

*Mientras tratamos de colocar las piezas en el rompecabezas de la naturaleza, debemos tener presente que estamos trabajando solamente en una pequeña esquina, y que la esperanza de poner la última pieza está más allá de nuestro conocimiento.*

Los hombres de ciencia tratan de encontrar modelos o sistemas en las cosas que todos nosotros, los seres humanos, vemos y experimentamos. Los modelos más deseables son los que resumen muchas observaciones en un

# La naturaleza: ¿Un rompecabezas?

J. Mailen  
Kootsey

principio compacto. Por ejemplo, las leyes de movimiento de Newton, suficientemente compactas como para escribirlas en una tarjeta postal, proveen un cuadro simple y elegante de las órbitas planetarias alrededor del sol y al mismo tiempo describen el movimiento de una pelota de béisbol durante la trayectoria, o de un auto en la autopista, como también cualquier otra clase de movimientos que vemos en nuestra vida diaria.

El extraordinario éxito de las leyes de movimiento de Newton ha llevado a los investigadores a esperar otras poderosas leyes para explicar y simplificar otros fenómenos. Cada vez que alguien descubre uno de estos principios organizadores, se produce un gran regocijo entre los científicos, algo así como la satisfacción de encajar piezas en un rompecabezas. A medida que se descubre una nueva ley, el universo parece más comprensible. A la vez, cada nuevo éxito es una invitación a la especulación acerca del tamaño general del rompecabezas. ¿Estamos a punto de cerrar los límites y completar el modelo? ¿Estamos a punto de encontrar el último conjunto de leyes

necesarias para describir el universo, que nos darían una capacidad ilimitada para entender y predecir fenómenos naturales?

En las últimas décadas, hemos descubierto algunos modelos que no parecen ayudarnos a completar el rompecabezas; por el contrario, parecieran extenderlo. Estas difíciles ideas se aceptan ahora como descripciones exactas de los fenómenos naturales. A continuación haremos una breve introducción e ilustración de tres de estos conceptos: los sistemas dinámicos, la complejidad, y el caos.

## Los sistemas dinámicos

Los primeros investigadores en todos los campos de la ciencia han concebido las cosas naturales en una forma estática e inmutable. Por ejemplo, se consideraba que las estrellas eran puntos de luz fijos en un cielo raso hemisférico rotatorio. Hoy creemos que son como grandes y complejos cuerpos dinámicos, moviéndose a velocidades enormes en direcciones diferentes, calentándose o enfriándose, explotando o contrayéndose, apartándose unas de otras o en colisión entre sí. Parecieran estar estáticas porque sus cambios son lentos comparados con la escala del tiempo de la experiencia humana.

El hueso es otro ejemplo de una apariencia estática engañosa. Se suele comparar los huesos a las vigas de acero empotradas en las paredes de un edificio. Su función es la de proveer la rigidez necesaria para mantener el cuerpo erecto, pero por otro lado se asume que deben permanecer fuera de la vista y no romperse. Generalmente se comportan así, pero su similitud con las vigas de acero termina allí.

El hueso es un material compuesto, en el cual se han inspirado muchos materiales de alto nivel tecnológico creados por el hombre. Fuertes cristales de sales de calcio se empotran en una matriz de colágena elástica para crear una sustancia que es liviana y al mismo tiempo resistente. La fibra de vidrio —que combina la resistencia del vidrio con la flexibilidad del plástico— es un compuesto bien conocido hecho por el hombre. Y continúan apareciendo otros materiales, como los compuestos de grafito empleados para hacer raquetas de tenis. Algo más importante que su forma estructural es que el hueso es una estructura viviente hecha de una comunidad de células intercaladas con pequeños vasos sanguíneos. Un tipo de célula ósea segrega la colágena elástica y ayuda a la formación de cristales de calcio y fosfato en la solución circundante. Otro tipo de célula ósea ayuda al desdoblamiento de la colágena y disuelve los cristales pasándolos

de nuevo a la solución. Estos dos tipos de células operan en regiones diferentes, a veces a la manera de una renovación urbana. Las partes viejas del hueso son desmanteladas en algunas áreas, mientras que la formación de nuevo tejido óseo tiene lugar en otras áreas. Los dos procesos están perfectamente balanceados, de tal forma que tenemos siempre la cantidad correcta de hueso necesario para la función de sostén. Las hormonas, procedentes de otras partes del cuerpo, ayudan en la regulación de este proceso dinámico, e inclusive las fuerzas externas ejercidas sobre el hueso influyen los procesos de desdoblamiento y renovación.

