulta relativamente fácil realizar un análisis cuantitativo de la dificultad relativa de las tareas de Tempus y Hora. Sea p la probabilidad de que se produzca una interrupción mientras se está añadiendo una pieza a un reloj incompleto. Por consiguiente, la probabilidad de que Tempus pueda terminar el reloj que ha empezado sin ninguna interrupción es $(1 - p)^{1000}$, una cifra muy baja a menos que p sea 0.001 o menor. El coste medio de una interrupción será el tiempo de ensamblar $1/p$ partes (el número de esperado de partes que haya ensamblado antes de la interrupción). Por su parte, Hora deberá completar 111 componentes de diez partes cada uno. La probabilidad de que no le interrumpan mientras termina una de ellas es de $(1 - p)^{10}$, y cada interrupción le costará solamente el tiempo equivalente al montaje de cinco piezas.⁵

Ahora bien, si p es cercana 0.01 —o sea, si existe una posibilidad sobre cien de que cualquiera de ambos relojeros sea interrumpido

⁵ Las conjeturas sobre la tasa de progreso de la evolución fueron planteadas por primera vez por H. Jacobson en su aplicación de la teoría de la información al cálculo del tiempo necesario para la evolución biológica. Ver su artículo «Information, Reproducción and the Origin of Life» en *American Scientist* 43 (enero 1955), págs. 119-127. A partir de consideraciones termodinámicas es posible calcular el incremento de entropía que tiene lugar cuando un sistema complejo se descompone en sus distintos elementos. (Véase por ejemplo R. B. Setlow y E.C. Pollard, *Molecular Biophysics* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1962), págs. 63-65, así como las referencias anteriormente citadas.) Sin embargo, la entropía es el logaritmo de una probabilidad; por ello, la información (el negativo de la entropía) se puede interpretar como el logaritmo del recíproco de dicha probabilidad o, para decirlo de algún modo, de la «improbabilidad». La idea esencial del modelo de Jacobson es que el tiempo esperado que requerirá el sistema para alcanzar un estado determinado es inversamente proporcional a la probabilidad de ese estado —por ello crece exponencialmente respecto a la cantidad de información (neguentropía) del estado.

Siguiendo este razonamiento, aunque sin introducir las nociones de nivel y de subcomponentes estables, Jacobson llegó a estimaciones tan elevadas del tiempo requerido para la evolución que ésta resultaría improbable. Nuestro análisis, realizado del mismo modo, pero con la introducción de formas estables intermedias, arroja unas cifras muy inferiores.

mientras está añadiendo una nueva pieza a su montaje— un simple cálculo nos muestra que a Tempus le tomará ensamblar un reloj en promedio unas 4000 veces más tiempo que ahora. Obtenemos esa estimación de la siguiente manera:

1. Hora debe montar 111 veces más piezas por reloj que Tempus, pero
2. Tempus pierde una media de 20 veces más trabajo por cada interrupción de montaje que Hora (100 piezas de media frente a 5); y
3. Tempus terminará un reloj sólo 44 veces de cada millón de intentos ($0.99^{1000} = 44 \times 10^{-6}$), mientras que Hora logrará terminar nueve de cada diez ($0.99^{10} = 9 \times 10^{-1}$). Por consiguiente, Tempus tendrá que hacer 20,000 intentos más por reloj terminado que Hora $(9 \times 10^{-1}) / (44 \times 10^{-6}) = 2 \times 10^4$. Si multiplicamos estas tres tasas tenemos:

$$1/111 \times 100/5 \times 0.99^{10}/0.99^{1000} = 1/111 \times 20 \times 20,000 \sim 4000.$$

Evolución biológica

¿Qué lecciones podemos extraer de la anterior parábola en el caso de la evolución biológica? Supongamos que interpretamos un subconjunto parcialmente terminado de k piezas elementales como la coexistencia de k piezas en un pequeño volumen —obviando sus orientaciones relativas—. El modelo presupone que las piezas se unen a dicho volumen a una tasa constante pero que existe una probabilidad constante p de que la pieza se desmiembre antes de que se le añada otra a menos que el conjunto así ensamblado alcance un estado estable. Estas presuposiciones no son precisamente realistas porque ciertamente subestiman el descenso de la probabilidad de terminar el montaje con el aumento de tamaño de éste. Por consiguiente, dichas presuposiciones minimizan —y probablemente en un factor considerable— la ventaja relativa de la estructura jerárquica.

A pesar de que obviamente no podemos considerar seriamente el anterior cálculo numérico, la lección que plantea en términos de evolución biológica es bastante clara y directa: el tiempo que se requiere

para que una forma compleja evolucione a partir de elementos simples depende críticamente del número y de la distribución de posibles formas intermedias estables. Más concretamente, si existe una jerarquía de «componentes» potencialmente estables con aproximadamente la misma amplitud s en cada nivel de la jerarquía, el tiempo que se necesita para montar un componente puede ser el mismo en cada nivel, es decir, proporcional a $1/(1 - p)^s$. El tiempo que se necesitará para ensamblar un sistema de n elementos será proporcional a $\log_s n$, es decir, al número de niveles del sistema. Se podría decir —con una pretensión más ilustrativa que literal— que el tiempo que se necesitó para que los organismos pluricelulares evolucionaran a partir de organismos unicelulares podría ser del mismo orden de magnitud que el tiempo que se requiere para que un organismo unicelular evolucione a partir de macromoléculas. El mismo argumento podría aplicarse a la evolución de proteínas a partir de aminoácidos, o de moléculas a partir de átomos, o de átomos a partir de partículas elementales.

Cualquier biólogo, químico o físico puede hallar un sinfín de objeciones a este esquema tan simplificado. Antes de ocuparme de asuntos que conozco mejor, aclararé cuatro de estas objeciones y dejaré el resto para los especialistas.

En primer lugar, a pesar de los matices de la parábola del relojero, la teoría no presupone la existencia de ningún mecanismo teleológico. Las formas complejas pueden surgir de formas simples mediante procesos totalmente aleatorios. (A continuación presentaré otro modelo que ilustra claramente este aspecto.) En este esquema, la dirección viene dada por la estabilidad de las formas complejas, en cuanto éstas aparecen. Aunque esto no es más que la supervivencia de los más aptos, es decir, de los estables.

En segundo lugar, no todos los grandes sistemas poseen una estructura jerárquica. Por ejemplo, la mayoría de los polímeros, como el nailon, consisten sencillamente en cadenas formadas por un gran número de componentes idénticos, los monómeros. Sin embargo, para el objetivo que nos proponemos consideraremos simplemente estas estructuras como una jerarquía de amplitud uno —es decir, el caso límite—, que para una cadena de cualquier longitud representa un estado de equilibrio relativo.⁶

⁶ Existe una teoría ampliamente desarrollada acerca del tamaño de los polímeros basada

En tercer lugar, el proceso evolutivo no infringe la segunda ley de la termodinámica. La evolución de los sistemas complejos a partir de elementos simples no tiene implicación alguna sobre el cambio de entropía del sistema global. Si dicho proceso absorbe energía libre, el sistema complejo poseerá una entropía menor que los elementos que lo constituyen; y si desprende energía libre, lo contrario será cierto. La primera alternativa es la que corresponde a la mayoría de los sistemas biológicos, y el flujo neto de energía libre debe ser proporcionada por el Sol u otra fuente de energía para no contravenir la segunda ley de la termodinámica. En el caso del proceso evolutivo que estamos describiendo, los equilibrios de los estados intermedios requieren sólo estabilidad local y no global, y sólo pueden ser estables en el estado de reposo, es decir, siempre que exista una fuente externa de energía libre de la que se puedan nutrir.⁷

Dado que los organismos no son sistemas cerrados energéticamente, no hay manera de deducir ni la dirección ni mucho menos la tasa de evolución a partir de consideraciones termodinámicas clásicas. Todas las estimaciones indican que la cantidad de entropía, medida en unidades físicas, que interviene en la formación de un organismo biológico unicelular es prácticamente insignificante (unas 10^{-11} cal/grado).⁸ La «improbabilidad» de la evolución no tiene nada que ver con esta cantidad de entropía que cada célula bacteriana produce cada generación. La insignificancia de la cantidad de información con respecto a la velocidad de la evolución se puede ver también en el hecho de que se requiere tanta información para «copiar» una célula mediante el proceso reproductivo

en modelos de enlace aleatorio. Véase por ejemplo P. J. Flory, *Principles of Polymer Chemistry* (Ithaca: Cornell University Press, 1953), capítulo 8. Puesto que en la teoría de la polimerización *todas* las subpartes son estables, la limitación del crecimiento molecular depende en última instancia de la «intoxicación» de algunos grupos terminales como consecuencia de impurezas o de la formación de ciclos más que de la perturbación de cadenas parcialmente constituidas.

⁷ Aunque este argumento ha sido formulado con anterioridad en múltiples ocasiones merece la pena insistir en él una vez más. Para más información véase Setlow y Pollard, *Molecular Biophysics*, págs. 49-64; E. Schrödinger, *What is Life?* (Cambridge: Cambridge University Press, 1945); y H. Linschitz, «The Information Content of a Bacterial Cell» en H. Quastler (ed.) *Information Theory in Biology* (Urbana: University of Illinois Press, 1953), págs. 251-262.

