



## Una aproximación a los sistemas complejos

GUSTAVO MARTÍNEZ MEKLER

Conrad Hal Waddington, embriólogo escocés, inicia su visionario libro póstumo *Las herramientas para el pensamiento*, publicado en 1977, con estas palabras: “Dudo que en la historia haya existido una época como la nuestra, en la cual tanta gente se encuentra tan verdaderamente asombrada con la manera como el mundo se resiste al cambio —incluso cuando se trata de mejorarlo. [...] Si las cosas empeoran a veces se puede decir, aunque sea paradójico, que era de esperarse; pero hoy las cosas van mal tantas veces y en contextos tan diferentes que mucha gente comienza a sentir que es su propio modo de pensar sobre el funcionamiento del mundo el que debe estar errado. Creo que esta sospecha probablemente tiene sustento. Los modos como se conciben las cosas, que han sido aceptados en el pasado y que se han vuelto sentido común, en realidad no funcionan en todas las circunstancias y muy probablemente hemos llegado a

un periodo de la historia en que este buen sentido no corresponde a los procesos que ocurren en el mundo en general. [...] Hoy debemos ser capaces de pensar no solamente en sistemas simples, sino en sistemas complejos”.

Un cuarto de siglo después, en los albores de un nuevo milenio, estos comentarios se mantienen más válidos que nunca, y aunque no existe una definición precisa y universalmente aceptada de lo que son los sistemas complejos, éstos son relativamente fáciles de caracterizar. Entre sus aspectos más importantes encontramos que son sistemas que constan de muchos componentes que interactúan fuertemente, dando lugar a una serie de comportamientos globales que se encuentran interrelacionados. Ejemplos de esta naturaleza abundan a nuestro alrededor: los cambios atmosféricos, la bolsa de valores, una célula, la memoria, un flujo turbulento... Por lo general, la evolución

temporal de estos sistemas no es lineal (los efectos no son proporcionales a las causas) y con frecuencia el detalle del comportamiento dinámico de los componentes es irrelevante para la caracterización de las llamadas *propiedades emergentes*. En otras palabras, una clase amplia de situaciones distintas al nivel de los componentes origina el mismo comportamiento colectivo. Se perfilan entonces jerarquizaciones relacionadas con la variedad de niveles de descripción. Nuestro contacto con los sistemas complejos es continuo y cotidiano, pues conforman nuestro entorno y a nosotros mismos. La riqueza de la temática que se cubre bajo el estudio de los sistemas complejos (sociología, ecología, lingüística, antropología cultural, evolución biológica, física lejos del equilibrio, biología del desarrollo y morfogénesis) se define en una lista por demás extensa.

### Un poco de historia

Aunque Henri Poincaré, uno de los matemáticos más brillantes de finales del siglo XIX y principios del XX, ya planteaba las características fundamentales de los sistemas dinámicos no lineales, es en los últimos treinta años que se acentúa su importancia y la de los sistemas complejos. Desarrollos matemáticos conducentes a tratamientos analíticos, la realización de experimentos con precisiones previamente inalcanzables en un intervalo de escalas impresionante y el aumento en la capacidad de cómputo a niveles inimaginables, todo ello, aunado a las necesidades económicas y tecnológicas de la época, dieron lugar a un terreno fértil para el surgimiento de visionarios y promotores de una nueva forma de quehacer científico interdisciplinario, capaces de apreciar semejanzas inconcebibles para los representantes de lo que Waddington llama “la sabiduría convencional del grupo dominante”. En la búsqueda de las leyes comunes del mundo de lo vivo y de lo inerte destacan químicos y físicos, como Ilya Prigogine, de la Universidad Libre de Bruselas, quien centró su trabajo en las “estructuras disipativas” en el contexto de los procesos lejos del equilibrio, y Hermann Haken, de la Universidad de Stuttgart, promotor de la sinérgica; así como matemáticos, tales como René Thom, del Instituto de Altos Estudios Científicos de París, creador de la teoría de las catástrofes que luego relacionó con la morfogénesis. Por su lado, biólogos como Stuart Kauffman, del Instituto de Santa Fe sobre Sistemas Complejos, en sus estudios acerca de la autoorganización y autómatas, y Brian Goodwin, en Inglaterra, con su trabajo sobre la evolución y desarrollo, abrieron nuevas perspectivas en lo que pudiera empezar a llamarse “biología teórica”.