Las vigas de acero son estáticas y por lo tanto son incapaces de adaptarse a las diferentes necesidades o de repararse ellas mismas al dañarse. Por el contrario, la característica del hueso puede cambiar por medio de una alteración de los procesos de crecimiento y destrucción. La rapidez del crecimiento en general se halla en un exacto balance con la rapidez de destrucción, pero si la rapidez del crecimiento aumenta, la balanza se inclinará a favor del crecimiento, y el tamaño del hueso aumentará. Por supuesto, la balanza puede también inclinarse hacia el lado de la destrucción, como se ha observado en los viajes espaciales prolongados. Debido a que la construcción ósea es guiada por las instrucciones internas de la célula, los huesos pueden repararse a sí mismos al desplazar el equilibrio en dirección del crecimiento en áreas selectas. Se deposita nuevo hueso para reparar traumas, los huesos torcidos pueden gradualmente llegar a enderezarse y los huesos sujetos a mayor tensión pueden crecer más resistentes para poder soportar más carga. Siendo un sistema dinámico, los huesos son más versátiles y adaptables que las vigas estáticas.

Los métodos usados para estudiar sistemas dinámicos son también diferentes de los usados para estudiar objetos estáticos. Para los últimos, la tarea principal es nombrar, clasificar y medir las características físicas como el tamaño, forma, color, etc. Los sistemas dinámicos requieren un mayor número de medidas y observaciones. Es necesario conocer cómo se comportan estos sistemas bajo diferentes condiciones y cómo responden a diferentes estímulos. Es más, es difícil (si no imposible) resumir en pocas palabras o por medio de ecuaciones matemáticas todas las variaciones en el comportamiento de un sistema dinámico. Lo que en general se hace es escribir ecuaciones describiendo

la manera en que cada componente del sistema se relaciona con los demás, pero puede llegar a ser muy difícil resolver las ecuaciones para predecir cómo se comportará el sistema como un todo.

Los sistemas dinámicos son, por lo tanto, combinaciones de componentes que interactúan, y sus características interesantes provienen de las relaciones cambiantes entre los componentes. Una fuerza es balanceada por otras, y un cambio en el equilibrio significa un cambio en la conducta. Una vez que reconocemos la naturaleza de los sistemas dinámicos, nos damos cuenta que estamos rodeados por tales sistemas. Desde las células microscópicas hasta el ambiente global, vemos fuerzas complejas y procesos agrupados interactuando entre ellos. En lugar de un universo fijo, nos encontramos con uno caracterizado por la interacción, el cambio, la variación y la respuesta.

### La complejidad

Alguien ha dicho que las ciencias “difíciles”, las matemáticas, han tenido éxito porque buscan y encuentran cosas sencillas para estudiar —suficientemente sencillas para ser descritas por las herramientas matemáticas disponibles, tales como las leyes del movimiento de Newton—. Por ejemplo, los libros de texto de física están saturados de ejercicios que asumen movimientos “sin resistencia”. Los autores de libros de textos saben que tenemos que vivir en la vida real con fuerzas de fricción, pero que los recursos matemáticos para hacer predicciones son limitados. Por lo tanto, no se le ha dado un tratamiento extensivo a la situación real. En las últimas décadas, la tecnología de las computadoras ha aumentado ampliamente los métodos matemáticos disponibles, permitiendo a los científicos trabajar y pensar en sistemas de una complejidad mucho mayor. Los investigadores de todos los campos están incluyendo más realismo en sus estudios, en vez de limitarse a idealizaciones que son simplificaciones de la realidad. Tanto es así, que una nueva rama de las ciencias se enfoca en, precisamente, la complejidad<sup>1</sup>.

Considera, por ejemplo, las células musculares que forman el corazón y que permiten al mismo bombear la sangre. Funcionalmente, estas células son pequeños “motores” que usan la energía derivada del alimento, para hacer que el corazón se contraiga, permitiendo que la sangre fluya por las arterias, los vasos capilares y las venas. Aunque la tecnología de los motores mecánicos está bien desarrollada, resulta de poca ayuda para entender las células

cardíacas, ya que los principios sobre los cuales trabajan son diferentes.