⁸ Véase Linschitz, *op. cit.*, 1953. La cantidad mencionada, 10^{-11} cal/grado, corresponde a unos 10^{13} bits de información.

como para producir la primera célula mediante evolución.

El hecho de la existencia de formas intermedias estables tiene una notable influencia en la evolución de las formas complejas, que es semejante al efecto dramático de los catalizadores sobre las tasas de reacción y la distribución en estado estable de los productos reactivos en sistemas abiertos.⁹ En ninguno de los dos casos el cambio de entropía nos da pistas sobre el comportamiento del sistema.

La evolución de los organismos pluricelulares

Debemos considerar una cuarta objeción a la metáfora del relojero. Por muy convincente que sean los modelos de explicación de los sistemas atómicos y moleculares, e incluso los organismos unicelulares, que suscita la metáfora, no parece encajar con la historia de los organismos pluricelulares. La metáfora presupone que los sistemas complejos se forman por una combinación de conjuntos de sistemas más sencillos, pero así no han evolucionado los organismos pluricelulares. Aunque de hecho las bacterias sí han sido el resultado de la integración de las mitocondrias con las células en las que habitaban, los organismos pluricelulares han evolucionado por multiplicación y especialización de las células de un sistema único y no por fusión de subsistemas previamente independientes.

Antes de descartar prematuramente la metáfora, sin embargo, deberíamos reconocer que los sistemas que evolucionan mediante especialización suelen adoptar la misma estructura de «cajas dentro de cajas» (por ejemplo, un sistema digestivo, formado por boca, laringe, esófago, estómago, intestinos grueso y delgado, colon; o un sistema circulatorio, formado por corazón, arterias, venas y capilares) que también adoptan los sistemas que evolucionan a partir del ensamblaje de sistemas más simples. En el siguiente apartado de este capítulo se abordan, los sistemas cuasi-descomponibles. Se avanza la hipótesis de que no es el ensamblaje a partir de componentes *per se* sino la estructura

⁹ Véase H. Kacser, «Some Physico-chemical Aspects of Biological Organization», apéndice, págs. 191-249, en C. H. Waddington, *The Strategy of the Genes* (Londres: George Allen and Unwin, 1957).

jerárquica que resulta *tanto* del ensamblaje *como* de la especialización lo que provee el potencial para una rápida evolución.

El supuesto del que se parte es que el potencial necesario para que se produzca una evolución rápida se halla presente en cualquier sistema complejo formado por un conjunto de subsistemas estables cada uno de los cuales funciona de modo casi independiente con respecto a los procesos concretos que tienen lugar en los otros subsistemas y, por consiguiente, están influidos sobre todo por los *inputs* y *outputs* netos de los otros subsistemas. Si se cumple la condición de cuasi-descomponibilidad, la eficiencia de un componente determinado (y por tanto su aportación a la aptitud del organismo) no depende de la estructura concreta de otros componentes implicados.

Antes de pasar a examinar dicho supuesto en detalle me gustaría analizar brevemente algunas aplicaciones no biológicas de la metáfora del relojero con el fin de ilustrar las notables ventajas que presentan los sistemas jerárquicos en otras circunstancias.

La resolución de problemas como proceso de selección natural

Tanto la jerarquía como los procesos semejantes de la selección natural se hallan presentes también en la resolución humana de problemas, un ámbito que aparentemente no guarda una relación directa con la evolución biológica. Considérese, por ejemplo, la tarea de hallar la demostración de un teorema complejo. El proceso se puede comparar —y de hecho se ha comparado— con la búsqueda de la salida de un laberinto. A partir de axiomas y de teoremas previamente demostrados, se ensayan varias transformaciones autorizadas por las reglas de los sistemas matemáticos con el fin de encontrar nuevas expresiones que, a su vez, son modificadas hasta que, con mucha persistencia y algo de suerte, se logra descubrir una determinada secuencia de transformaciones que permite alcanzar con éxito el objetivo perseguido.

Por lo general, dicho proceso suele requerir grandes dosis de ensayo y error. Se suelen intentar varias vías, y mientras unas se abandonan, otras se siguen hasta el final. Así, antes de dar con una solución satisfactoria, se exploran varios de los caminos posibles para hallar la salida del laberinto,

y cuanto más difícil y nuevo es un problema, mayor es la cantidad de ensayo y error que se requiere para hallarle una solución.

Por lo demás, el método de ensayo-error no es totalmente aleatorio o ciego, sino que de hecho suele ser considerablemente selectivo. Las nuevas expresiones resultantes de la transformación de las expresiones conocidas se van examinando cada vez con el fin de determinar si suponen un progreso hacia el objetivo perseguido. Mientras los indicios de progreso motivan búsquedas subsecuentes en la misma dirección, la falta de progreso sugiere el abandono de una determinada línea de investigación. La resolución de problemas requiere la aplicación *selectiva* de ensayo y error.¹⁰

Reflexionando un poco podemos ver que los indicios que, en la resolución de problemas, señalan el progreso, juegan el mismo papel que las formas intermedias en el proceso evolutivo biológico. De hecho, podemos retomar la metáfora del relojero y aplicarla también a la resolución de problemas pues, en este último caso, cualquier resultado parcial indicativo de la existencia de un progreso evidente hacia el objetivo perseguido juega el mismo papel que un componente estable.

Supongamos que nuestro propósito sea abrir una caja fuerte cuya cerradura tenga 10 ruedecillas, cada una con 100 posiciones posibles, numeradas del 0 al 99. ¿Cuánto tiempo tardaremos en abrir la caja fuerte buscando ciegamente la combinación correcta por ensayo-error? Puesto que de entrada existen 100^{10} combinaciones posibles, podemos estimar que en promedio tendremos que comprobar la mitad de ellas antes de encontrar la combinación correcta, es decir, cincuenta trillones de combinaciones distintas. Supongamos que la caja fuerte es defectuosa de modo que podemos oír un clic cuando cada una de las ruedecillas llega a su posición correcta. En este caso, cada una de las ruedecillas se puede ajustar de manera independiente y no hay necesidad de tocarla cuando se ajusten las que faltan. El número total de combinaciones que hay que

10 Véase A. Newell, J. C. Shaw y H. A. Simon, «Empirical Explorations of the Logic Theory Machine», *Proceedings of the 1957 Western Joint Computer Conference*, febrero de 1957 (Nueva York: Institute of Radio Engineers); «Chess-Playing Programs and the Problem of Complexity», *IBM Journal of Research and Development* 2 (octubre de 1958), págs. 320-335; y para una visión parecida de la resolución de problemas, W. R. Ashby, «Design for an Intelligence Amplifier», págs. 215-233 en C. E. Shannon and J. M. McCarchy, *Automata Studies* (Princeton: Princeton University Press, 1956).

probar es solamente 10 x 50, o sea, 500. La tarea de abrir la caja fuerte ha pasado de ser prácticamente imposible a ser trivial, gracias a las pistas que dan los clics.¹¹

En los últimos treinta años se ha avanzado de manera notable en el conocimiento de la naturaleza intrínseca de los laberintos que representan las tareas de resolución humana de problemas —por ejemplo, hallar la demostración de teoremas, resolver acertijos, jugar al ajedrez, realizar inversiones o racionalizar cadenas de montaje, por mencionar sólo unos pocos—. Todo lo que hemos aprendido acerca de dichos laberintos apunta en la misma dirección: esto es, que en la resolución humana de problemas, desde la más torpe a la más fina, no se requiere otra cosa que alguna combinación de ensayo y error y selectividad. La selectividad proviene de una serie de reglas de sentido común —o heurísticas— que sugieren cuáles son las vías que hay que intentar para empezar y cuáles parecen más prometedoras. No necesitamos postular procesos más sofisticados que los que conlleva la evolución orgánica para explicar cómo pasar de enormes laberintos a laberintos de tamaño razonable (véanse también los capítulos 3 y 4).¹²

Las fuentes de la selectividad

Cuando examinamos las fuentes de las que tanto los sistemas de resolución de problemas como el sistema evolutivo obtienen su

11 El ejemplo de la caja fuerte me lo sugirió D. P. Simon. Ashby, «Design for an Intelligence Amplifier», p. 230, ha denominado *selección por componentes* a la selectividad que tiene lugar en este tipo de situaciones. La notable reducción de tiempo que se logra gracias a la jerarquización en el ejemplo de la caja fuerte, comparada con la metáfora del relojero, se debe a que en el primer caso se produce una búsqueda aleatoria de la combinación correcta, mientras que en este último las distintas piezas se van uniendo siguiendo un orden determinado. Aunque no está claro cuál de las dos metáforas constituye un mejor modelo para explicar la evolución biológica, lo cierto es que la metáfora del relojero proporciona un cálculo excesivamente conservador acerca del ahorro que se deriva de la jerarquización. La caja fuerte puede producir una estimación excesivamente alta porque supone que todas las posibles combinaciones de elementos son igualmente probables. Para la aplicación de una variante de los argumentos del relojero y de la caja fuerte a las estructuras moleculares, véase J. D. Watson, *Molecular Biology of the Gene*, 3a edición, (Menlo Park, CA: W. A. Benjamin, 1976), págs. 107-108.

