

OCTAVIO MIRAMONTES VIDAL

SISTEMAS COMPLEJOS: ENTRE EL ORDEN Y EL DESORDEN

En las últimas dos décadas ha existido gran interés por el estudio de la complejidad de la naturaleza. Esto ha motivado un enorme crecimiento de la disciplina de los sistemas complejos, la cual ha llegado incluso a ser considerada como uno de los tópicos prioritarios en el desarrollo de la física del siglo XXI.¹

1. "Physics in a New Era: An Overview" (2001). Board on *Physics and Astronomy* (BPA), National Academy of Sciences, Washington, D. C.

Su estudio ha atraído a varias de las más prestigiosas mentes de la física contemporánea, como Murray Gell-Mann, Philip W. Anderson y Leo Kadanoff, entre otros, quienes reafirman su convicción de que esta área representa, sin lugar a dudas, una de las fronteras más importantes de la ciencia en nuestros días.²

ENTRE EL ORDEN Y EL DESORDEN: LA VIDA

No existe una definición única de complejidad. Por lo general se acepta que se refiere a las *propiedades de los sistemas que operan entre el orden y el desorden*. Por su parte, los sistemas complejos serían aquellos formados por muchos elementos similares que interactúan entre sí y en los que existe emergencia de propiedades en escalas espacio-temporales muy diferentes a las de las interacciones.³ Los ejemplos de estos sistemas son abundantes en la naturaleza e incluyen fenómenos como la turbulencia o los

→ *Orden:*
condición en la que
existe inmovilidad
y rigidez, como
un cristal: simé-
trico y uniforme.
Desorden: imagen
asociada con un
gas, cuyas molé-
culas se mueven
libres sin formar
estructuras espa-
ciales fijas

ecosistemas, la tectónica de placas o el funcionamiento del cerebro; en el ámbito económico, podríamos hablar de los mercados financieros.⁴

El estudio del orden, y por ende del desorden, constituye la esencia de los sistemas complejos. Aunque ambos conceptos han podido explicarse de manera adecuada y en forma separada por la física tradicional, la coexistencia entre ellos –aquello con cierto grado de orden y desorden al mismo tiempo– es un tópico que apenas comenzó a estudiarse con éxito hace unas décadas y se le ha denominado *borde del caos*.

En una primera aproximación, podemos pensar en el concepto *orden* como aquella condición en la que existe inmovilidad y rigidez, y podemos compararlo con la estructura de un cristal por ser simétrico y uniforme. En contraposición, podemos asociar el concepto de *desorden* a un gas, cuyas moléculas se mueven al azar, libres y sin formar estructuras espaciales fijas. En esta situación, cualquier configuración espacial se rompe tan rápidamente como se crea.

Pero ¿qué es lo que hay en medio de estos dos extremos? Cuando hablamos de la *creatividad de la naturaleza*, pensamos de inmediato en la *materia viva*, asombrosa y compleja obra de la evolución, la cual –al menos en la Tierra– sólo pudo surgir gracias a la forma líquida del agua. El hielo y el vapor, fases sólida y gaseosa de este compuesto –los extremos– no son capaces de brindar las condiciones necesarias para el surgimiento y evolución de la vida.⁵

OBSERVAR LA COMPLEJIDAD

Otro aspecto importante de los sistemas complejos es su capacidad de *autoorganización*, la cual les permite adquirir una forma (estructura) o moverse (dinámica de las moléculas del sis-

2. Murray Gell-Mann. "The Quark and the Jaguar" (W. H. Freeman, 1994). Philip W. Anderson, "Preface to the NAS Proceedings of the Colloquium on Physics: The Opening of Complexity", June 27-28, 1994, Irvine, C. A. Nigel Goldenfeld and Leo P. Kadanoff, "Simple Lessons from Complexity". *Science*, Vol 284, Issue 5411, 87-89, 2 April 1999

3. Karl Ziemelis. "Complex systems", *Nature* Vol. 410, No. 6825 [8 March 2001].

4. Miramontes, Octavio: "Los sistemas complejos como instrumentos de conocimiento y transformación del mundo. En: Ramirez S. (ed) *Perspectivas en las teorías de sistemas*, UNAM-Siglo XXI (1999).