En la célula cardíaca, la fuerza de contracción es generada por macromoléculas que poseen atracciones eléctricas. El saber cómo generan estas moléculas la fuerza y el movimiento es lo suficientemente interesante y complejo de por sí, pero eso apenas representa el comienzo de la descripción de cómo funciona el músculo. Las moléculas contráctiles se mantienen en su lugar por medio de una matriz elástica y por las delgadas paredes membranosas de las células. La pared membranosas separa el fluido del interior de la célula del fluido exterior y desempeña varias funciones, entre ellas la regulación del ambiente fluido alrededor de las moléculas contráctiles, y coordina la contracción de la gran cantidad de células que forman el corazón. El número de moléculas de toda clase dentro de la célula tiene que permanecer constante para que la presión osmótica no encoja la células o las hinche y las destruya. La energía necesaria para iniciar la contracción tiene que ser obtenida de la glucosa que circula en el fluido exterior y tiene que ser convertida en una forma útil por las moléculas contráctiles. Debe haber la cantidad de oxígeno necesario para liberar la energía y eliminarse el dióxido de carbono y otros productos de desecho de la célula. Los iones de calcio, que inician la contracción, deben moverse en el interior de la célula y su cantidad debe ser regulada cuidadosamente. Finalmente, cada célula debe comunicarse con sus vecinas para saber cuándo contraerse, de tal forma que el músculo cardíaco trabaje en su totalidad como una bomba eficiente.

Las moléculas de gran tamaño se extienden a lo largo de la pared membranosas de la célula del músculo para mover las otras moléculas hacia adentro y hacia afuera, permitiendo que funcione todo este proceso. Se sabe que existen por lo menos una docena de estas moléculas de transporte en las membranas de las células del corazón, y quedan por descubrirse muchas más. Cada una de ellas es como una fábrica en miniatura con numerosos pasos en el proceso que mueve las moléculas hacia adentro y hacia afuera de la membrana. Las moléculas transportadoras no funcionan en forma independiente, sino que son afectadas por los resultados de todas las demás moléculas de transporte y por otros factores en su ambiente. Como resultado de ello, están efectivamente ligadas dentro de un gran sistema complejo.

Es así que la microscópica célula cardíaca —demasiado pequeña para ser vista a simple vista— es un sistema de una complejidad increíble con numerosas partes que interactúan, cada una de ellas altamente compleja en sí misma. No podemos predecir el comportamiento de las células cardíacas sumando simplemente lo que sabemos acerca de sus componentes individuales (moléculas complejas). Es necesario conocer el comportamiento de sus componentes y cómo interaccionan entre sí como una “comunidad”. Por medio de poderosas computadoras se ha hecho posible empezar a entender cómo funciona un sistema tal<sup>2</sup>, pero aun las más poderosas computadoras disponibles hoy no tienen ni de lejos la capacidad necesaria para procesar todo lo que sabemos acerca de las células del corazón.

El corazón es, por supuesto, solamente una parte del sistema circulatorio; y el sistema circulatorio es sólo uno de los sistemas orgánicos del cuerpo, y una persona es sólo una pequeña parte de la sociedad. La tarea de entender un sistema individual complejo es suficientemente difícil, pero la naturaleza parece estar formada por una infinita jerarquía de sistemas que se ligan e interactúan entre sí.

## El caos

Los hombres de ciencia han dedicado su vida al estudio del comportamiento regular. Sin embargo, no todo lo que vemos tiene una conducta regular y repetible. Como se consideraba que el objetivo de la ciencia era hallar comportamientos regulares, no parecía tener sentido el estudio del comportamiento de lo irregular. Esta forma de entender la ciencia hizo imposible el descubrimiento del “caos” como un principio de la ciencia hasta hace aproximadamente 25 años, cuando Robert May comenzó a pensar en sistemas que producen resultados impredecibles.

May se encontraba estudiando las leyes de la población, y de cómo su tamaño cambia de una generación a otra. Si cada individuo de una generación produce dos hijos en la siguiente (una relación representada por medio de una ecuación matemática muy simple), el resultado es una explosión de crecimiento demográfico que recibe el nombre de malthusiana, en honor a Malthus, quien estudió por primera vez la matemática de este crecimiento. Una leve modificación en la ecuación básica del crecimiento conduce a la ecuación logística de crecimiento limitado. May programó la ecuación logística en su computadora y estudió su comportamiento a medida que cambiaba la relación de crecimiento (el

promedio de hijos por padres). Para algunos valores pequeños de esta proporción, la ecuación predijo una población de tamaño constante. Para un valor un poco más grande de la proporción, la población comenzó a oscilar en forma regular entre dos valores, uno alto y otro bajo. Para un valor de la razón un poco más alto la oscilación fue doblemente rápida. Con una proporción un poco más alta todavía...se produjo *el caos*: la población comenzó a cambiar valores en forma irregular, sin ningún patrón obvio.

