Sistemas complejos y economía: caracterización, contrastes, modelación y aplicación

△

Gustavo Carreón Vázquez,[1] *Jorge Zaragoza Badillo*[2] *y Edgar Acatitla Romero*[3]

Resumen

Hoy día, la labor científica está cambiando hacia una mayor interacción e integración de conocimientos que provienen de distintas disciplinas y, como consecuencia, surgen nuevos resultados que no son construidos con conceptos que pertenecen exclusivamente al área de estudio. En este sentido, el paradigma de los sistemas complejos es una propuesta metodológica para entender y estudiar fenómenos de distinta índole ya que, en ocasiones, las explicaciones que surgen dentro de sus disciplinas de origen son limitadas.

En el caso de la economía, los postulados de la teoría neoclásica acotan las explicaciones de manera estática y se asume una forma de equilibrio general definido a partir de homogeneidad e información completa. En contraste, por ejemplo en los mercados financieros, la dinámica se genera con la intervención de instituciones reguladoras y con miles de agentes heterogéneos que compran y venden documentos financieros, cada uno con sus propios intereses, de tal forma que el comportamiento de los precios se hace poco predecible, sin llegar a un equilibrio.

En este trabajo se propone estudiar los fenómenos de la economía mediante el paradigma de los sistemas complejos; se presenta la necesidad de su estudio mostrando las principales limitaciones de la teoría neoclásica, además de hacer una breve conexión con otras vertientes teóricas de la economía afines a este paradigma. A manera de ejemplo, se estudia la dinámica de la Bolsa Mexicana de Valores, en particular el Índice de Precios y Coti-

[1] Instituto de Investigaciones Económicas (IIEc), UNAM.
[2] Instituto de Investigaciones Económicas (IIEc), UNAM.
[3] Facultad de Contaduría y Administración (FCA), UNAM.

zaciones. Por último, se propone un modelo computacional inspirado en el modelo de la "pila de arena" para estudiar dinámicas en estado crítico.

Palabras clave: complejidad, economía, estado crítico, mercados financieros, modelo de la pila de arena, modelo computacional, sistemas complejos.

Introducción

El desarrollo de la ciencia moderna ha tenido como base el paradigma tradicional, el cual se caracteriza por un enfoque reduccionista y lineal; aunque ha tenido éxito, se ha enfrentado a fenómenos considerados fuera del equilibrio los cuales no ha podido explicar satisfactoriamente. Esto ha planteado la necesidad de abordar los problemas con un nuevo paradigma que integre los componentes del sistema y, sobre todo, las relaciones que existen entre ellos.

Un paradigma alternativo para enfrentar estos problemas es el de sistemas complejos (SC), este se caracteriza por una forma de trabajo interdisciplinario que pone énfasis en el estudio de las propiedades dinámicas y la naturaleza no lineal de los fenómenos. Una parte fundamental es la integración de modelos matemáticos y computacionales en la metodología que analiza y explica procesos que han sido entendidos en forma limitada por las distintas disciplinas.

En particular, la teoría económica ortodoxa se ha visto rebasada al explicar los comportamientos fluctuantes de los fenómenos económicos reales.

Un esfuerzo por entender y explicar estos fenómenos se dio a principios de los años ochenta del siglo XX cuando se estableció el Instituto Santa Fe en Nuevo México, Estados Unidos, para estudiar problemas referentes a diversas disciplinas: física, biología, computación y economía, entre otras. Formalmente, se estableció un programa de estudio de la economía en 1986 liderado por Philip W. Anderson y Kenneth Arrow —ambos Premio Nobel de Economía— en el que han participado investigadores como Brian Arthur y Doyne Farmer. En la actualidad, varias universidades alrededor del mundo tienen grupos o departamentos trabajando en el área de "economía de la complejidad" o *Complexity Economics*.

Este ensayo muestra la importancia de abordar los fenómenos económicos bajo el paradigma de los SC. La primera parte es una breve introducción a las propiedades generales de los SC y algunas precisiones sobre el concepto de "complejidad"; en la segunda se presenta una caracterización

de la teoría económica ortodoxa; la tercera, muestra la afinidad de algunas vertientes teóricas heterodoxas de la economía con este paradigma; la cuarta, retoman algunos planteamientos del trabajo de John Holland y Brian Arthur para caracterizar comportamientos de los fenómenos económicos, se resalta la inestabilidad, la incertidumbre inherente al sistema y la operatividad con información incompleta. En la quinta parte se expone un caso específico de la aplicación de una metodología de SC para estudiar el fenómeno de los mercados de valores. Por medio de la recolección de datos empíricos, se muestra que las fluctuaciones son parte de la dinámica de los mercados y que no pueden ser obviadas o descartadas en los análisis. Para comprender la dinámica de estas fluctuaciones se propone un modelo computacional basado en autómatas celulares, se hace uso de las propiedades de los SC y se realiza un análisis de los resultados para llegar a una posible interpretación del fenómeno. En la última parte se propone una lista de aportes del paradigma de los SC a la economía.

Los sistemas complejos

La palabra complejidad viene del latín *plexus* que significa entretejido; por otro lado, hay muchas formas para definir un sistema, pero:

> Para nosotros, los sistemas son las *cosas* más los *procesos*. Consecuentemente, un sistema consta de una base material y de un conjunto de relaciones entre los objetos que lo constituyen (…) Los *procesos* definen y son definidos por una dinámica (P. Miramontes, 1999: 72).