La versatilidad y potencialidad de los métodos desarrollados para el estudio de los sistemas complejos ha traído como consecuencia que durante los últimos años, a escala mundial, los centros de investigación dedicados a éstos se hayan multi-

plicado a un ritmo impresionante, con una temática que va desde el desarrollo de algoritmos para inversión en la bolsa de valores hasta estudios de lingüística.

En México, el sembrador de ideas e inquietudes del mundo de los sistemas complejos es Germinal Cocho, del Instituto de Física de la UNAM, quien desde 1973 ha venido promoviendo su desarrollo. En particular, en el Programa de Ciencia y Sociedad de la Facultad de Ciencias de la UNAM se trató de definir y poner en práctica un enfoque progresista de izquierda de la ciencia, con seminarios en donde se enfatizaba la importancia de los fenómenos críticos y de los cambios cualitativos y se discutía tanto la física de dichos fenómenos y la matemática de la teoría de las catástrofes, como el psicoanálisis y los trabajos de Piaget, teniendo en cuenta la presencia de rasgos universales asociados a los diversos “niveles de la materia” en el punto crítico. En la enseñanza, también fue fértil el Programa de Ciencia y Sociedad, pues se puso en práctica un “paquete de posgrado sobre sistemas complejos abiertos físicos, biológicos y sociales”, y aunque dejó de existir hace mucho tiempo, su legado académico fue, con maneras y modalidades distintas, recogido en parte por el Grupo de Biomatemática de la Facultad de Ciencias que se originó en 1982 en el Departamento de Matemáticas de la misma Facultad. En el Instituto de Física, de nuevo por iniciativa de Cocho, se implantó en 1977 un proyecto de investigación denominado “Dinámica de sistemas complejos” como parte del programa de altas energías. En 1981 el proyecto pasó eventualmente a ser programa, llegando a aglutinar un tercio del Departamento de Física Teórica y dando lugar, en 1989, a la fundación del Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física de la UNAM (uno de los primeros en el mundo). Este Departamento se ha dedicado al estudio de sistemas complejos en la física, abordando temas como sismos, fenómenos colectivos en sistemas fisicoquímicos y dinámica mesoscópica de sistemas desordenados, por mencionar sólo algunos; y en la biología con estudios, entre otros, de la evolución de secuencias genéticas, origen de la vida y modelos inmunológicos y ecológicos.

Actualmente, el Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias hospeda un seminario sobre temas afines a la complejidad, en el cual participan también investigadores de diversos institutos de ciencias de la propia Universidad. En paralelo, el Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física mantiene el seminario Dinámica de sistemas complejos.

Afortunadamente, en México también ha habido una proliferación de grupos interesados en los sistemas complejos. Sin intención de un recuento exhaustivo, vienen a la mente los trabajos de índole epistemológica desarrollados en el Departamento de Historia y Epistemología de la Ciencias del Cinvestav; la incursión de la perspectiva compleja en estudios antropológicos en la Escuela Nacional de Antropología e Historia en conjun-

ción con el Instituto de Investigaciones Antropológicas de la UNAM y la UAM-Xochimilco; el desarrollo de algoritmos genéticos y redes neuronales en contextos tanto biológicos como financieros en el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM, y las investigaciones en paleoecología y vulcanismo llevadas a cabo por el personal de Ciencias Biológicas de la ENEP-Iztacala, del Centro de Ciencias Físicas de la UNAM en Cuernavaca y de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. De especial mérito es la cruzada sobre la revisión de conceptos emprendida por el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades de la UNAM.