Los matemáticos han observado el comportamiento caótico de las ecuaciones matemáticas desde antes de la década de 1970, pero May fue el primero en relacionar el caos matemático con el mundo real. El resultado fue asombroso porque debilitó uno de los dogmas fundamentales de la ciencia, a saber, que las ecuaciones matemáticas eran consideradas las formas más elevadas de expresar principios de la naturaleza, y que las soluciones a las ecuaciones matemáticas que describen sistemas naturales eran reproducibles, sin tener en cuenta quién hiciera los cálculos o cuántas veces se repitieran. Ese es, después de todo, el uso básico de las matemáticas en las ciencias: hacer predicciones precisas y reproducibles. Sin embargo, May demostró que las ecuaciones escritas para describir los procesos naturales pueden producir resultados impredecibles bajo ciertas circunstancias. Desde el descubrimiento de May, se han encontrado conductas caóticas en numerosas áreas tales como en las epidemias, en los patrones de los pulsos cardíacos, en los ciclos de los negocios y en el movimiento de los fluidos<sup>3</sup>.

El descubrimiento de May tuvo dos resultados importantes. En primer lugar, los hombres de ciencia se dieron cuenta que no podían ignorar por más tiempo los fenómenos que mostraban patrones o modelos irregulares y no reproducibles. En segundo lugar, que aun cuando se escriban ecuaciones matemáticamente correctas para describir un sistema natural y haya una manera de resolver las ecuaciones, es posible que no podamos hacer uso de esas soluciones con fines prácticos de predicción, ya que el resultado puede ser caótico o de una conducta fortuita. Un ejemplo es el frustrante problema de tratar de hacer predicciones de largo alcance acerca del tiempo.

## Conclusiones

La comprensión de los tres conceptos descritos hasta aquí —la ubicuidad de los sistemas dinámicos y complejos y el caos— han ayudado a los matemáticos a reconocer las limitaciones de los procesos científicos

y el alcance de las matemáticas. Los hombres de ciencia ya no se precipitan a afirmar que tienen la capacidad de describir todos los fenómenos al aplicar unas cuantas leyes expresadas en fórmulas matemáticas. Aun cuando se llegara a alcanzar una formulación unificada de las fuerzas naturales y de las sustancias, algunas consideraciones prácticas, tales como los limitados recursos matemáticos, el poder de las computadoras y las posibilidades del caos, limitan las predicciones que se podrían hacer. Mientras que continuamos tratando de colocar piezas en el rompecabezas de la naturaleza, reconocemos que trabajamos sólo en una pequeña esquina y que la esperanza de encajar la última pieza está más allá de nuestro alcance.

Los tres conceptos que acabamos de describir también ofrecen nuevas oportunidades para que el creyente tenga una mejor comprensión del Dios creador en el cual cree. Si los principios se aplican a la naturaleza, entonces, en cierto modo, son características de Dios mismo que podríamos esperar encontrar en su relación con el ser humano. Aprendiendo de la experiencia con los sistemas dinámicos, por ejemplo, podemos esperar encontrar un Dios que puede adaptar y ajustar sus respuestas para interactuar con el ser humano por medio de una gran variedad de condiciones. Bien podría ser descrito como inmutable con respecto a los principios involucrados en las relaciones; sin embargo, adaptable a los tiempos cambiantes, en la medida en que las necesidades humanas cambian. ☞

---

*Mailen Kootsey (Ph.D., Brown University) es el vicepresidente académico en Andrews University. Disfruta estudiando sistemas biológicos complejos por medio de simuladores de computadoras. Su dirección es: Andrews University; Berrien Springs, MI 49104; EE. UU. de N.A.*

## Notas y referencias

1. W. Mitchell Waldrop, *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos* (New York: Touchstone, 1992).
2. H. R. Pagels, *Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity* (New York: Simon and Schuster, 1988).
3. J. Gleick, *Chaos: Making a New Science* (New York: Penguin Book, 1987). Para estudios anteriores acerca de la teoría del caos en esta revista, ver el artículo de Kevin C. de Berg, “¿Un universo al azar? Orden y azar en la naturaleza y en la Biblia, *Diálogo* 2:3 (1990), pp. 10-12; y David A. Thomas con Paul F. Barceñas, “El caos: Crisol de la creación”, *Diálogo* 4:3 (1992), pp. 12-15.