
¿Qué son las Ciencias de la Complejidad?

Morales-Enciso, Sergio *The University of Warwick*

30 de Noviembre de 2012, Estrasburgo, Francia.

Casi el 99% de los componentes del cuerpo humano se encuentran en sustancias tan simples como aire, carbón, agua y gis. Se estima que el costo de los elementos que conforman a un ser humano es de sólo algunos euros. Sin embargo –de alguna manera– trillones de partículas de estas sustancias tan simples y ordinarias conspiran de modo impredecible para auto organizarse y dar lugar a seres humanos inteligentes. Una de las preguntas más intrigantes que nos podemos hacer es ¿cómo algo tan complejo es el resultado de elementos tan simples? [1]

La frase anti reduccionista comúnmente atribuida a Aristóteles, “el todo es más que la suma de sus partes”, adquiere cada vez mayor importancia conforme diversas ciencias [6] tales como Biología de Sistemas, Economía Conductual, Genética, Geología, Finanzas, Neurociencias, Ecología y Epidemiología –entre muchas otras– dejan atrás el reduccionismo para explicar cómo comportamiento complejo puede surgir a partir de un gran número de componentes independientes y simples. Las Ciencias de la Complejidad ofrecen un ambiente interdisciplinario que permite estudiar, caracterizar y en algunos casos predecir y controlar este tipo de comportamiento gra-

cias a herramientas provenientes de diferentes disciplinas tales como Teoría de Redes, Automatas Celulares, Sistemas Dinámicos y Caos, Física de Transiciones de Fase y Estadística, Teoría de la Información, Fractales y Modelado basado en Agentes.

En esta ponencia de carácter de divulgación científica se introducirá al oyente al fascinante campo de las Ciencias de la Complejidad y sus vastas aplicaciones desde una perspectiva más reflexiva que técnica comenzando por algunas definiciones de complejidad –probablemente controversiales ya que diferentes comunidades científicas difieren en este aspecto– así como diversas medidas para cuantificar el nivel de complejidad en un sistema. Posteriormente, algunos ejemplos de sistemas complejos serán ilustrados, seguidos de una breve recapitulación de la historia de este campo. Finalmente, se explorará el desarrollo futuro y promoción de las Ciencias de la Complejidad en el caso particular de México.

Algunas de tantas definiciones

Particularmente en ciencias, es común comenzar definiendo términos y conceptos fundamentales y progresivamente construir argumentos o teorías sobre

estos conceptos. Sin embargo, a pesar de que científicos alrededor del mundo han trabajado durante al menos 50 años en temas relacionados a las Ciencias de la Complejidad (aunque no necesariamente bajo ese nombre), no existe aún consenso en una única definición universalmente aceptada. En cambio, diferentes autores han propuesto una serie de definiciones, algunas un tanto más rigurosas que otras, de las cuales estas son sólo algunas. Por ejemplo, en su reciente plática de TED¹, George Whitesides comienza caracterizando la *Simplicidad* como aquello que es predecible y que exhibe comportamiento determinístico y lineal (los efectos son proporcionales a las causas). Argumenta además que, aunque es difícil dar una definición rigurosa de *Simplicidad*, en tanto que seres humanos podemos reconocerla al verla, y parte de este punto para decir que todo aquello que no es simple es, por ende, complejo.

De una manera más técnica y menos genérica, Yaneer Bar-Yam define Ciencias de la Complejidad como el estudio de sistemas con muchos componentes interdependientes [2]. Y Melanie Mitchell propone que un sistema complejo es un sistema en el que grandes redes de componentes carecientes de cualquier tipo de control centralizado y que obedecen reglas de operación simples exhiben comportamiento colectivo complejo, procesamiento de información sofisticado, y adaptación mediante aprendizaje o evolución [6].

Ejemplos de sistemas complejos

Una de las mejores formas de entender qué es un sistema complejo es mediante ejemplos. Tomemos el cuerpo humano, un estereotípico ejemplo de un sistema complejo, y seleccionemos además un nivel jerárquico de complejidad arbitrario para comenzar el recorrido. Digamos el nivel atómico. Bajo las condiciones adecuadas, átomos –principalmente de hidrógeno, oxígeno, carbono, nitrógeno, calcio y fósforo– se combinan para formar moléculas que –a su vez– se adhieren a otras moléculas para generar macromoléculas que son la base para crear células. Las células tienden a agruparse para formar tejidos que vistos desde un nivel macroscópico emergen como órganos. Dichos órganos se organizan en sistemas, y el cuerpo humano no es otra cosa que un sistema compuesto de sistemas de órganos. Desde luego, los átomos por los que comenzamos pueden descomponerse en partículas subatómicas y podríamos haber partido en la dirección opuesta.

Es importante notar que ésta es sólo una burda sim-

plificación de procesos sumamente complejos y complicados, muchos de los cuales aún no se entienden por completo. Lo importante es notar que, en cada nivel, un gran número de elementos, relativamente simples en comparación con el resultado que emerge de su combinación e interacción, se auto organizan mediante el intercambio local de información sin necesidad de una entidad central que los coordine de una manera que parecería imposible de predecir a partir de las simples reglas que rigen el comportamiento de los elementos y sus interacciones.

