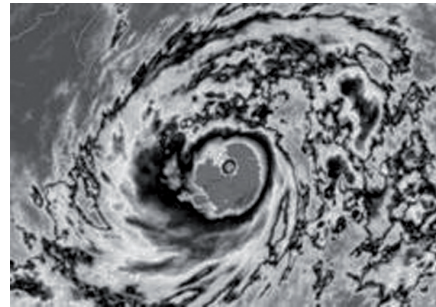




Fig. 1. Fenómeno atmosférico, tipo huracán o tifón, visto lateralmente (fotografía a la izquierda) y desde arriba con distintas técnicas (derecha).



ser espacialmente homogéneas, estacionarias, pues tampoco hay cambios con el tiempo, e independientes de los procesos que haya podido sufrir el sistema para llegar a esa condición, de modo que ese estado es único en esas circunstancias. Sin embargo, a pesar de nuestra familiaridad teórica con el concepto, es un hecho que tal condición especial no se observa en la naturaleza sino, si acaso, en situaciones cuidadosamente preparadas en el laboratorio. *Todo fluye*, notaba Heráclito de Éfeso hace 2 500 años en su estudio sobre la naturaleza. El estado de equilibrio termodinámico es una referencia útil y precisa, pero los sistemas naturales parecen evitarlo. En su lugar, se nos muestran con heterogeneidades y flujos a su través y con el entorno, de modo que no se les puede atribuir una temperatura única ni un hamiltoniano sencillo bien definido como exige la teoría. En consecuencia, los sistemas que ahora interesan, esos que muestran las turbulencias y otras fenomenologías que arriba mencionamos —los sistemas que llamamos “complejos”—, están siempre fuera del equilibrio como parte real que son de la naturaleza. Esto excluye de esta clase de sistemas, por ejemplo, al modelo de Ising, paradigma de materia (“bien”) condensada, pues tiene un buen hamiltoniano y, aunque posee otras cualidades intrincadas que a continuación notamos, nada impide que sus estados sean de verdadero equilibrio. El modelo de Ising no es, pues, sino una referencia ideal, aunque en la práctica un caso preciso y muy útil para construir a partir de él situaciones (complejas) fuera del equilibrio.

Tampoco es lineal

La fenomenología que interesa no es lineal, esto es, no muestra proporcionalidades entre estímulos y respuestas. Es cierto que la física está plagada de trascendentes linealidades, desde el péndulo simple a la descomposición de Fourier, pasando por la ley de Hooke, el cristal perfecto y los modos normales de vibración, pero se trata de referencias ideales, aproximaciones armónicas que nunca se materia-

lizan en la práctica. Así, esa importante secuela del comportamiento lineal que llamamos “principio de superposición” —los efectos se suman sin más— no es de aplicación a los sistemas complejos.

La linealidad es tan rara o imposible en la naturaleza como el equilibrio termodinámico. Para profundizar en ello, notemos cómo se produce una clara violación de estas dos aproximaciones en los llamados “medios excitables”. Sabemos que una señal suele amortiguarse durante su propagación. Ocurre con las ondas de sonido en el aire y con las ondulaciones causadas por la caída de una piedra en la superficie tranquila de un lago. Pero hay casos en los que una señal débil es capaz de transmitirse bien, sin debilitarse, incluso compitiendo con un ruido ambiente notable. El ejemplo de libro es la propagación de llamas en un gran incendio forestal donde, a pesar de las enormes irregularidades que pueda tener el bosque, de cambiantes condiciones atmosféricas, obstáculos, etc., el fuego seguramente seguirá mientras haya bosque y no lo impidan los bomberos. La posibilidad de dialogar que los jóvenes tienen en una ruidosa discoteca es quizá evidencia de que el cerebro permite una transmisión semejante. Otros ejemplos son la propagación de actividad eléctrica en los músculos y la de estructura espacial, oscilaciones y pulsos cuando compiten reacciones químicas y difusión en materia condensada. El mecanismo básico en estos procesos es siempre el mismo: un elemento, tal como una neurona o un árbol —que puede verse como nodo de una malla imaginaria— es excitado, excita a sus vecinos en la malla, se relaja y permanece así por un tiempo; mientras, los vecinos han seguido la misma pauta, excitando a otros y luego relajándose; y así sucesivamente. Esta regla dinámica básica no es lineal, y en estas condiciones se impide el equilibrio termodinámico del sistema.