12 A. Newell y H. A. Simon, «Computer Simulation of Human Thinking», *Science* 134 (22 de diciembre de 1961), págs. 2011-2017.

selectividad, descubrimos que la selectividad siempre puede equipararse con algún tipo de retroalimentación informativa procedente del entorno inmediato.

De entrada, vamos a examinar el caso de la resolución de problemas. Hay dos tipos principales de selectividad. Uno ya lo habíamos señalado anteriormente y consiste en poner a prueba distintas vías de resolución, registrar posteriormente los resultados de su aplicación y utilizar la información obtenida para orientar la búsqueda subsiguiente. Del mismo modo, la evolución orgánica da lugar a una serie de sistemas complejos, por lo menos de modo efímero, y los que son estables sirven como unidades básicas para sucesivas construcciones. Es precisamente la información sobre las configuraciones estables, y no la energía libre o neguentropía procedente del Sol, la que guía el proceso evolutivo y proporciona la selectividad necesaria para explicar su velocidad.

La segunda fuente de selectividad en la resolución de problemas es la experiencia previa, un aspecto que se pone claramente de manifiesto cuando el problema que se desea resolver es parecido a otro que ya se ha resuelto anteriormente. Por consiguiente, mediante la mera repetición de las distintas vías que anteriormente llevaron a la solución correcta, o a sus análogas, la búsqueda por ensayo y error se ve notablemente reducida si no totalmente eliminada. Llegados a este punto podemos preguntarnos: ¿a qué corresponde este segundo tipo de evolución en el caso de la evolución orgánica? La analogía más parecida es la reproducción. Una vez estamos en el nivel de los sistemas autorreproductivos, cuando se logra un sistema complejo, éste se puede multiplicar indefinidamente. De hecho, la reproducción permite heredar características adquiridas, pero sólo en el nivel del material genético; es decir, sólo las características que han heredado los genes se pueden a su vez transmitir y heredar (en el último apartado de este capítulo retomaremos el tema de la reproducción).

Acerca de los imperios y de la construcción de imperios

No hemos agotado todas las categorías de sistemas complejos a las que se puede aplicar razonablemente la metáfora del relojero. Por ejemplo, tras construir su propio imperio macedonio, Filipo lo legó a su hijo, que se

combinó después con componente persa y otros componentes para formar el macrosistema de Alejandro. A la muerte de Alejandro, su sistema no se hizo añicos sino que se fragmentó en algunos de los mayores subsistemas que lo conformaban.

Uno de los corolarios de la metáfora del relojero es que, si una persona quisiera ser Alejandro Magno, tendría que nacer en un mundo en que existieran grandes sistemas políticos estables. El mismo Alejandro, en los casos en que no se cumplía dicha condición, como por ejemplo en las fronteras de Escitia e India, se encontró con que la construcción de su imperio se convertía en una empresa complicada. Del mismo modo, cuando T. E. Lawrence organizó la sublevación de los árabes contra los turcos se vio limitado por la naturaleza de sus mayores y más estables elementos de construcción: las recelosas y dispersas tribus del desierto.

Por lo general, los historiadores profesionales suelen dar un valor mayor a los hechos particulares y contrastados que a la generalización tendenciosa. No voy a elucubrar más y dejaré para los historiadores el decidir si se puede aprender algo para interpretar la historia desde una teoría abstracta de sistemas jerárquicos complejos.

Conclusión: la explicación evolutiva de la jerarquía

Hasta ahora hemos visto que los sistemas complejos evolucionan mucho más rápido a partir de sistemas sencillos si existen formas intermedias que si no las hay. En el primer caso, las formas complejas resultantes serán jerárquicas. Asimismo, basta con invertir el argumento para explicar la evidente primacía de la organización jerárquica en los sistemas complejos presentes en la naturaleza. Entre todas las formas complejas posibles, las jerárquicas son las que tienen el tiempo suficiente para evolucionar. La hipótesis de que la complejidad siempre es necesariamente jerárquica no distingue entre jerarquías muy planas, como los cristales, los tejidos o los polímeros, y las formas intermedias. De hecho, en los sistemas complejos presentes en la naturaleza encontramos múltiples ejemplos de ambos tipos. Una teoría más completa que la que aquí hemos desarrollado podría en principio decir algo sobre los aspectos que determinan la amplitud de estos sistemas.

LOS SISTEMAS CUASI-DESCOMPONIBLES

En los sistemas jerárquicos podemos distinguir entre las interacciones que se producen *entre* los subsistemas implicados y las interacciones que se producen *dentro* de dichos subsistemas, es decir, entre los distintos elementos que los conforman. Es posible que las interacciones que se producen a estos distintos niveles puedan ser —y muy a menudo de hecho lo son— de diferentes ordenes de magnitud. En una organización formal existirá en promedio un mayor nivel de interacción entre dos empleados que sean miembros del mismo departamento que entre dos empleados que pertenezcan a departamentos distintos. En las sustancias orgánicas las fuerzas intermoleculares serán por lo general más débiles que las fuerzas moleculares, y a su vez las fuerzas moleculares más débiles que las nucleares.

En un gas inerte las fuerzas intermoleculares suelen ser insignificantes comparadas a las fuerzas que mantienen las moléculas unidas —en muchos casos podemos tratar las distintas partículas como si fueran independientes unas de las otras—. Podemos describir este tipo de sistema como un sistema *descomponible* en subsistemas formados por las partículas individuales que lo constituye. A medida que el gas aumenta de densidad, las interacciones moleculares se vuelven más significativas. En ciertos rangos, podemos tratar el caso descomponible como límite y como una primera aproximación. Podemos servirnos de la teoría de los gases perfectos, por ejemplo, para realizar una descripción aproximada del comportamiento de dichos gases si no son demasiado densos. Como una segunda aproximación podemos recurrir a una teoría de *sistemas cuasi-descomponibles* en que las interacciones entre los distintos subsistemas sean débiles pero no desestimables.

Al menos algunos sistemas jerárquicos pueden ser abordados de manera satisfactoria como sistemas cuasi-descomponibles. Los principales hallazgos teóricos de dicho fenómeno se pueden resumir en dos principios básicos: 1) en un sistema cuasi-descomponible el comportamiento a corto plazo de cada uno de los subsistemas que lo componen es aproximadamente independiente del comportamiento a corto plazo del resto de los componentes; 2) a largo plazo, el comportamiento de cualquiera de los componentes depende únicamente

de modo subsidiario del comportamiento del resto de los componentes.

A continuación vamos a ver un ejemplo concreto y sencillo de sistema cuasi-descomponible.¹³ Tomemos un edificio cuyas paredes exteriores proporcionen un aislamiento térmico perfecto y consideremos dichas paredes como los límites de nuestro sistema. El edificio está dividido en un gran número de habitaciones separadas por paredes medianeras que proporcionan un aislamiento térmico relativamente bueno pero no perfecto. Las paredes medianeras son los límites de nuestros subsistemas principales. Finalmente, cada habitación está dividida en una serie de cubículos mediante unos tabiques que proporcionan un aislamiento bastante precario. En cada uno de los cubículos hay un termómetro. Supongamos ahora que al realizar nuestra primera observación del sistema detectamos una gran diferencia de temperatura entre los cubículos y las distintas habitaciones que indican que los cubículos que constituyen el edificio se hallan en un estado de desequilibrio térmico. ¿Qué encontraremos cuando unas horas más tarde volvamos a revisar los termómetros? Habrá poca diferencia de temperatura entre los cubículos de cada habitación, pero posiblemente haya todavía variaciones de temperatura importante *entre* las habitaciones. Cuando unos días más tarde volvamos a revisar los termómetros, encontraremos que todo el edificio presenta una temperatura prácticamente uniforme; las diferencias entre las habitaciones han desaparecido por completo.