Otro ejemplo de un sistema complejo es Internet, que no es otra cosa más que una red de redes de computadoras. Y las computadoras están compuestas por miles de circuitos integrados que a su vez son el resultado de millones de transistores.

Aunque en este caso en los niveles más bajos los elementos no necesariamente se auto organizan, el resultado emergente de la combinación de los transistores –Internet–, no es predecible a partir de una descripción –por más detallada que ésta sea– de un sólo transistor. Y a niveles más altos, el mismo comportamiento de auto organización puede ser observado si consideramos las rutas que la información sigue.

Otros ejemplos de sistemas complejos pueden ser el cerebro, los sistemas financieros, redes sociales, ecosistemas, y el sistema climático de nuestro planeta por mencionar sólo algunos.

¿Qué tan complejo es lo complejo?

Una vez que tenemos una idea de lo que son los sistemas complejos, una pregunta natural es ¿cómo comparar dichos sistemas? Esta pregunta ha dado lugar a muchos diferentes intentos –algunos más exitosos que otros– de cuantificar el nivel de complejidad de un sistema. Dichas medidas provienen de diferentes áreas del conocimiento y usualmente aplican a sistemas de una misma naturaleza. Además de proveer un método objetivo para comparar diferentes sistemas, la capacidad para cuantificar el nivel de complejidad no sólo crearía la posibilidad de evaluar, predecir, modificar, controlar e incluso hasta diseñar sistemas complejos, sino que además permitiría dar seguimiento a la evolución de dicha magnitud a lo largo del tiempo para así entender mejor su evolución.

Seth Lloyd hace notar en su lista no exhaustiva de medidas de Complejidad [3] que la mayoría de ellas pueden agruparse en tres categorías. La primera engloba aquellas medidas que se basan en la dificultad de descripción de un problema, y generalmente se

¹Plática completa disponible en TED.com

miden en bits o alguna medida de información. Ejemplos destacados son entropía, contenido algorítmico de información, información de Fisher y dimensión fractal. La segunda categoría contiene a las medidas basadas en la dificultad de creación y sus unidades típicas son cantidades físicas como energía, costo o tiempo, por ejemplo complejidad computacional o profundidad termodinámica. Y la tercera categoría abarca medidas con base en el grado de organización como complejidad jerárquica o información mutua.

Pero, ¿cómo emergieron las Ciencias de la Complejidad?

Aunque de manera formal se dice que el estudio de sistemas complejos –bajo ese nombre– comenzó con la fundación del Instituto Santa Fe en Nuevo México en el año de 1984, muchos centros de investigación ya tocaban desde años atrás estos temas, cada uno desde diferentes perspectivas. Esto se debe a que científicos provenientes de áreas como Biología, Química, modelado climático, Física, Ciencias de la Computación, Ciencias Sociales y Economía, entre muchas otras, se enfrentaron con problemas similares que las herramientas de modelado disponibles en aquella época no eran capaces de representar. En particular, cabe poner de relieve el trabajo de cuatro distinguidos científicos que vieron al mundo desde otra perspectiva y desafiaron el entonces paradigma científico en el que se percibía al universo como una máquina gigante de tal manera que conforme se tuviera acceso a una mayor capacidad de cómputo, se tendría la habilidad para resolver cada vez más ecuaciones y así poder realizar cada vez predicciones más acertadas.

Alan Turing

En 1952, Alan Turing –considerado padre de las Ciencias de la Computación y de la Inteligencia Artificial– postuló por primera vez una explicación matemática de cómo las células de un embrión podrían usar sustancias químicas como señales y así auto organizarse en diferentes órganos, sin por ello tener conciencia de estar formando parte de algo mucho más grande y complejo. Sorprendentemente, el tipo de ecuaciones que Turing utilizó en su artículo *La base química de la morfogénesis* [7] eran ecuaciones más comúnmente empleadas para describir procesos físicos. La genialidad de esta idea radica en que una serie de elementos que siguen un conjunto de reglas simples pueden exhibir –en conjunto– un comportamiento completamente inesperado, impredecible a partir de dichas

reglas.

Boris Belousov

De manera aislada, en la década de los años cincuentas, el químico Boris Belousov descubrió una reacción química –inexplicable en aquel entonces– al tratar de recrear el proceso de absorción de la glucosa en el cuerpo humano. Al mezclar ciertas sustancias, el color del líquido resultante cambiaba de manera inesperada de un color a otro y después de un tiempo regresaba al color original, oscilando de manera aparentemente aleatoria. Este fenómeno que pareciera contradecir las leyes de la Física, es conocido en la actualidad como comportamiento crítico y explica también la razón por la que un imán tiene propiedades magnéticas, por qué ocurren los terremotos, por qué algunos animales tienen manchas e incluso cómo es que las células cardíacas hacen palpar al corazón.