La imposibilidad de alcanzar el equilibrio no se traduce, sin embargo, en comportamiento sencillo, sino en mayor variedad, y motiva fascinantes fenómenos en la naturaleza. Muchos sistemas complejos

—desde física y química hasta biología, neurociencia y sociología— muestran una similar falta de linealidad y de equilibrio asociada con su comportamiento “excitable”. Observamos en estos casos propagación “anómala”, exenta de la familiar amortiguación sistemática, y hoy sabemos que el origen de tan peculiar conducta está en el desarrollo de fluctuaciones extras, características de las transiciones entre fases, que implican un incremento de la sensibilidad. Esto es, esa conducta revela que el sistema, cuando así se comporta, está sufriendo fenómenos análogos a la condensación de un gas y al ferromagnetismo, con la salvedad de que aquí ocurren fuera del equilibrio [5].

No basta con sumar

Philip W. Anderson, también notable por sus estudios sobre medios desordenados y materia “mal” condensada, siguiendo el genial descubrimiento de Ludwig Boltzmann un siglo antes, notó en 1972 que la naturaleza se nos muestra en niveles de descripción jerárquicamente organizados. Esto es hoy familiar, hasta íntimo, para los físicos que tenemos a mano descripciones microscópica, mesoscópica y macroscópica de un mismo objeto, todas bien definidas pues cada una cuenta con sus escalas típicas para las longitudes, tiempos y energías, con sus propiedades emergentes respectivas y con sus teorías específicas, desde mecánica cuántica hasta hidrodinámica, por ejemplo. Además, desde tiempos de Boltzmann, sabemos que esas descripciones están relacionadas. Pero, con ser mucho, no es sólo esto. Conocer una de estas descripciones, aunque sea la más básica, no basta para comprender el sistema. Podemos saber todo sobre neuronas y sobre electrones, neutrinos y quarks y, sin embargo, seguir siéndonos enigmáticas la mente y la evolución de las estrellas y su aparente capacidad para agruparse y fusionarse en cuásares. Estas propiedades son globales y pertenecen a una descripción de nivel superior que es consecuencia no sólo de cómo son los elementos sino también de cómo se relacionan en el contexto específico que interesa. Las interacciones, no lineales, entre los elementos son precisamente la causa de que nuestros sistemas desarrollen orden, estructuras, incluso leyes inimaginables si uno se limita a estudiar los elementos. Por ejemplo, no es fácil en general predecir el futuro de los sistemas naturales, que típicamente muestran una gran sensibilidad a las más pequeñas perturbaciones y constantes posibles bifurcaciones en su evolución, a pesar de que todo en definitiva se sigue de sencillas leyes fundamentales. No solemos ser capaces de resolver nuestras dudas infiriéndolas directamente de estas leyes.

La necesidad de un esfuerzo adicional queda patente al notar que, para comprender cómo hace el cerebro cuando recuerda y reconoce —dos ingredientes esenciales de la inteligencia— hay que traspasar la descripción de las neuronas. Hemos de considerar sus relaciones y, para ser realistas, profundizar en la naturaleza de la cooperación en-

tre neuronas y conocer su topología, intensidades y cambios con el tiempo de los enlaces sinápticos [6, 5]. Emerge entonces, y sólo entonces, un nuevo mundo de fenómenos, insospechados a nivel neuronal, que parecen conformar la estructura del sistema nervioso y la mente.

El escenario más sencillo que muestra la conveniencia de traspasar niveles de descripción, en lugar de sumar, para llegar a comprender el sistema es un modelo mínimo, una especie de juguete que simula un ecosistema genérico [7]. Se supone un gran conjunto de especies, cada una caracterizada por un número único que mide su adaptabilidad al medio. Supuestas equidistantes en una circunferencia con sus adaptabilidades asignadas al azar, imaginamos cambios con el tiempo que consisten en que la especie menos adaptada es eliminada en cada paso. Además, la especie eliminada arrastra en su desgracia a las dos especies vecinas, una a cada lado en el círculo, simulando así algún tipo de interdependencia. Las especies desaparecidas son entonces reemplazadas por otras tres con adaptabilidades dadas al azar, y se repite el mismo paso dinámico una y otra vez. El resultado es que tiende a establecerse rápidamente un estado estacionario en el que la mayoría de las especies están bien adaptadas pero se producen constantemente eventuales desapariciones abruptas de un conjunto de especies, y este conjunto puede tener cualquier tamaño, desde unas pocas especies hasta una parte significativa de todo el ecosistema. Era difícil prever que nuestro sencillo planteamiento pudiera originar autónomamente esta peculiar conducta, con constantes “avalanchas” que, como ocurre con las de nieve, son a veces pequeñas y otras veces enormes. Tampoco la hidrodinámica, incluyendo las complicadas turbulencias que aparecen en los fluidos, puede inferirse sin más a partir de las ecuaciones de Newton que rigen el movimiento de sus moléculas.