El anterior proceso de equilibrio se puede describir formalmente, mediante ecuaciones de flujo térmico. Las ecuaciones se pueden representar como una como una matriz de sus coeficientes, r_{ij} , donde r_{ij} es la tasa a la cual el calor se desplaza entre el cubículo i y el cubículo j por grado de diferencia en sus respectivas temperaturas. Así, si los cubículos i

13 Esta exposición de la cuasi-descomponibilidad se ha basado en el artículo de H. A. Simon y A. Ando, «Aggregation of Variables in Dynamic Systems», *Econometrica* 29 (Abril de 1961), págs. 111-138, y el ejemplo proporcionado se ha sacado de la misma fuente, págs. 117-118. Para un ulterior desarrollo y aplicación de dicha teoría véase P. J. Courtois, *Descomposability: Queueing and Computer System Applications* (Nueva York: Academic Press, 1977); Y. Iwasaki y H. A. Simon, «Causality and Model Abstraction», *Artificial Intelligence* 67 (1994), págs. 143-194; y D. F. Rogers y R. D. Plante, «Estimating Equilibrium Probabilities for Band Diagonal Markov Chains Using Aggregation and Disaggregation Techniques», *Computers in Operations Research* 20 (1993), págs. 857-877.

y j no tienen un tabique en común, r_{ij} será cero. Si los

	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3
A1	—	100	—	2	—	—	—	—
A2	100	—	100	1	1	—	—	—
A3	—	100	—	—	2	—	—	—
B1	2	1	—	—	100	2	1	—
B2	—	1	2	100	—	—	1	2
C1	—	—	—	2	—	—	100	—
C2	—	—	—	1	1	100	—	100
C3	—	—	—	—	2	—	100	—

Figura 7. Ilustración de un hipotético sistema cuasi-descomponible. En términos del ejemplo del intercambio térmico mencionado, los recuadros A1, A2 y A3 se podrían leer como los cubículos que hay en una habitación, B1 y B2 como los cubículos en la segunda habitación y C1, C2 y C3 como los cubículos en una tercera habitación. Por consiguiente, las entradas de la matriz son los coeficientes de difusión de calor entre los distintos cubículos:

A1	B1	C1
A2		C2
A3	B2	C3

cubículos i y j comparten un tabique y se hallan en la misma habitación, r_{ij} será grande. Si los cubículos i y j están separados por una pared medianera, r_{ij} será pequeño y distinto de cero. Por tanto, si agrupamos todos los cubículos que se hallan en la misma habitación podemos organizar la matriz de coeficientes de tal modo que sus elementos mayores se alineen en una secuencia de submatrices cuadradas sobre la diagonal principal. Los elementos que no estén en estos recuadros de la diagonal serán cero o pequeños (véase figura 7). Podemos tomar un número pequeño, ϵ , como la cota superior de los elementos fuera de la diagonal. A una matriz con estas propiedades la denominaremos *matriz cuasi-descomponible*.

Se ha demostrado que un sistema dinámico que se pueda describir como una matriz cuasi-descomponible tiene las propiedades de un sistema cuasi-descomponible que expusimos antes. En nuestro sencillo ejemplo de flujo térmico ello implica que a corto plazo cada habitación alcanzará una temperatura de equilibrio (la media de las temperaturas iniciales de sus cubículos) de modo prácticamente independiente al resto y que cada habitación permanecerá aproximadamente en un estado de equilibrio a lo largo del período más prolongado en que tardará en establecerse en todo el edificio un equilibrio de temperatura. Una vez alcanzado el equilibrio a corto plazo en el interior de las habitaciones, basta con tener un único termómetro en cada habitación para describir el comportamiento dinámico de todo el sistema, por lo que la presencia de termómetros en cada uno de los cubículos resultará superflua.

La cuasi-descomponibilidad de los sistemas sociales

Como se puede apreciar en la figura 7, la cuasi-descomponibilidad es una propiedad bastante fuerte para una matriz, y las matrices que tengan esta propiedad permiten describir sistemas dinámicos de naturaleza muy especial —una cantidad ínfima de sistemas con respecto a todos los concebibles—. Obviamente, el número de ellos dependerá del grado de aproximación que queramos obtener. Si exigimos que ϵ sea muy pequeña, muy pocos sistemas dinámicos cabrán en la definición. Pero como ya hemos observado anteriormente, en el mundo natural los sistemas cuasi-descomponibles no resultan precisamente escasos. Todo lo contrario, aún resultan más raros y menos típicos aquellos sistemas cuyas distintas variables mantienen un vínculo igualmente estrecho con casi todas las demás partes.

En la dinámica económica, las principales variables son los precios y las cantidades de los bienes. Es empíricamente verdadero que el precio de cualquier producto y la tasa a la cual se comercializa dependen en gran medida de los precios y las cantidades de otros pocos bienes así como de unas cuantas magnitudes agregadas como el nivel medio de precios u otra medida global de la actividad económica. Por lo general, los principales coeficientes de asociación están ligados con los flujos principales de materias primas y productos semiterminados en y entre las industrias.

Una matriz *input-output* [insumo-producto] de la economía con las magnitudes de sus flujos revela la estructura cuasi-descomponible del sistema, con una única salvedad. Hay un subsistema de consumo de la economía que está estrechamente relacionado con variables de la mayoría de los otros subsistemas. Por consiguiente, tenemos que modificar ligeramente nuestras nociones de descomponibilidad para explicar el papel peculiar que desempeña el subsistema de consumo en nuestro análisis del comportamiento dinámico de la economía.

En la dinámica de los sistemas sociales, en los que los miembros de un determinado sistema se comunican e influyen en otros miembros, la cuasi-descomponibilidad suele tener una importante presencia. Ello resulta mucho más obvio en las organizaciones formales, donde la relación de autoridad formal conecta a cada miembro de la organización con un superior inmediato y con un pequeño número de subordinados. Desde luego, gran parte de la comunicación que se produce en el seno de una organización determinada sigue otros canales que los propios de la autoridad formal, pero la mayoría de dichos canales van de un individuo concreto a un número muy limitado de sus superiores, subordinados o colaboradores. Por tanto, los límites entre departamentos juegan un papel similar a las paredes del anterior ejemplo del flujo térmico.

Los sistemas fisicoquímicos

En los sistemas complejos propios de la bioquímica se puede observar claramente la existencia de estructuras parecidas. Tomemos los núcleos atómicos en uno de esos sistemas como sus partes elementales y construyamos una matriz de las fuerzas de enlace entre sus elementos. Habrá elementos de la matriz con órdenes de magnitud bastante diferentes. Los de mayor magnitud, por lo general, corresponden a los enlaces covalentes, los siguientes a los enlaces iónicos, el tercer grupo a los enlaces de hidrógeno, y los enlaces menores a las fuerzas de van der Waals.¹⁴ Si tomamos un ϵ ligeramente menor que la magnitud de

¹⁴ Para un estudio de los distintos tipos de fuerzas moleculares e intermoleculares así como de sus energías de disociación, véase Setlow y Pollard, *Molecular Biophysics*, cap. 6. Las energías de los enlaces covalentes típicos son del orden de 80-100 Kcal./mol, y las de los enlaces de hidrógeno de 10 Kcal./mol, mientras que los enlaces iónicos suelen hallarse entre estos dos valores como consecuencia del hecho que las fuerzas de van der

un enlace covalente, el sistema se descompondrá en distintos subsistemas formados por las moléculas. Los enlaces de menor magnitud corresponderán a los enlaces intramoleculares.

Es bien sabido que las vibraciones de alta energía y alta frecuencia corresponden a los subsistemas físicos menores mientras que las vibraciones de baja frecuencia corresponden a los sistemas de mayores dimensiones en los que están integrados dichos subsistemas. Así por ejemplo, las frecuencias de radiación propias de las vibraciones moleculares son mucho menores que las relativas a las vibraciones de los electrones planetarios de los átomos; las últimas son inferiores a las que tienen lugar en los procesos nucleares.¹⁵ Los sistemas moleculares son sistemas cuasi-descomponibles donde las dinámicas de corto plazo se relaciona con las estructuras internas de los subsistemas, y la dinámica de largo plazo con las interacciones entre dichos subsistemas.

La validez de muchas aproximaciones usadas en física depende de la cuasi-descomponibilidad de los sistemas que estudian. La teoría de la termodinámica de los procesos irreversibles, por ejemplo, parte del supuesto de un desequilibrio macroscópico pero de un equilibrio microscópico, precisamente la misma situación que se ha descrito en el anterior ejemplo de flujo térmico.¹⁶ Igualmente, los cálculos que se realizan en mecánica cuántica suelen realizarse tratando las interacciones débiles como susceptibles de provocar perturbaciones en un sistema de interacciones fuertes.

Algunas observaciones sobre la amplitud jerárquica

Para entender por qué la amplitud jerárquica puede llegar a ser en

Waals poseen una energía inferior.

15 A continuación se reseñan las magnitudes de onda para las vibraciones vinculadas a distintos sistemas (la magnitud de onda es recíproca a la de longitud de onda, y por consiguiente proporcional a la frecuencia):

Cable de acero bajo tensión: entre 10^{-10} y 10^{-9} cm^{-1}

Rotaciones moleculares: entre 10^0 y 10^2 cm^{-1}

Vibraciones moleculares: entre 10^2 y 10^3 cm^{-1}

Electrones planetarios: entre 10^4 y 10^5 cm^{-1}

Rotaciones nucleares: entre 10^9 y 10^{10} cm^{-1}

Vibraciones nucleares superficiales: entre 10^{11} y 10^{12} cm^{-1}

16 S. R. de Groot, *Thermodynamics of Irreversible Processes* (Nueva York: Interscience Publishers, 1951), págs. 11-12.

ocasiones muy grande —como en el caso de los cristales— y a veces pequeña, necesitamos analizar con mayor detalle las interacciones. En general, la consideración crucial suele ser determinar el alcance en que la interacción entre dos (o unos cuantos) subsistemas excluye la interacción de dichos subsistemas con el resto. Veamos unos ejemplos de la física para empezar.

