

ARTÍCULO

## SISTEMAS COMPLEJOS

Revista Digital Universitaria

## Sistemas complejos

### Entrevista con el Dr. Gustavo Martínez Mekler

En entrevista, el Dr. Martínez Mekler nos aclara que si bien los sistemas complejos (que no complicados) no se sujetan a una definición, comparten características en común, como la interacción fuerte entre sus componentes y la emergencia de comportamientos colectivos. Sistemas complejos los hay en todos los ámbitos de la naturaleza, la vida y la sociedad. Su estudio nos proporciona herramientas poderosas para comprender mejor el mundo en que vivimos.

Al tratar con sistemas complejos es habitual toparse con sorpresas. Si su estudio se emprende con éxito, se descubren simplicidades ocultas que emergen de consideraciones globales. En breve, como apunta el Dr. Martínez Mekler, el todo resulta mayor que la suma de las partes.

Vistos los sistemas complejos como redes, se pueden elaborar conceptos y modelos aplicables en áreas tan diversas como la biología del desarrollo, epidemiología, evolución ecológica, tráfico aéreo y urbanismo. Las herramientas del físico son determinantes en el área de sistemas complejos, a pesar de que ha sido tradición de la física plantearse problemas simples. Hoy en día se plantea incluso la posibilidad de que las leyes mismas de la física son propiedades emergentes.

Pero más ampliamente, observa nuestro entrevistado, todas las ciencias y las artes se acercan hoy a los sistemas complejos. Por ello, el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM cuenta actualmente con cientos de colaboradores en una rica gama de disciplinas, provenientes de todo el país.

**Revista Digital Universitaria:** ¿Qué son los sistemas complejos?

**Gustavo Martínez Mekler:** No existe una definición de sistema complejo, universalmente aceptada. En cierta forma esto es parte de su atractivo. La definición depende en buena medida de quién se hace la pregunta y de qué aspecto de un fenómeno o problema se está analizando. Un informático puede pensar en una complejidad algorítmica; un ingeniero en una sistémica, y un biólogo en una funcional. Sin embargo, a pesar de lo anterior, en muchos casos nuestro sentido común es capaz de identificar procesos o situaciones que pudiéramos llamar complejos, como por ejemplo: la turbulencia en un fluido; el tráfico en una ciudad; la organización del sector salud para lidiar con enfermedades como el sida y la diabetes; cualquier ser vivo, que es un sistema complejo; la economía y las finanzas globales, o la conciencia. En fin, la lista es interminable. En esta relación se pueden tipificar los sistemas complejos, en términos de sus propiedades.

Los casos mencionados son sistemas con muchos componentes que interactúan fuertemente, que presentan varias escalas de descripción y dan lugar a la emergencia de comportamientos colectivos. El punto es que la interacción es no lineal, esto es, obedece a comportamientos en los que los efectos no son proporcionales a las causas y pequeñas modificaciones al sistema conducen a cambios significativos.

Por otro lado, en los sistemas complejos el comportamiento de los componentes está correlacionado a todas las escalas temporales y espaciales, debido a una transmisión de información que se propaga. Modificaciones en una parte del sistema se perciben por todos sus elementos. Formalmente se dice que los eventos no son estadísticamente independientes. Además, en estos sistemas se presenta una jerarquía de niveles de descripción, en muchos casos asociada a procesos de auto-organización. Otra característica recurrente es la presencia de procesos de retroalimentación, resultado de las relaciones no lineales. Cuando la retroalimentación es con el entorno del sistema, se tiene un proceso de adaptación, en cuyo caso se habla de sistemas complejos adaptativos.

Un error común es confundir un sistema complicado con uno complejo. En el primer caso se requiere de un esfuerzo considerable y un dominio de herramientas sofisticadas para entender el sistema, sin embargo, no se presentan las características que mencioné anteriormente. Por ejemplo, se puede estar lidiando con un problema muy complicado lineal, típico de la mecánica cuántica, que no es complejo. Las dicotomías complejo-simple y complicado-sencillo, son de distinta naturaleza.