Estas observaciones o similares seguramente están tras un Richard Feynman advirtiéndolo que no es fácil alcanzar a comprender las implicaciones de nuestras ecuaciones. Más recientemente, han inspirado a algunos a notar con ironía que profundizar en cómo son los elementos —sean genes, estrellas, neuronas, agentes sociales o financieros— no ha de llevarnos necesariamente a comprender mejor estructuras, funciones y principios de organización y crecimiento que son propios del sistema en su conjunto. Y es notable en este ineludible ascenso por los niveles de descripción que se alcanzan enseguida los límites de nuestras matemáticas y se hace necesario un uso creativo de computadoras para lidiar con el problema planteado en forma de algoritmo. Es una estrategia que permite simular experimentos, poner a prueba las hipótesis, conjunta o separadamente, descubrir mecanismos relevantes que debe de incorporar la teoría, y se está consiguiendo así un avance importante en nuestra comprensión de la complejidad natural.

Gozamos de universalidad

Estamos implícitamente asumiendo que proteínas, cerebros, complejos de comunicación, redes genéticas, tróficas o sociales, etc., son *sistemas físicos*. Una primera condición para admitirlo, aunque sea provisionalmente, con sus consecuencias es contar con datos adecuados. El hecho es que se ha producido un cambio sustancial al respecto. Tenemos hoy acceso relativamente sencillo a una enorme cantidad de datos de buena calidad en relación con los sistemas mencionados. Esto ha hecho perfectamente posible el desarrollo de la estrategia antes descrita, incluyendo la propuesta de modelos matemáticos y su estudio y mejora usando computadoras. El resultado está siendo un avance claro en la comprensión de las propiedades específicas de algunos de esos sistemas y, lo que todavía es más crucial, se van descubriendo propiedades y pautas comunes. En efecto, se va concluyendo de este modo, con confianza aunque todavía no rigurosamente, que los aspectos de la naturaleza que interesan muestran universalidad. Esto generaliza resultados precisos de hace algunas décadas [8], y es acorde con el principio de parsimonia o moderación de Feynman según el cual no hay tantos fenómenos diferentes en la naturaleza. No extraña esto al científico, pues suele contar entre sus herramientas, tanto al investigar como al describir sus resultados, con argumentos basados en analogías. En definitiva, una nueva propiedad principal de los sistemas complejos es que, como ya intuíamos al principio de esta reflexión, gozan de una cierta universalidad, esto es, *leyes de escala* estática y dinámica, la existencia de *clases de universalidad*, etc. [4, 8]. Es una significativa propiedad de la naturaleza con un importante corolario práctico para la ciencia de la complejidad: se potencia aquí la utilidad de modelos precisos capaces de captar todo lo que es esencial en una clase de fenómenos distintos [9].

Mallas que relacionan

En este contexto aparecen dos conceptos principales en los que actualmente descansa nuestra comprensión de los sistemas complejos.

Uno es el de malla o red que nació en el seno de las matemáticas como grafo. No es que todos los sistemas de interés tengan una estructura reticular sino que, cuando no es así, ésta se imagina

—ya lo hemos hecho arriba para comprender la naturaleza íntima de los sistemas excitables— para ser usada como un medio que permite describir la subyacente cooperación entre elementos. Esto explica tanta actividad científica en teoría de redes y la relevancia actual de las empresas dedicadas a su desarrollo y mantenimiento.