Tomemos por ejemplo un gas de moléculas idénticas cada una de las cuales puede establecer determinados tipos de enlaces covalentes con otras. Supongamos a continuación que a cada uno de sus átomos le asignamos un número determinado en función de los enlaces que es capaz de mantener de manera simultánea (obviamente, este número concreto está relacionado con el valor que solemos denominar valencia). Y finalmente supongamos que luego se unen dos átomos y que a dicha combinación también le podemos asignar un número concreto que equivale a los enlaces externos que es capaz de mantener. Si dicho número es el mismo que el número asignado a los dos átomos por separado, el proceso de enlace puede seguir produciéndose indefinidamente: átomos pueden formar cristales o polímeros de extensión arbitrariamente grande. Si el número de enlaces que es capaz de establecer este conjunto compuesto es menor al número asociado con cada una de las partes, el proceso de aglomeración se detiene.

Nos basta con mencionar algunos ejemplos elementales. Los gases comunes no muestran ninguna tendencia a aglomerarse pues el enlace múltiple de sus átomos «gasta» su capacidad de interacción. Mientras que cada uno de los átomos de oxígeno posee una valencia igual a 2, las moléculas de O_2 tienen valencia 0. Por el contrario, se pueden construir cadenas arbitrariamente largas de átomos de carbono de un solo enlace porque la valencia de una cadena de cualquier número de esos átomos, cada uno con dos grupos laterales, es exactamente 2.

Vamos a ver qué sucede si tenemos un sistema de elementos que posee capacidades de interacción tanto débil como fuerte y cuyos enlaces fuertes presentan una capacidad de combinación limitada. En dicho caso se formarán subsistemas hasta que la capacidad de establecer interacciones fuertes se haya consumido en el proceso de construcción. Entonces, los subsistemas se unirán entre sí mediante enlaces débiles de segundo orden para formar sistemas mayores. Por ejemplo, una molécula de agua tiene esencialmente una valencia 0, puesto que todos sus enlaces

covalentes potenciales están totalmente ocupados por la interacción entre las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, la geometría propia de dicha molécula crea un dipolo eléctrico que permite que se establezca una interacción débil entre el agua y las sales que se hallan disueltas en ella; de ahí fenómenos tales como su conductividad electrolítica.¹⁷

Igualmente se ha observado que aunque las fuerzas eléctricas son mucho más potentes que las gravitatorias, éstas últimas son mucho más importantes que las primeras en los sistemas que poseen una escala astronómica. La explicación, por supuesto, es que las fuerzas eléctricas, al ser bipolares, se «consumen» en los enlaces de los subsistemas menores y que en las regiones de tamaño macroscópico no se suéter encontrar balances netos entre cargas positivas y negativas que sean significativos.

En los sistemas sociales, como en los físicos, la interacción simultánea entre un elevado número de subsistemas suele estar limitada. En el ámbito social, estos límites están relacionados con el hecho de que los seres humanos son más bien procesadores de información seriales más que paralelos. Una persona puede mantener sólo una conversación a la vez y aunque esto no limita el tamaño de la audiencia a la que se puede dirigir una comunicación de masas, sí restringe el número de personas que participan simultáneamente en casi todas las demás formas de interacción social. Además de los requisitos que impone la interacción directa, la mayoría de los roles impone tareas y responsabilidades que toman su tiempo. Uno no puede, por ejemplo, desempeñar el papel de «amigo» con un gran número de personas.

Probablemente es cierto que tanto en los sistemas sociales como en los físicos la dinámica de alta frecuencia está asociada con subsistemas mientras que la de baja frecuencia con sistemas mayores. Existe la creencia de que el horizonte de planificación de los cuadros superiores suele ser más amplio cuanto más elevada es la posición que ocupan en la jerarquía organizativa a la que pertenecen. Y probablemente también sea cierto que tanto la duración media de una interacción entre ejecutivos y el intervalo medio entre interacciones son mayores en los niveles altos que en los inferiores.

¹⁷ Véase por ejemplo, L. Pauling, *General Chemistry* (San Francisco: W. H. Freeman, 2.ª ed., 1953), capítulo 15.

Resumen: la cuasi-descomponibilidad

Como hemos podido observar, las jerarquías poseen la propiedad de la cuasi-descomponibilidad. Los vínculos intracomponentes por lo general son más fuertes que los vínculos intercomponentes. Este hecho tiene el efecto de separar la dinámica de alta frecuencia de una jerarquía —que tiene lugar en la estructura interna de los componentes— de la dinámica de baja frecuencia —que conlleva interacciones entre componentes—. A continuación veremos algunas consecuencias de esta separación que son importantes para la descripción y el entendimiento de los sistemas complejos.

LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA, NUEVAMENTE

Después de haber examinado las propiedades de los sistemas cuasi-descomponibles, podemos completar nuestra reflexión acerca de la evolución por especialización de tejidos y órganos en organismos pluricelulares. Un órgano realiza un conjunto específico de funciones, cada una de las cuales requiere una interacción continua entre sus partes constitutivas (una secuencia de reacciones químicas, digamos, en la que para la ejecución de cada paso se usa una determinada enzima). Dicho órgano obtiene materias primas de otras partes del organismo y entrega productos a otras partes. Pero estos procesos de entrada y salida dependen solamente de manera agregada de lo que sucede en cada órgano en particular. Como una empresa en un mercado económico, cada órgano puede realizar sus propias funciones en dichosa ignorancia de los detalles de las actividades específicas de otros órganos con los que está conectado a través de los sistemas digestivo, circulatorio, excretor y otros canales de transporte.

Para decirlo en otras palabras, los cambios que tienen lugar en el interior de un determinado órgano afectan a las otras partes del organismo principalmente al cambiar la relación entre las cantidades de los *outputs* que producen y los *inputs* que requieren, es decir, su eficiencia global. Por tanto, los organismos biológicos son cuasi-descomponibles: las interacciones *dentro* de las unidades en cualquier nivel son rápidas e intensas en comparación con las interacciones *entre*

unidades del mismo nivel. Los inventarios de diversas sustancias que se almacenan en el sistema circulatorio o en tejidos especiales frenan y atenúan los efectos de cada unidad sobre las demás. A corto plazo, las unidades singulares (por ejemplo, los órganos singulares) operan de manera casi independiente de los detalles de operación de las otras unidades.

En el marco darwinista de la selección natural, no hay forma en que se pueda evaluar por separado la aptitud (eficiencia) de los órganos o tejidos individuales; la aptitud se mide por el número de descendientes de todo el organismo. La evolución es como un experimento complejo cuya única variable dependiente es la aptitud y cuyas variables independientes son las estructuras de los genes individuales. El objetivo del proceso es comparar la contribución a la aptitud global de las formas alternativas (alelos) de cada gen —y de la combinación de estas alternativas para conjuntos de genes.

Si la aptitud de un gen particular dependiera de los alelos de los otros genes con los que se hubiese combinado, la combinatoria, que en organismos complejos incorpora decenas de miles de genes, sería gigantesca y el problema de medir la aportación concreta de un alelo a dicha aptitud sería abrumadora.¹⁸

Gracias a la cuasi-descomponibilidad podemos suponer que la eficiencia *relativa* de dos diseños distintos del mismo órgano (por ejemplo, dos secuencias distintas de genes con la misma función) es aproximadamente independiente de qué variantes de otros órganos se presentan en ese organismo. Esencialmente, logramos las ventajas de la caja fuerte; la posición correcta de cada ruedecilla (los genes que controlan los procesos de un órgano) se puede determinar independientemente de la posición que tengan las otras ruedecillas. Se buscan conjuntos efectivos de órganos y no conjuntos efectivos de genes individuales.

Actualmente se sabe lo suficiente sobre la arquitectura del genoma como para poder estar razonablemente seguros de que éste posee una

18 Suponiendo que hubiera sólo dos alelos para cada N genes, deberíamos evaluar 2^N alternativas mediante selección natural lo que, en la metáfora del relojero, equivaldría a montar 2^N piezas sin interrupción. Para un organismo que tuviera por ejemplo mil genes, el cambio mediante la selección natural sería extremadamente lento, incluso a escala geológica.

estructura de control jerárquica que se corresponde con bastante exactitud a la jerarquía propia de los procesos que tienen lugar en el organismo.¹⁹ Obviamente, esto es una simplificación de lo que sucede en realidad en cualquier organismo. Además de los genes que se expresan en órganos particulares (que son activados o desactivados por genes de control), también existen los genes que determinan los procesos metabólicos de orden más general dentro de las células. Sin embargo, estos procesos intracelulares se producen en el nivel celular de la jerarquía, por debajo del nivel de los tejidos y de los órganos, y nuevamente se puede suponer que los genes correspondientes funcionan de un modo prácticamente independiente de los que controlan los procesos especializados que tienen lugar en el interior de órganos en particular.²⁰

LA DESCRIPCIÓN DE LA COMPLEJIDAD

Si se le pide a una persona que dibuje un objeto complejo, por ejemplo un rostro, procederá casi siempre de manera jerárquica.²¹ Primero dibujará el contorno de la cara. Después añadirá rasgos: ojos, nariz, boca, orejas y pelo. Si se le pide que lo elabore más, empezará a añadir detalles a cada uno de los rasgos —pupilas, cejas, pestañas en los ojos, etcétera— basta que alcance los límites de sus conocimientos anatómicos. La información que tiene sobre el objeto está organizada jerárquicamente en su memoria, como en la tabla de contenidos de un libro.