Edward Norton Lorenz

Mientras trabajaba en modelos computacionales de la atmósfera terrestre y de los océanos, Lorenz se interesó en la relación no lineal de la velocidad del viento, la temperatura y la presión atmosférica. Sin embargo se dio cuenta que los métodos estadísticos tradicionales no sólo no eran capaces de proveer resultados confiables sino que en ocasiones al introducir muy ligeras perturbaciones, el modelo producía resultados completamente diferentes. Esto llevó a Lorenz a desarrollar la teoría del Caos, la cual sintetizó con el famoso título de su plática *¿El aleteo de una mariposa en Brasil puede originar un tornado en Texas?*. La teoría del Caos postula que ciertos sistemas dinámicos son muy sensibles a las condiciones iniciales, es decir, que sin importar con qué grado de precisión conozcamos el estado de un sistema caótico, no es posible predecir su trayectoria ya que el más ligero cambio en dichas condiciones iniciales puede desencadenar un cambio completamente impredecible. Un punto interesante de esta teoría es que no se requiere de un sistema muy complejo para observar comportamiento caótico. Por ejemplo, un sistema de sólo tres cuerpos sujetos a las leyes universales de gravitación presenta este comportamiento.

Benoît B. Mandelbrot

Intrigado por la incapacidad del lenguaje matemático de su época para describir la naturaleza, Mandelbrot desarrolló la teoría de los fractales y la idea de autosimilaridad, que es la propiedad de un objeto en

el que el todo es similar a una parte de sí mismo. Mandelbrot planteó las limitaciones de la geometría convencional para describir conceptos aparentemente tan sencillos como el perímetro de la Gran Bretaña. En su artículo *¿Qué tan larga es la costa de la Gran Bretaña? Autosimilaridad y dimensionalidad fraccional* [4] argumenta que el resultado de dicha medida dependerá enteramente del tamaño del instrumento que se utilice para medirla ya que conforme utilicemos una regla más pequeña, ésta permitirá hacer menos aproximaciones al entrar en rincones más pequeños y al tomar en cuenta la curvatura de más y más grietas. Esta aparentemente inocente reflexión trajo consecuencias fundamentales al modelar sistemas gracias a los conceptos de dimensión fractal y análisis de múltiples escalas. El primero generaliza la idea de que las dimensiones deben ser números enteros positivos, y el segundo proporciona un marco para analizar sistemas a diferentes escalas espacio-temporales.

En conjunto con muchos otros avances científicos importantes, estas ideas lograron derrocar el tradicional paradigma mecánico en el cual se concebía al universo como determinístico en favor de la naturaleza aleatoria e impredecible de nuestro universo.

Entonces, ¿cómo explicamos el cuerpo humano a partir de estos simples elementos?

La respuesta corta puede ser la capacidad de los sistemas que componen al cuerpo humano para adaptarse, a través de la evolución, en cada una de sus escalas y a sus correspondientes velocidades. La adaptación de cada uno de estos sistemas es posible gracias a dos principios, la diversificación –mediante ligeras mutaciones aleatorias– y la retroalimentación que el sistema completo recibe de su medio. La retroalimentación forma parte fundamental de las reglas básicas que rigen el comportamiento de los elementos a nivel individual y es positiva en la medida en la que el comportamiento agregado del sistema le permite adaptarse a su medio, incentivando o inhibiendo la proliferación de la mutación en cuestión. De esta suerte, la supervivencia del mejor adaptado al ambiente en cada nivel jerárquico exhibe un efecto de memoria acumulada a través del tiempo que permite la evolución de partículas elementales en sistemas de complejidad incremental hasta llegar un sistema capaz de exhibir inteligencia como el ser humano.

El comportamiento impredecible y difícil de describir exhibido por sistemas complejos nace de reglas

simples que gobiernan a los elementos. La peculiaridad de estas reglas radica en la interacción, retroalimentación e intercambio de información que acontece entre los componentes del sistema a lo largo del espacio y tiempo y les permite así adaptarse, agregando cada vez mayor complejidad a nivel sistema sin que exista diseño alguno o conciencia de ello.

Evolución de las Ciencias de la Complejidad en México

En palabras de Gustavo Martínez Mekler, “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. [...] 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)” [5]. Actualmente, el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM cuenta con cientos de colaboradores en una rica gama de disciplinas, provenientes de todo el país, y en breve contará con su propio edificio en CU, ofreciendo además uno de los pocos programas de posgrado en el tema.

Referencias

- [1] Jim Al-Khalili and Nic Stacey. The secret life of chaos, prod by Nic Stacey and Paul Sen. Documentary, BBC, 2010.
- [2] Y. Bar-Yam. *Dynamics of Complex Systems*. Studies in Nonlinearity. Westview Press, July 2003.
- [3] Murray Gell-Mann and Seth Lloyd. Information measures, effective complexity, and total information. *Complexity*, 2(1):44–52, 1996.
- [4] Benoit Mandelbrot. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science*, 156(3775):636–638, May 1967.
- [5] Gustavo Martínez-Mekler. Una aproximación a los sistemas complejos. *Ciencias, Mexico*, 59:6–9, Julio-Septiembre 2009.
- [6] Melanie Mitchell. *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press, USA, April 2009.
- [7] Alan M. Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1952.