### Entre el orden y el desorden

En el estudio de los sistemas complejos la transición entre el orden y el desorden desempeña un papel fundamental. En efecto, un sistema completamente ordenado no es capaz de guardar y procesar información, puesto que para hacerlo habría que desordenarlo. Por ejemplo, si se considera un cuaderno en blanco éste es uniforme, homogéneo y ordenado, y cada página es igual a las demás. En el momento que se escribe algo todo lo anterior se rompe. En el otro extremo se tiene una situación parecida: un sistema azaroso, un gas, también es incapaz de guardar y procesar información pero esta vez debido a su extrema volubilidad que le impide sustentar alguna estructura coherente. Una situación intermedia, con suficiente orden para poder sustentar procesos pero con una dosis exacta de desorden para poder explorar y adaptarse a situaciones novedosas, es lo que se ha dado en llamar “el borde del caos”. Este concepto ayuda a entender algunos fenómenos psicológicos y culturales. En particular, vale la pena comentar la asimilación del desorden al orden en el aprendizaje. La búsqueda de cosas y aspectos nuevos es en general desordenada y sorpresiva, aunque lo novedoso debe tener la posibilidad de asimilarse a las estructuras y estrategias existentes. Como comenta Isaac Asimov en la *Nueva guía de la ciencia* los perros son más inteligentes que los gatos, pues “el perro, en sus momentos de ocio, olfatea acá y allá, elevando sus orejas al captar sonidos que nosotros no somos capaces de percibir; y precisamente por esto lo consideramos más inteligente que el gato, el cual, en las mismas circunstancias, se entrega a su aseo, o bien se relaja, se estira o dormita”. Es precisamente en la curiosidad y capacidad de asombro, aunadas a una dosis de escepticismo, que pone a prueba lo que ese asombro sugiere, donde, según Carl Sagan, debemos buscar el fundamento de la ciencia.

Por otro lado, Henri Atlan, en su libro *Entre el cristal y el humo*, comenta que sería el inconsciente —operando de modo desordenado— el principal responsable de la capacidad creativa, mientras que el consciente sería principalmente una base de datos ordenada. El balance dinámico entre esos dos extremos

permitiría la asimilación de lo encontrado por el inconsciente desordenado y creador a las metodologías y bases de datos asociadas al consciente.

Se ve, pues, que enfoques propios de la dinámica no lineal y de los sistemas complejos pueden ayudar a entender aspectos del comportamiento del hombre y de la sociedad. En ese sentido vale la pena mencionar que la comprensión de las leyes de la evolución de la materia a diversos niveles de organización y de los fenómenos de transición y amplificación de fluctuaciones, fenómenos críticos, puede ayudarnos a entender la dinámica de los cambios sociales revolucionarios, así como el papel del ser humano como motor de estos cambios. El ideograma chino que corresponde al concepto de crisis es la conjunción de peligro y oportunidad; así como en los fenómenos críticos grandes fluctuaciones se presentan con un bajo costo energético, en las crisis es común que pequeñas perturbaciones detonen cambios drásticos.

El estudio de la dinámica no lineal y de los sistemas complejos muestra que en general es imposible predecir lo que va a pasar más allá de un cierto horizonte temporal, característico de cada fenómeno, y que después de ese tiempo es necesario reevaluar la situación del sistema y aplicar las correcciones necesarias. Además, estos sistemas, al evolucionar, transforman su entorno, con lo que se modifican las condiciones y reglas de cambio; esta retroalimentación funcional pone de manifiesto su carácter adaptativo. En el ámbito de lo social, todo esto resalta la importancia de tener la información sobre el estado del sistema y pone de manifiesto las sutilezas inherentes a su control. En el momento actual son los que detentan el poder, siempre una minoría, quienes tienen la capacidad de evaluación y almacenamiento de la información y los medios de control, mientras que la inmensa mayoría de la población carece de estas posibilidades. El entendimiento de la dinámica de los sistemas complejos puede contribuir a que la humanidad sea más libre al exhibir mecanismos de cambio que impidan la dominación de las mayorías por las minorías. Una toma de conciencia de este hecho puede ayudar al desarrollo de una sociedad más equitativa.