Cuando la información se representa como un diagrama, es fácil

19 F. Jacob y J. Monod, «Genetic Regulatory Mechanisms in the Synthesis of Proteins» *Molecular Biology* 3 (1961) págs. 318-356.

20 El modo en que las estructuras jerárquicas de este tipo se pueden introducir en los algoritmos genéticos que vimos en el capítulo 7, con el fin de acelerar su velocidad de aprendizaje o de evolución, se analiza con mayor profundidad en John H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (Ann Arbor, MI: The University of Michigan Press, 1975). Véanse concretamente págs. 167-168 y 152-153.

21 George A. Miller, tras recopilar una serie de protocolos de personas a las que se les pidió que dibujaran rostros, concluye que se comportan del mismo modo que se describe aquí (comunicación personal). Véase también E. H. Gombrich, *Art and Illusion* (Nueva York: Pantheon Books, 1960), págs. 291-296.

incluir información sobre las relaciones entre las principales partes, así como información sobre las relaciones internas de las partes en cada uno de los subdiagramas. La información detallada sobre las relaciones de las subpartes que pertenecen a diferentes partes no vienen al caso en el diagrama y se tiende a perder. La pérdida de dicha información y la preservación de información sobre el orden jerárquico principalmente es una de las características distintivas que diferencian el dibujo de un niño o de alguien lego en la representación gráfica frente al dibujo de un artista experimentado —hablo de un artista que pretende ser realista.

La cuasi-descomponibilidad y la inteligibilidad

En nuestra anterior exposición acerca de las propiedades dinámicas de los sistemas cuasi-descomponibles hemos podido constatar que, al representarlos de forma jerárquica, se pierde una cantidad relativamente pequeña de información. Las subpartes que pertenecen a partes diferentes sólo interactúan de un modo agregado; los detalles de su interacción se pueden ignorar. Al estudiar la interacción entre dos moléculas grandes por lo general no necesitamos tener en cuenta en detalle las interacciones en el núcleo de los átomos de una molécula con los núcleos de los átomos de las otras. Al estudiar la interacción entre dos naciones no necesitamos estudiar en detalle las interacciones que mantiene cada uno de los ciudadanos de una de las naciones con cada uno de los ciudadanos de la otra.

El hecho de que muchos sistemas complejos presenten una estructura jerárquica cuasi-descomponible nos facilita entender, describir e incluso «visualizar» tales sistemas y sus partes. O tal vez la proposición se podría poner a la inversa. Si en el mundo existen sistemas importantes que son complejos sin ser jerárquicos, pueden escapar en gran medida a nuestra observación y a nuestra comprensión. El análisis de su comportamiento requeriría un conocimiento y un cálculo tan pormenorizados de las interacciones entre sus partes constitutivas, que estarían más allá de nuestras capacidades de memoria o de cálculo.²²

22 Creo que la falacia en que se basa la tesis principal de W. M. Elsasser en *The Physical Foundation of Biology*, que ya se ha mencionado anteriormente, radia precisamente en

No voy a tratar de resolver quién es la gallina y quién el huevo: si somos capaces de entender el mundo porque es jerárquico o si nos parece jerárquico porque los aspectos del mundo que no son jerárquicos escapan a nuestra capacidad de comprensión y observación. En las páginas precedentes ya di algunas razones que permiten suponer que la primera es al menos parte de la verdad —la complejidad que evoluciona tiende a ser jerárquica— pero tal vez no sea toda la verdad.

Descripciones sencillas de sistemas complejos

Uno esperaría que la descripción de un sistema complejo consistiera a su vez en una estructura compleja de símbolos, y de hecho puede ser el caso. Pero no existe ninguna ley de conservación que requiera que la descripción de un objeto determinado deba ser tan engorrosa como el objeto que se intenta describir. A continuación daré un ejemplo trivial que puede contribuir a mostrar hasta qué punto es posible describir un sistema cualquiera de un modo relativamente económico. Así, dado por ejemplo un sistema formado por el siguiente arreglo bidimensional:

que obvia por completo la simplificación en la descripción de los sistemas complejos que resulta de su estructura jerárquica. Por consiguiente (p. 155):

Si ahora aplicamos argumentos similares al acoplamiento entre las reacciones enzimáticas y el sustrato de moléculas de proteína, podemos observar que a lo largo de un período de tiempo suficiente, la información que corresponde a los detalles estructurales de dichas moléculas se comunicará a la dinámica de la célula, a niveles de organización superiores, y puede que incluso influya de modo determinante en su dinámica. Aunque este razonamiento es únicamente cualitativo, contribuye a otorgar cierta validez a la consideración de que en los organismos vivos, a diferencia de los cristales inorgánicos, no se puede calcular el promedio de efectos de su estructura microscópica pues, con el tiempo, estos efectos acabarán dominando el comportamiento de la célula «a todos los niveles».

Sin embargo, de nuestra presentación acerca de la cuasi-descomponibilidad podría desprenderse que aquellos aspectos de la microestructura que controlan los aspectos de desarrollo lento de la dinámica de los organismos se pueden distinguir de los que controlan los procesos metabólicos celulares, bastante más rápidos. Por ello no deberíamos perder la esperanza de lograr deslindar el entramado de causas que los producen. Véase también la reseña de J. R. Platt al libro de Elsasser en *Perspectives in Biology and Medicine* 2 (1959), págs. 243-245.

A B M N R S H I
C D O P T U J K
M N A B H I R S
O P C D J K T U
R S H I A B M N
T U J K C D O P
H I R S M N A B
J K T U O P C D

Digamos que la matriz $\begin{vmatrix} AB \\ CD \end{vmatrix}$ es a , la $\begin{vmatrix} MN \\ OP \end{vmatrix}$ es m , la matriz $\begin{vmatrix} RS \\ TU \end{vmatrix}$ es r y la matriz $\begin{vmatrix} HI \\ JK \end{vmatrix}$ es h . Si llamamos a la matriz $\begin{vmatrix} am \\ ma \end{vmatrix}$ w , y a la matriz $\begin{vmatrix} rh \\ hr \end{vmatrix}$ x , la matriz global será sencillamente $\begin{vmatrix} wx \\ xw \end{vmatrix}$. Así, mientras que la estructura original de dicho sistema consistía en 64 símbolos, sólo se necesitan 35 para escribir su descripción:

$$\begin{array}{ccc}
 S = \begin{vmatrix} wx \\ xw \end{vmatrix} & & \\
 w = \begin{vmatrix} am \\ ma \end{vmatrix} & & x = \begin{vmatrix} rh \\ hr \end{vmatrix} \\
 a = \begin{vmatrix} AB \\ CD \end{vmatrix} & m = \begin{vmatrix} MN \\ OP \end{vmatrix} & r = \begin{vmatrix} RS \\ TU \end{vmatrix} \quad h = \begin{vmatrix} HI \\ JK \end{vmatrix}
 \end{array}$$

Finalmente, terminaremos la abreviación aprovechando la redundancia, presente en la estructura original. Así, como el patrón $\begin{vmatrix} AB \\ CD \end{vmatrix}$ por ejemplo, aparece cuatro veces en el patrón global, resulta económico representarlo mediante un único símbolo, a .

Si una estructura compleja no posee ningún tipo de redundancia —si ningún aspecto de su estructura se puede inferir de ningún otro— entonces ella misma es su descripción más sencilla. Podemos mostrarla, pero no podemos describirla mediante una estructura más simple. Las estructuras jerárquicas que hemos presentado hasta el momento poseen un elevado grado de redundancia y, por lo tanto, pueden describirse con cierta economía de medios. La redundancia suele adquirir por lo general

distintas formas de las que voy a mencionar únicamente tres:

1. Los sistemas jerárquicos suelen estar formados por unos pocos tipos distintos de subsistemas que se organizan en diferentes configuraciones y combinaciones. Un ejemplo conocido son las proteínas, cuya enorme variedad es el resultado de la recombinación de sólo veinte aminoácidos distintos. Del mismo modo, los noventa y tantos elementos básicos proporcionan todos los elementos constitutivos para producir una variedad infinita de moléculas. Por tanto, podemos construir nuestra descripción a partir de un alfabeto limitado de términos elementales que corresponden al conjunto básico de subsistemas elementales a partir de los cuales se forman los sistemas complejos.
2. Los sistemas jerárquicos, tal como ya hemos visto, son muy a menudo sistemas cuasi-descomponibles. Por ello, en las descripciones de las interacciones de sus partes intervienen solamente propiedades agregadas de esas partes. Se podría formular una generalización del concepto de cuasi-descomponibilidad en términos de la «hipótesis del mundo vacío» —la mayoría de las cosas están sólo conectadas débilmente con las demás cosas—; para una descripción aceptable de la realidad hay que tomar en cuenta solamente una pequeña fracción de todas las posibles interacciones. Al adoptar un lenguaje descriptivo que permita no tener que mencionar lo que esté ausente, se puede describir de manera muy concisa un mundo que esté casi vacío. Mother Hubbard no tenía que verificar la lista de todos los posibles objetos de su despensa para decir que estaba vacía.
3. A menudo basta una «recodificación» adecuada para poner de manifiesto la redundancia que sin ser obvia está presente en la estructura de un sistema complejo. La recodificación más común en la descripción de los sistemas dinámicos consiste en reemplazar una descripción de su curva en el tiempo con la descripción de una ley diferencial que genere dicha curva. La simplicidad radica en una relación constante entre el estado del sistema en cualquier momento dado y su estado en un momento poco después. Así, la estructura de la secuencia 1 3 5 7 9 11... se puede expresar de un modo mucho más sencillo reconociendo que cada, elemento se

obtiene sumando 2 al anterior. De hecho, ésta es la secuencia que descubrió Galileo para describir la velocidad de una pelota rodando por un plano inclinado al final de sucesivos intervalos de tiempo.