5. Octavio Miramontes. *Orden y caos en la organización social de las hormigas*, Revista Ciencias 59 julio-septiembre 2000.

tema] sin necesidad de la intervención de fuerzas externas. En otras palabras, el sistema complejo es el resultado de la propia interacción de sus componentes. Es un nuevo orden que surge de una manera espontánea sin la participación de planes o diseños previos, es altamente dinámico y puede evolucionar en el tiempo y el espacio.

La ciencia de los sistemas complejos estudia esta autoorganización y busca descubrir las leyes generales bajo las cuales ese nuevo ordenamiento emerge, sus posibles formas y los métodos para predecir su evolución. Los resultados que así se obtendrían serían válidos para cualquier tipo de sistema con las mismas características de interacciones.

Todo esto es una de las grandes promesas de la física de los sistemas complejos: intentar establecer leyes generales para la fenomenología de sistemas aparentemente disímiles en su expresión material, pero con las mismas reglas de operación. Por ejemplo, a la pregunta "¿Qué tienen en común un reloj de arena, los terremotos y la evolución biológica?" La respuesta inmediata es *nada*; sin embargo, desde la óptica de los sistemas complejos sería *mucho*. Veamos por qué.⁶

EL RELOJ DE ARENA, LOS TERREMOTOS Y LA EVOLUCIÓN

En un reloj, la arena cae formando un montoncito cónico. Una vez que ha caído suficiente material, el cúmulo alcanza un ángulo máximo con respecto a la horizontal de la base. Entonces se observa un proceso de formación de avalanchas (sí, igual al de las montañas nevadas), donde un solo grano de arena es suficiente para provocar dos cosas: el descenso rápido y masivo de la arena del cono o el deslizamiento por la ladera de tan sólo un grano.

Esto recibe el nombre de *criticalidad autoorganizada*, estado de desequilibrio que el sistema ha alcanzado por sí mismo y donde la más pequeña perturbación puede tener consecuencias impredecibles a gran escala. La relación entre el tamaño de las avalanchas y su frecuencia relativa no es azarosa, en la esfera de las matemáticas está bien definida: es *la ley de potencias* (o *ley de escala*) con un exponente que ya ha sido identificado.

A su vez, el proceso temporal que se requiere para la formación de una avalancha es también una ley de escala, y guarda una relación funcional

con la distribución de tamaños. Algo parecido sucede con los terremotos.

A primera vista, un montoncito de arena y un terremoto no se parecen, pero un análisis detallado revela similitudes sorprendentes. Los terremotos son producto de la dinámica de las placas tectónicas que forman la corteza terrestre, las cuales son enormes bloques de material sólido que forman masas individuales y se encuentran en interacción mecánica, chocando entre sí a consecuencia del empuje que reciben de las corrientes de convección del magma en el interior del planeta. La fricción entre las placas genera energía acumulada y ésta puede liberarse de un momento a otro en forma de temblor.

Hoy sabemos que éste es también un proceso de criticalidad autoorganizada, en el cual los temblores tienen magnitudes que obedecen leyes de escala: muchos temblores tienen tan poca intensidad que no son perceptibles por los humanos y, por fortuna, son muy pocos aquéllos que alcanzan escalas catastróficas.

Finalmente, existe una gran discusión acerca de si los sistemas biológicos también se encuentran en estados de criticalidad autoorganizada. Uno de los puntos de vista dominantes dice que la evolución biológica implica el nacimiento de nuevas especies y la extinción de otras. Al parecer, este proceso evolutivo se produce en *avalanchas* de surgimiento de especies y de extinciones masivas, al menos eso es lo que muestra el récord fósil de la historia de la vida en el planeta. En el caso de las extinciones, este proceso presenta patrones de leyes de potencias y escalamiento similares a los que se observan en temblores o en relojes de arena.

Para ser justos, deberíamos decir que este patrón de sistemas muy diferentes en apariencia, pero con fenomenologías similares, constituye un gran reto para la física, pues la obliga a incursionar en áreas tradicionalmente fuera de sus dominios, en especial la biología y las ciencias sociales. Debido a esto, la física del siglo XXI será esencialmente conocimiento científico interdisciplinario. ●

6. Per Bak. "How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality", *Springer-Verlag Telos* (June 1, 1996)

Octavio Miramontes Vidal es físico por la Facultad de Ciencias de la UNAM y doctor por el Imperial College de la Universidad de Londres. Es investigador titular del Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física de la UNAM y miembro del Grupo de Biocomplejidad y Redes de dicha institución.