**RDU:** ¿A qué obedece la investigación de la complejidad?

**GMM:** El interés en el estudio de las ciencias de la complejidad es que nos proporcionan las herramientas tanto prácticas como del pensamiento, para una mejor comprensión del mundo en que vivimos. Actualmente el desarrollo sin precedentes de las comunicaciones, ha propiciado una interrelación de múltiples factores previamente aislados; la globalización económica y cultural plantea nuevos retos; los cambios socio-económicos se suscitan en tiempos cortos y dan lugar a procesos adaptativos acelerados; los espectaculares avances tecnológicos plantean nuevos retos para las ciencias, tanto aplicadas como básicas, y el enfoque de los sistemas complejos propociona esquemas para tratamientos transdisciplinarios, que explotan un pensamiento analógico que permite tender puentes entre experiencias de naturaleza muy variada.

**RDU:** ¿Qué son las propiedades emergentes?

**GMM:** Cuando se estudian fenómenos con muchos componentes, pueden darse comportamientos colectivos o cooperativos. En el estudio de los sistemas complejos se habla de comportamientos emergentes que provienen de elementos definidos a una escala de resolución más primitiva y que operan a otro grado de resolución de la jerarquía que mencioné anteriormente. Las relaciones entre los modos colectivos son de naturaleza distinta a las que operan entre los componentes. Son resultado del comportamiento global del sistema.

Al tratar con sistemas complejos, el elemento sorpresa es habitual. El estudio bajo la perspectiva de las ciencias de la complejidad es particularmente exitoso, si las relaciones entre las nuevas unidades colectivas permiten una descripción más simple de la planteada en términos de las unidades primitivas. En este sentido, una meta de las ciencias de la complejidad es exhibir un simplicidad oculta que se evidencia con las unidades apropiadas. Como estos nuevos comportamientos emergen de consideraciones globales del sistema, esto ha llevado a la expresión de que en los sistemas complejos el todo es mayor a la suma de las partes, la cual ha sido utilizada para identificar o definir un sistema complejo. Con el enfoque de los sistemas complejos, el reduccionismo, pilar del desarrollo de la física, se ha visto enriquecido.

Dos ejemplos de propiedades emergentes es el sentimiento de linchamiento que surge en una turba enardecida, totalmente ausente a nivel individual, o la emergencia de significado en el lenguaje. Elementos importantes en la aparición de propiedades emergentes, son la no linealidad en las interacciones y la retroalimentación en las dinámicas presentes en cada nivel de organización y entre distintos niveles de organización.

**RDU:** ¿Qué es la dinámica de redes?

**GMM:** Al estar constituidos los sistemas complejos por muchos componentes interactuantes, una red donde los nodos son los componentes y los enlaces indican las interacciones, resulta ser una representación propicia para su estudio. La topología de la red define propiedades estructurales del sistema, tales como el grado de conectividad de los elementos. Una vez definida la red, surge la pregunta de cómo se va modificando el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, de cómo van variando los valores de las variables asociadas a los nodos. Esta evolución es lo que constituye la dinámica de la red. Si se piensa que cada nodo puede estar en uno de dos estados: prendido (uno) o apagado (cero), se tiene una red *Booleana*, donde el acoplamiento puede activar o desactivar los nodos. La forma como se transmite una señal obedece a unas reglas

de regulación, las cuales establecen la dinámica. Esta situación puede visualizarse en términos de un modelo para un circuito eléctrico de interruptores, o en biología molecular como red de regulación de la actividad genética.

La complejidad del comportamiento del sistema es sensible al juego entre la topología y la dinámica definida sobre ella. En algunos casos la dinámica puede incluso modificar la topología. En el estudio del comportamiento dinámico de una red, resulta importante la identificación de módulos que actúan como entidades efectivas o la de subpoblaciones de nodos que siguen distintos patrones de cambio. Se habla de co-evolución de poblaciones interactuantes; redes de redes asociadas a unidades modulares, y dinámicas adaptativas donde la topología se va modificando, ya sea en términos de la evolución misma del sistema o por cambios en el entorno. La consideración adicional de la distribución espacial de los elementos, es tema de frontera en lo que se ha determinado como dinámica espacio-temporal de sistemas extendidos. Estas consideraciones son cruciales al plantear modelos en la biología del desarrollo, en epidemiología, evolución ecológica, inmunología, tráfico aéreo y urbanismo, por mencionar sólo unas instancias.