Se suele considerar que la tarea de la ciencia es servirse de la redundancia del mundo para describir ese mundo de manera más simple. No voy a discutir aquí el enfoque metodológico general pero sí me ocuparé de dos tipos importantes de descripción que parece que están disponibles cuando buscamos una comprensión de los sistemas complejos. Las llamare *descripción de estado* y *descripción de proceso* respectivamente.

Las descripciones de estado y las descripciones de proceso

«Una circunferencia es el lugar geométrico de todos los puntos equidistantes de un punto dado.» «Para trazar una circunferencia, haga girar un compás con un brazo fijo hasta que el otro brazo haya regresando al punto de partida.» Está implícito en Euclides que si uno lleva cabo el proceso especificado en el segundo enunciado, se producirá un objeto que cumple con la definición del primero. El primer enunciado es una descripción de estado de una circunferencia; el segundo, una descripción de proceso.

Estos dos modos de aprehender la mayoría de estructuras son la urdimbre y la trama de todas nuestras experiencias. Los dibujos, planos, diagramas o fórmulas de la estructura de una sustancia química son descripciones de estado. Las recetas, las ecuaciones diferenciales y las ecuaciones de reacciones químicas son descripciones de proceso. Las primeras caracterizan el mundo tal como lo percibimos y proporcionan los criterios necesarios para identificar los objetos, a menudo incluso modelándolos físicamente. Las segundas caracterizan el mundo como objeto de la acción y nos proporcionan los medios necesarios para producir o generar objetos que posean las características deseadas.

La distinción entre el mundo que se percibe y el mundo en que se actúa define la condición básica para la supervivencia de los organismos adaptativos. El organismo debe desarrollar correlaciones entre los

objetivos en el mundo que percibe y acciones en el mundo de los procesos. Cuando estas correlaciones se hacen conscientes y se verbalizan, corresponden con lo que solemos llamar análisis de medios-fines. Dado un estado deseable de los hechos y un estado real de los hechos, la tarea de un organismo adaptativo es determinar la diferencia entre ambos estados y encontrar entonces el proceso correspondiente que haga desaparecer la diferencia.²³

En este sentido, la resolución de problemas requiere una continua traducción entre las descripciones de proceso y las descripciones de estado de la misma realidad compleja. En el *Menón*, Platón dice que todo aprendizaje es recordar. No pudo explicar de otra manera cómo podemos descubrir o reconocer la respuesta a un problema si no la conocíamos de antemano.²⁴ Nuestra relación dual con el mundo es a un tiempo el origen y la solución de la paradoja. Planteamos un problema dando la descripción de estado de la solución. Nuestra tarea consiste en descubrir una secuencia de procesos que nos lleve al estado final a partir de un estado inicial. La traducción de la descripción de proceso a la descripción de estado nos permite reconocer si hemos logrado nuestro objetivo. La solución es genuinamente nueva para nosotros y para explicar cómo la reconocemos no necesitamos la teoría de la reminiscencia de Platón.

Actualmente existe una gran cantidad de datos que demuestran que esa actividad humana que suele conocerse como resolución de problemas consiste básicamente en un análisis de medios-fines cuyo objetivo final es descubrir una descripción de proceso del camino que nos lleva a un fin determinado. El paradigma principal es: dado un plano, hay que hallar el procedimiento de construcción correspondiente. Buena parte de la actividad científica consiste en la aplicación de dicho paradigma formulado en los términos siguientes: dada la descripción de un fenómeno natural cualquiera, deben hallarse las ecuaciones diferenciales de los procesos que dan lugar a dicho fenómeno.

23 Véase H. A. Simon y A. Newell, «Simulation of Human Thinking» en M. Greenberger (ed.), *Management and the Computer of the Future* (Nueva York: Wiley, 1962), págs. 95-114, especialmente de la pág. 110 en adelante.

24 *The Works of Plato*, B. Jowett, trad. (Nueva York: Dial Press, 1936), vol.3, págs. 26-35. Véase también H. A. Simon, «Brodie on Polanyi on the Meno Paradox», *Philosophy of Science* 43 (1976), págs. 147-150.

La descripción de la complejidad en los sistemas autorreproductivos

El problema de hallar descripciones relativamente sencillas para describir los sistemas complejos no sólo es crucial para lograr una mayor comprensión acerca del conocimiento humano del mundo, sino también para hallar una explicación acerca del modo en que se reproduce un sistema complejo. En mi anterior presentación de la evolución de los sistemas complejos ya apunte brevemente el tema de la autorreproducción.

Tanto los átomos que poseen un peso atómico elevado como las moléculas inorgánicas complejas son testimonios de que la evolución de la complejidad no necesariamente conlleva la autorreproducción. Así, si la evolución de la complejidad a partir de la simplicidad es suficientemente probable, se producirá de manera repetida; el equilibrio estadístico del sistema mostrará una importante fracción de las partículas elementales formando parte de sistemas complejos.

Sin embargo, si la existencia de una determinada forma compleja aumentara la probabilidad de crear otra forma exactamente igual a ella, el equilibrio entre los elementos complejos y los componentes básicos se podría ver seriamente alterado a favor de los primeros. Si tenemos una descripción de un objeto que es suficientemente clara y completa, podemos reproducir el objeto a partir de la descripción. Sea cual fuere el mecanismo exacto de reproducción, la descripción nos da toda la información necesaria.

Ya hemos visto que la descripción de los sistemas complejos puede adoptar muchas formas distintas. Podemos tener descripciones de estado o descripciones de proceso: planos o recetas. Los procesos reproductivos podrían construirse a partir de cualquiera de estas fuentes de información. Tal vez la posibilidad más sencilla es que el sistema complejo sirva como una descripción de sí mismo al modo de una plantilla a partir de la cual poder obtener una copia. Una de las teorías actuales más plausibles sobre la reproducción del ácido desoxirribonucleico (ADN) propone que una molécula de ADN, que tiene la forma de una doble hélice compuesta por dos partes complementarias cada una de las cuales es básicamente el «negativo» de la otra, se desenreda para que cada una de las dos mitades de la hélice pueda servir de plantilla para poder formar una nueva mitad

complementaria.

Por otro lado, nuestro conocimiento actual sobre cómo el ADN controla el metabolismo del organismo sugiere que la reproducción a partir de plantillas es sólo uno de los procesos que intervienen en su funcionamiento. Según la teoría más aceptada, el ADN sirve de plantilla tanto para sí mismo como para la sustancia relacionada con él, el ácido ribonucleico (ARN) que, a su vez, sirve de plantilla para las proteínas. Las proteínas —según los conocimientos que se tienen hasta la fecha— controlan el metabolismo del organismo no por medio del sistema de la plantilla sino actuando como catalizadores para gobernar las tasas de reacción en la célula. Mientras el ARN es un plano para las proteínas, las proteínas son una receta para el metabolismo.²⁵

La ontogenia recapitula la filogenia

El ADN de los cromosomas de un organismo contiene una parte, tal vez la mayor parte, de la información necesaria para determinar su desarrollo y actividad. Tal como hemos mencionado, si las teorías actuales sobre el tema resultan mínimamente correctas, la información no se halla registrada en forma de descripción de estado del organismo sino como una serie de «instrucciones» para la construcción y el mantenimiento del organismo a partir de una serie de nutrientes. Más arriba usé la metáfora de una receta; podría igualmente compararlo con un programa de cómputo, que también es una secuencia de instrucciones que controlan la construcción de estructuras simbólicas. A continuación desarrollaré algunas consecuencias de esta última comparación.