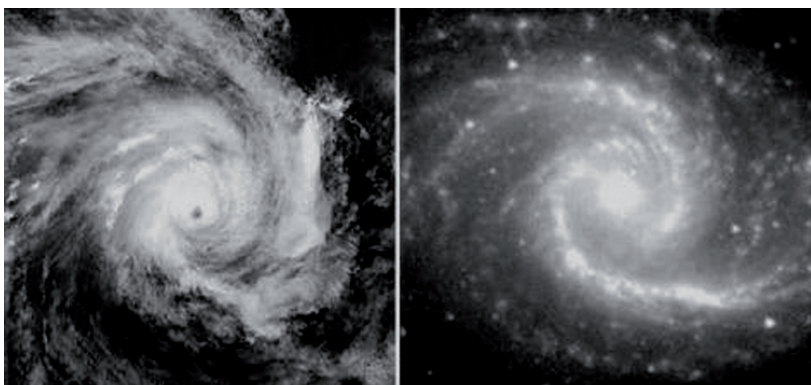
Cambios de fase y correlaciones

Otro concepto principal en el ámbito de la complejidad es el de cambio de fase que, según lo discutido, siempre ocurre en la naturaleza fuera del equilibrio. Es tan familiar que suele menospreciarse su papel en la formación de orden natural. Sin embargo, incluso su versión más sencilla entre estados de equilibrio, involucra transformaciones sustanciales. El agua solidifica en una estructura inimaginable en su estado líquido, y es capaz de extenderse por todo el espacio al hacerse vapor. Alguna propiedad ha variado espontánea y bruscamente —llegamos a hablar de cambios “infinitos”— como también sucede en esos materiales que por simple enfriamiento adquieren cualidades de imán o provocan levitaciones que parecen milagrosas. Y una condición —cuya espectacularidad subrayamos diciéndole “crítica”— tiende a establecerse rápidamente por todo el sistema, de manera que cualquier parte consigue influir en cualquier otra a la vez que es influida por todas ellas. Se ha producido una extensión súbita de correlaciones —no hay parte que ya sea independiente del resto— lo que hace al sistema capaz y asombrosamente eficaz para llevar a cabo las más difíciles tareas. Y en este estado de extraordinaria cooperación, en el que las querencias y discrepancias entre los elementos del sistema compiten con aleatoriedades, es cuando se propagan complicados estados de orden por el sistema y emergen nuevas propiedades. Pero es que, además, toda esta fenomenología se hace en la práctica aún más bizarra y fascinante en presencia de las irregularidades espaciales y temporales que imperan en los sistemas fuera del equilibrio [10, 11].

Multitud de escalas

Los fenómenos emergentes se caracterizan por la presencia de muchas escalas, como las avalanchas de todos los tamaños que describíamos arriba en relación con un modelo de ecosistema. Cuando

Fig. 2. De izquierda a derecha, huracán Douglas (1996), galaxia NGC1566, y espiral logarítmica.



esta propiedad es debida a la extensión de correlaciones que acabamos de mencionar, se manifiesta en una rotunda falta o “invariancia de escala” [12]. Es notable cómo esta propiedad es capturada por el concepto de derivada —muchos cocientes entre elementos finitos son equivalentes entre sí y con la derivada al hacer muy pequeño el denominador— y, por tanto, por ecuaciones diferenciales como las del “grupo de renormalización” (GR). En consecuencia, este formalismo y el estudio asociado de soluciones, estabilidad, puntos fijos, etc., que se desarrolló hace unas décadas en el estudio de fenómenos críticos resultan ser relevantes en ciencia de la complejidad donde supone una estructura matemática útil [13]. Recordemos a este respecto un comentario de Philip Anderson al reseñar cierto libro: “Me ha encantado encontrar [en ese libro] ‘la visión GR del mundo’, según la cual uno ve cada nivel de la estructura jerárquica de la ciencia como una ‘teoría efectiva’ válida en una escala determinada y para determinados tipos de fenómenos pero nunca en contradicción con las leyes de nivel inferior”.

Esta multitud de escalas es esencial en complejidad. No basta con el atributo de no-linealidad, por ejemplo. El doble péndulo es esencialmente no lineal, lo que induce un movimiento ciertamente complicado que incluye transiciones a comportamiento caótico, pero no es un sistema complejo; no muestra la compleja fenomenología emergente debida a cooperación que tratamos de caracterizar aquí [14].