**RDU:** ¿Cuál es el papel de la física en la investigación de sistemas complejos?

**GMM:** La injerencia de la física en el desarrollo de los estudios de la complejidad, ha sido fundamental, particularmente al darse la confluencia de la física estadística con la dinámica no lineal. La conjunción de cierto grado de pensamiento abstracto, con un fuerte contacto con la naturaleza, así como la flexibilidad inherente a la formación de los físicos, han sido determinantes en el área de los sistemas complejos, esto a pesar de que la mayoría de los problemas planteados por la física –por más complicados que sean– caen en la categoría de ser simples. Honrosas excepciones son, entre otras, la turbulencia y los fenómenos críticos, donde sí se hace contacto con la complejidad. La intervención de la física en los sistemas complejos ha generado avances en ambas direcciones. Por ejemplo, ahora se hacen investigaciones tanto en biología física como en física inspirada en la biología. Se habla de la materia adaptativa inerte y de modelos de agentes en la sociología. Es más, a nivel conceptual básico, se encuentra bajo discusión el enfoque de que las leyes de la física son propiedades emergentes.

**RDU:** ¿Qué otras áreas del conocimiento intervienen en la investigación de sistemas complejos?

**GMM:** Todas, y esto es parte de la fascinación por el estudio de los sistemas complejos. Es una

caja de pandora que propicia el encuentro y la colaboración entre personas con formaciones muy diversas. Tradicionalmente el nicho de los sistemas complejos lo provee la biología. De hecho, una definición aventurada de la teoría de los sistemas complejos, es el desarrollo de la matemática para el estudio de la biología. Hoy en día, las ciencias sociales, económicas, administrativas, naturales, humanísticas e incluso las artes, se han acercado a los sistemas complejos. Psicólogos, antropólogos, historiadores, médicos, ingenieros, lingüistas, músicos, entre muchos otros, han extendido sus horizontes al incursionar en los estudios de la complejidad.

**RDU:** ¿Con qué finalidad se creó en 1990 el Departamento de Sistemas Complejos del Instituto de Física de la UNAM y en 2008 el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3)?

**GMM:** La creación del Departamento de Sistemas Complejos del IFUNAM fue resultado de un proceso de alrededor de una década, durante la cual se realizó un seminario semanal sobre Física Estadística y Sistemas Dinámicos, así como de las acciones del Grupo Universitario Interdisciplinario: Dinámica no Lineal y Fenómenos Colectivos, que se desarrolló como proyecto de la UNAM durante un lustro. La finalidad del Departamento fue la de promover estos estudios sobre sistemas complejos, dentro de un marco institucional. En la práctica, los miembros del Departamento siempre han sido físicos. Posteriormente, en 2008, con la creación del Centro de Ciencias de la Complejidad (C3), en la UNAM se amplió el horizonte al contemplar la participación de académicos con formación en otras áreas. En ambos casos, la finalidad ha sido desarrollar estudios interdisciplinarios que permitan abordar problemas de trascendencia. Para los físicos, esto nos abre una oportunidad para tratar problemas de impacto social, encaminados a un bienestar más justo.

**RDU:** ¿Cuáles son las áreas de aplicación de los proyectos de investigación realizados en el Centro de Ciencias de la Complejidad?

**GMM:** Los proyectos semilla del Centro, son: Complejidad en Biología Celular (ahora Biología de Sistemas), Complejidad Ecológica, Inteligencia Computacional y Complejidad Social. Posteriormente, dado que en todos ellos se compartía una preocupación sobre problemas de salud, se creó el programa Complejidad y Salud Pública. Actualmente el C3 aglutina trabajo de múltiples dependencias de la UNAM, otras instituciones de educación superior y centros de investigación de todo tipo. Cuenta con más de doscientos colaboradores provenientes de toda la república, tanto del sector público como el privado.

### **Lecturas complementarias:**

1. Martínez-Mekler, G. (2000). Una aproximación a los sistemas complejos. *Ciencias*, 59, 6-9, Julio-Septiembre.
2. Martínez-Mekler, G y Cocho G. (1999) *Al Borde del Milenio: Caos, Crisis y Complejidad*. En Luis de la Peña (Coordinador), *Ciencias de la Materia: Génesis y Evolución de sus Conceptos Fundamentales*. Colección Aprendiendo a Aprender. México: Siglo XXI Editores.
3. Laughlin R. B. (2007) *Un universo diferente: la reinención de la física en la Edad de la Emergencia*. Serie Conocimiento. Argentina: Editorial Katz.
4. Flores Valdés, J., Martínez-Mekler, G. (Editores). (2011) *Encuentros con la Complejidad*. Cuadernos del Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos de la UNAM, Vol. 5. México: Siglo XXI Editores-UNAM.
5. *Revista Digital Universitaria*, Volumen 11, Número 6, junio 2010.