Si el material genético es un programa —visto respecto al organismo— se trata de un programa con propiedades especiales y peculiares. En primer lugar, se trata de un programa autorreproductivo; ya hemos considerado antes su posible mecanismo de copiado. En segundo lugar, es un programa que se ha desarrollado como

25 En C. B. Anfinsen, *The Molecular Basis of Evolution* (Nueva York, 1959), capítulos 3 y 10, se presenta de manera más matizada esta simplificada y esquemática exposición. Para un análisis imaginativo sobre algunos de los mecanismos de descripción de procesos que podrían controlar la estructura molecular, véase H. H. Pattee, «On the Origin of Macromolecular Sequences», *Biophysical Journal* 1 (1961), págs. 683-710.

consecuencia de una evolución darwiniana. De acuerdo con la parábola del relojero, podemos afirmar que muchos de sus ancestros fueron también programas viables programas para formar los componentes.

¿Podríamos hacer otras suposiciones con respecto a la estructura de ese programa? En biología existe una generalización muy conocida con una formulación verbal tan nítida que nos resistimos a desecharla aun cuando los hechos no parecen ratificarla: «la ontogenia recapitula la filogenia». Cada organismo, en su proceso de desarrollo, pasa por una serie de etapas que se parecen a algunas de sus formas ancestrales. El hecho de que el embrión humano tenga agallas y luego las modifique para destinarlas a otra función es un caso muy conocido que encaja con esta generalización. Actualmente los biólogos prefieren subrayar mayormente las salvedades que deben hacerse a este principio —la ontogenia, recapitula solamente los aspectos más gruesos de la filogenia y de una manera bastante burda—. Dichas salvedades no deberían hacernos obviar el hecho de que, aun así, dicha generalización conlleva una aproximación parcial —sintetiza un conjunto muy importante de hechos sobre el desarrollo del organismo—. ¿Cómo podemos pues interpretar dichos hechos?

Un modo de resolver un problema complejo es reducirlo a un problema previamente resuelto —para mostrar cuáles son los pasos que llevan de la solución anterior a la solución del nuevo problema—. Si a principios de siglo hubiéramos querido enseñar a un obrero a fabricar un coche, seguramente el modo más sencillo habría sido enseñarle cómo modificar un carro quitándole la lanza y añadiéndole un motor y una transmisión. Análogamente, en el curso de la evolución, un programa genético podría alterarse con la adición de nuevos procesos, que convertirían una forma más simple en una más compleja —¡para construir una gástrula tómesese una blástula y alérese!

Desde esta perspectiva, la descripción genética de una sola célula podría consecuentemente tomar una forma bastante distinta de la descripción genética que organiza las células como un organismo pluricelular. La multiplicación por división celular requeriría por lo menos una descripción de estado (por ejemplo, el ADN) y un «proceso interpretativo» sencillo —por usar un término informático— que copiara esta descripción como parte del macroproceso de copiado de la división celular. Pero evidentemente tal mecanismo no bastaría para la

diferenciación de células durante el desarrollo. Parece más natural conceptualizar ese mecanismo como si estuviera basado en una descripción de proceso y un proceso interpretativo un tanto más complejo que dé lugar al organismo adulto en una secuencia de etapas, donde cada etapa del desarrollo representaría el efecto de un operador sobre el previo.

Resulta más difícil conceptualizar la interrelación entre estas dos descripciones. Deben estar interrelacionadas porque ya sabemos suficiente sobre los mecanismos gen-enzima para mostrar que éstos desempeñan un papel considerable tanto en el desarrollo como en el metabolismo celular. La única pista que podemos obtener de nuestra anterior discusión es que la descripción misma puede ser jerárquica o cuasi-descomponible, en estructura; los niveles inferiores controlan la dinámica rápida de «alta frecuencia» de la célula individual y las interacciones de mayor nivel controlan la dinámica lenta de «baja frecuencia» del desarrollo del organismo pluricelular.

Hay cada vez más pruebas de que el programa genético se organiza de este modo.²⁶ En la medida en que somos capaces de distinguir la información genética que controla el metabolismo celular de la información genética que controla el desarrollo de las células diferenciadas en la organización pluricelular, podemos simplificar enormemente —como ya vimos— nuestra descripción teórica. Pero tal vez ya he llevado esta especulación suficientemente lejos.

26 Para una presentación más detallada sobre estos temas, véase J. D. Watson, *op.cit.*, concretamente los capítulos 8 y 14. Para una exposición de algunas de las primeras investigaciones sobre el tema, véase P. E. Hartman, «Transduction: A Comparative Review», en W. D. McElroy y B. Glass (eds.), *The Chemical Basis of Heredity* (Baltimore: Johns Hopkins Press, 1957), págs. 442-454. Las constataciones de la actividad diferencial de los genes en distintos tejidos y en fases distintas del desarrollo se presentan en J. G. Gall, «Chromosomal Differentiation», en W. D. McElroy y B. Glass (eds.), *The Chemical Basis of Development* (Baltimore: Johns Hopkins Press, 1958), págs. 103-135. Finalmente, también se presenta un modelo muy similar al que se ha propuesto más arriba, aunque de un modo independiente y mucho más completo, en J. R. Platt «A 'Book Model of Genetic Information Transfer in Cells and Tissues» en M. Kasha y B. Pullman (eds.), *Horizons in Biochemistry* (Nueva York: Academic Press, 1962), págs. 167-187. Evidentemente, este tipo de mecanismo no es el único que podría permitir controlar el desarrollo mediante una descripción de procesos. Así, la inducción, en el modo en que se concibe en la teoría organizativa de Spemann, se basa en una descripción de proceso en que los metabolitos presentes en tejidos ya formados controlan las siguientes fases del desarrollo.

La generalización de que podríamos esperar que la ontogénica recapitule parcialmente la filogenia en sistemas evolutivos cuyas descripciones están almacenadas en un lenguaje de procesos, tiene aplicaciones más allá del ámbito de la biología. Se puede aplicar también, por ejemplo, a la transmisión de conocimiento en el proceso educativo. En la mayoría de los temas, y más especialmente en aquellas ciencias que avanzan rápidamente, el progreso entre un curso de nivel básico y otro de nivel avanzado consiste esencialmente en un progreso a través de la historia conceptual de la ciencia correspondiente. Afortunadamente, la recapitulación no suele hacerse de modo literal, como tampoco se hace en el caso biológico. En química no suele enseñarse la teoría del flogisto para luego enmendarla. (No estoy seguro de no poder citar ejemplos de otras disciplinas en que se haga exactamente eso.) Las revisiones cuniculares que nos liberan de las cargas del pasado son infrecuentes y dolorosas. Tampoco son siempre deseables —recapitulaciones parciales pueden en muchos casos constituir el camino más expedito para el conocimiento avanzado.

Resumen: la descripción de la complejidad

El grado de complejidad o de simplicidad de una estructura depende crucialmente del modo en que la describamos. La mayoría de las estructuras complejas presentes en el mundo son extremadamente redundantes, y podemos aprovechar esta redundancia para simplificar su descripción. Pero para usarla, para lograr esta simplificación, debemos hallar la representación correcta.

La idea de sustituir una descripción de proceso por una descripción de estado de la naturaleza ha desempeñado un papel central en el desarrollo de la ciencia moderna. Las leyes dinámicas, expresadas en forma de sistemas de ecuaciones diferenciales o de ecuaciones en diferencias, han proporcionado las claves necesarias para una descripción simple de lo complejo en un gran número de casos. En los párrafos anteriores he intentado mostrar que esta característica de la investigación científica no es ni accidental ni superficial. La correlación entre la descripción de estado y la descripción de proceso es esencial para el funcionamiento de cualquier organismo adaptativo, para su capacidad para actuar sobre su entorno para alcanzar un objetivo. Nuestra

comprensión actual de los mecanismos genéticos sugiere que, incluso para describirse a sí mismo, el organismo pluricelular encuentra que una descripción de proceso —un programa codificado genéticamente— es la representación útil y parsimoniosa.

CONCLUSIÓN

Nuestras especulaciones nos han llevado a tratar un abanico francamente alarmante de temas, pero es el precio que tenemos que pagar si queremos encontrar propiedades comunes a muchos tipos de sistemas complejos. Mi tesis ha sido que una forma de construir una teoría no trivial de los sistemas complejos es mediante una teoría de la jerarquía. Empíricamente, una gran proporción de los sistemas complejos que observamos en la naturaleza manifiestan una estructura jerárquica. Desde un punto de vista teórico, podríamos esperar que los sistemas complejos fueran jerarquías en un mundo en el que la complejidad tuvo que evolucionar a partir de la simplicidad. Las jerarquías tienen una propiedad en su dinámica, la cuasi-descomponibilidad, que simplifica grandemente su comportamiento. La cuasi-descomponibilidad también simplifica la descripción de un sistema complejo y hace más fácil comprender cómo se puede guardar de forma razonable la información necesaria para el desarrollo y la reproducción del sistema.

Tanto en ciencia como en ingeniería, el estudio de los «sistemas se ha convertido en una actividad cada vez más popular. Su popularidad es más una respuesta a la necesidad urgente de sintetizar y analizar la complejidad que al desarrollo de un cuerpo teórico y técnico para tratar la complejidad. Si la popularidad ha de ser algo más que una moda, la necesidad tendrá que engendrar la invención y dar sustancia al término. Las exploraciones que hemos venido presentando son una línea para descubrir esa sustancia.