Sistemas complejos

Concluimos que un sistema complejo siempre está constituido por muchos elementos, iguales o parecidos entre sí en algún sentido esencial, y que se nos muestra con niveles de descripción bien diferenciados y jerárquicamente organizados. Comprenderlo requiere relacionar esos niveles hasta hacer explícita la fenomenología que emerge de cooperación entre sus elementos. Esta fenomenología, que contiene simetrías y otros aspectos insospechados al observar los elementos y sus interacciones, está caracterizada por universalidad, criticidad y multiescala, además de ausencia de equilibrio termodinámico. Los conceptos de red y cambio de fase, así como las teorías de procesos estocásticos y de fenómenos críticos, incluido el formalismo del grupo de renormalización, resultan ser especialmente útiles al estudiar complejidad.

A modo de epílogo

Es perceptible un esquema —por algunos llamado *ciencia de la complejidad*— que extiende de modo natural conceptos, estrategias y técnicas familiares en física y matemáticas al caso de sistemas que vienen siendo objeto genuino de estudio en otras disciplinas como biología y sociología. El resultado no tiene estructura de ciencia, pero podría llegar a tenerla como una especie de generalización fuera del equilibrio de la actual mecánica estadística. Una peculiaridad de estos estudios es que, aun compren-

diendo bien el sistema, las predicciones específicas son difíciles debido a que intensas correlaciones de largo alcance inducen falta de escala y una extraordinaria sensibilidad a pequeños cambios y perturbaciones. Parece que, de algún modo, procesos de selección natural hayan ido haciendo que los organismos vivos y los sistemas sociales evolucionen hacia estas condiciones procurando optimizarse. El estudio del cerebro ya nos da muestras de ello [4, 5].

Agradezco comentarios de Dante Chialvo, Raúl Toral y un revisor anónimo que han influido en la forma definitiva de esta reflexión.

Notas y referencias

- [1] Dice esto último, por ejemplo, Klaus Mainzer en *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind* (Springer, 2004, 4.ª edición), donde también se discuten fundamentos, metodología y antecedentes históricos y filosóficos del concepto de complejidad.
- [2] La confusión se hace explícita, por ejemplo, en el editorial del número especial *Nature Physics* **8** (1), enero 2012, dedicado al concepto, y también se nota preguntando por *complexity* a Google. De hecho, hay autores que se refieren a contextos muy diferentes del presente cuando hablan de “complejidad”, y algunos disocian este concepto del de “sistema complejo”, distinción que aquí no creo conveniente. Además, se han definido diversas medidas de “complejidad”, siempre controvertidas, que aquí no proceden.
- [3] Una descripción de este tipo de fenómenos, resaltando analogías, puede verse en el libro del autor *Ref. 4*.
- [4] J. MARRO, *Physics, Nature and Society: A Guide to Order and Complexity in our World* (Springer, 2014).
- [5] JOAQUÍN J. TORRES y J. MARRO, “Brain Performance versus Phase Transitions”, *Scientific Reports* **5**, 12216 (2015).
- [6] DANIEL J. AMIT, *Modeling Brain Function* (Cambridge University Press, 1992).
- [7] PER BAK, *How nature works* (Oxford University Press, 1997).
- [8] La teoría de fenómenos críticos relaciona propiedades observables en el laboratorio con la naturaleza de singularidades matemáticas subyacentes, como puede verse en muchos libros de texto de física estadística.
- [9] GÉZA ÓDOR, *Universality in Nonequilibrium Lattice Systems: Theoretical Foundations* (World Scientific, 2008)
- [10] J. MARRO y RONALD DICKMAN, *Nonequilibrium Phase Transitions in Lattice Models* (Cambridge Univ. Press, 2005).
- [11] MALTE HENKEL *et al.*, *Non-Equilibrium Phase Transitions*, Vols. 1 and 2 (Springer, 2008 y 2010).
- [12] A. LESNE y MICHEL LAGUËS, *Scale Invariance. From Phase Transitions to Turbulence* (Springer 2012).
- [13] Para métodos de la física-matemática relevantes en complejidad, véanse las Refs. 9-12.
- [14] A. C. CALVAO y THADEU J. P. PENNA, “The double pendulum: a numerical study”, *Eur. J. Phys.* **36**, 045018 (2015). Sin embargo, una gran red de péndulos acoplados es capaz de comportamiento complejo: IAN S. OSBORNE, “Designing mechanical complexity”, *Science* **349**, 42 (2015).