La presencia de horizontes de predictibilidad limitados tiene también repercusión sobre el comportamiento ético del ser humano, ya que éste no podrá seguir automáticamente un conjunto de reglas éticas inmutables, sino que deberá considerar las consecuencias inmediatas y mediatas de sus acciones, ayudándole esto a ser más libre y creativo.

Como concluye Marvin Harris en su libro *Caníbales y reyes*: “Puesto que los cambios evolutivos no son plenamente predecibles, es obvio que en el mundo cabe lo que llamamos libre albedrío. Cada decisión individual de aceptar, resistir o cambiar el orden actual altera la probabilidad de que se produzca un resultado evolutivo específico. En tanto el curso de la evolu-

ción cultural nunca está libre de la influencia sistemática, probablemente algunos momentos son más 'abiertos' que otros. Considero que los momentos más abiertos son aquellos en los que un modo de producción alcanza sus límites de crecimiento y pronto debe adoptarse un nuevo modo de producción. Estamos avanzando rápidamente hacia uno de esos momentos de apertura. Cuando lo hayamos atravesado, y sólo entonces, al mirar hacia atrás sabremos por qué los seres humanos eligieron una opción y no otra. Entretanto, la gente que tiene un profundo compromiso personal con una cierta visión del futuro está plenamente justificada en la lucha por sus objetivos, aunque hoy los resultados parezcan remotos e improbables. En la vida, como en cualquier partida cuyo resultado depende tanto de la suerte como de la habilidad, la respuesta racional en caso de desventaja consiste en luchar con más vehemencia".

Con el transcurso de los últimos cinco lustros, día a día se pone de manifiesto que la mejor comprensión de la dinámica no lineal y de los sistemas complejos es la base de las herramientas para el pensamiento a las que se refería Waddington. La cuestión crucial que ahora se nos presenta no se refiere tanto a la herramienta en sí como a su uso. El interés actual en su estudio se ha diseminado notoriamente, con una temática que despliega un amplio abanico. Ante esta situación, a pesar de los muchos aciertos, no es de sorprenderse el que hayan proliferado los abusos y malos usos, algunos causados por una falta de cuidado y entendimiento, otros por una aplicación errada. El reto que se nos presenta es implusar el estudio de los sistemas complejos de manera que contribuya a que los seres humanos tomen libremente aquellas decisiones que ayuden al tránsito hacia una sociedad más justa. 🐜



**Gustavo Martínez Mekler**

Centro de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Waddington, C.H. 1977. *Tools for Thought*. Jonathan Cape, Londres.  
 Glansdorff, P. e I. Prigogine. 1971. *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*. Wiley-Interscience, Londres.  
 Haken, H. 1978. *Synergetics, an introduction*. Springer-Verlag, Berlin.  
 Thom R. 1975. *Structural Stability and Morphogenesis. An outline of a general theory of models*. W. A. Benjamin, Reading.

Kauffman, S. 1993. *The Origins of Order. Self-organization and selection in evolution*. Oxford University Press.  
 Kauffman, S. 1995. *At Home in the Universe. The search for the laws of self-organization and complexity*. Oxford University Press.  
 Goodwin, B. 1994. *How the Leopard Changed its Spots. The evolution of complexity*. Touchstone, Nueva York.  
 Asimov, I. 1993. *Nueva guía de la ciencia*. Ciencias físicas. RBA, Barcelona.  
 Sagan, C. 1998. *El mundo y sus demonios*. Planeta, México.  
 Atlan, H. 1990. *Entre el cristal y el humo: ensayo sobre la organización de lo vivo*. Debate, Madrid.  
 Harris, M. 1986. *Canibales y reyes*. Biblioteca Científica Salvat. Salvat, Barcelona.

Martinez Mekler G. y G. Cocho. 1998. "Al borde del milenio: caos, crisis y complejidad", en *Ciencias de la materia. Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*, Luis de la Peña, comp. Siglo XXI, México.

IMÁGENES

Edward Weston. P. 4: *Shells*, 1927; *Nude*, 1936. P. 7: *Océano*, 1936; *Nude*, 1936.