Con base en los significados previos, se puede entender a los SC como un entramado; son sistemas que están compuestos por un determinado número de componentes con distinto grado de interrelación, donde la evolución de cada uno de ellos depende de su "interacción" con el entorno, a su vez, se generan correlaciones de corto y largo alcance las cuales producen un comportamiento global. Los SC se distinguen de otros sistemas porque son el resultado de una dinámica no-lineal que casi siempre tiene dos partes: *a)* una dinámica local, la cual modifica el estado de los componentes como resultado de su interacción con los vecinos. y *b)* una dinámica global, la cual está condicionada por las restricciones que pesan sobre el sistema y que provienen de la interacción de este con el entorno (P. Miramontes, 1999).

Al modelar fenómenos complejos de distinta índole se identifican principalmente los componentes y sus relaciones en el sistema para estudiar sus procesos.

Propiedades de los sistemas complejos

Diversos autores exponen diferentes propiedades generales de los SC para explicar y entender su funcionamiento. A continuación se enlistan algunas de las más representativas.

- *Predictibilidad a corto plazo* (Lewin, 1995; Gershenson, 2013).
- *Irreductibilidad*: es la imposibilidad de encontrar un método o fórmula explícita para definir la dinámica, es decir, se tiene que transitar por los estados subsecuentes para conocer el futuro del sistema (Gershenson, 2013).
- *Frustración*: es la imposibilidad de satisfacer simultáneamente las restricciones impuestas por el entorno (P. Miramontes, 1999).
- *Ruptura de simetría*: aparición de estructuras y patrones espacio-temporales en estados homogéneos del sistema (Prigogine, 1993; P. Miramontes, 1999).
- *Autoorganización*: surgimiento de comportamientos globales a partir de la interacción entre los elementos constituyentes y el entorno (Gershenson, 2013).
- *Propiedades emergentes*: son el resultado de procesos distribuidos y descentralizados, su naturaleza es intrínsecamente colectiva y surgen en una escala superior (P. Miramontes, 1999; Gershenson, 2013).
- *Criticalidad autoorganizada* (CAO): debido a la dinámica interna del sistema, este evoluciona de manera natural hacia un estado crítico donde existen correlaciones a corto y largo alcance, fluctuaciones de todos los tamaños que se distribuyen como una ley de Zipf-Pareto, es decir, una ley de potencias de la forma 1/f la cual exhibe propiedades de autosemejanza temporal y espacial (Bak, 1996).
- *Geometría fractal*: se presentan estructuras autosemejantes a cualquier escala espacial o temporal y los objetos tienen una dimensión fraccionaria (Mandelbrot, 1983).

En algún momento de la evolución del sistema se pueden presentar estas propiedades, por ejemplo, un sistema homogéneo puede transitar hacia un estado crítico por medio de la autoorganización y, como resultado, obtener una ley de potencias que representa una medida del sistema en un tiempo específico; es posible que los sistemas económicos estén transitando hacia un estado crítico (Mandelbrot y Hudson, 2006).

En el estudio de SC es conveniente "diferenciar a lo complejo como algo compuesto y a lo complicado como algo intrincado" (Gershenson, 2013: 14). Un ejemplo de un sistema complejo puede ser el sistema económico de cualquier ciudad, región o país, incluyendo el sistema económico mundial; y un ejemplo de un sistema complicado podría ser la arquitectura de un motor de auto, ya que es un sistema mecánico preciso donde no puede haber ruido o incertidumbre, fue creado para un propósito y carece de propiedades no especificadas en su construcción, por lo que no cumple con las propiedades generales de un SC.

En el libro *How Nature Works*, Per Bak (1996) muestra cómo sistemas de diferente composición tienen propiedades dinámicas semejantes cuando se encuentran en estado de criticalidad autoorganizada (CAO). Un ejemplo del mundo real de un sistema complejo en estado de CAO son las montañas cubiertas de nieve y las avalanchas que pueden generarse; una pequeña perturbación, por ejemplo, un animal que se pare en un determinado punto podría desencadenar una avalancha. Se esperaría que las magnitudes de estas avalanchas sigan una ley de potencias 1/f. Otro ejemplo es el mercado financiero, en particular las bolsas de valores, donde miles de accionistas interactúan y establecen una relación de interdependencia mediante la compra y venta de acciones de las empresas; en este estado pueden existir fluctuaciones de todas las magnitudes, donde las más grandes pueden desembocar en un *crash* financiero (Mandelbrot y Hudson, 2006).

Se han usado los SC en trabajos interdisciplinarios para modelar, entender y explicar fenómenos físicos, biológicos, químicos, sociales y económicos (Bar-Yam, 1999; Sayama, 2015; Fieguth, 2017; Thurner *et al.*, 2018). En particular, la economía ha sido abordada por una diversidad de teorías, las cuales no han logrado comprender y explicar satisfactoriamente los fenómenos a nivel micro y macroeconómico, ni la conexión entre ellos. Estudiar a la economía como un SC es una alternativa para explicar aspectos que no han sido suficientemente entendidos, por ejemplo, a nivel micro, el comportamiento de elección de consumidores y productores; a nivel macro, el ciclo económico y el fenómeno del desarrollo; y a nivel intermedio, el comportamiento de los mercados, en particular las bolsas de valores.

En el siguiente apartado se verá que no es suficiente estudiar a la economía desde la perspectiva ortodoxa, se mostrarán anomalías de esta y la necesidad de abordar a la economía como un SC en evolución.

Caracterización de la teoría económica ortodoxa

En economía, la vertiente ortodoxa parte de un conjunto de supuestos en los que se establece que el individuo elige, entre un conjunto de posibilidades, las mejores opciones, esto es, aquellas que le permiten maximizar su utilidad; es decir, se supone que el individuo elige racionalmente bajo el propósito de lograr su objetivo. Cabe señalar que esta idea de la racionalidad constituye el principio más importante de la teoría económica:

> Según esta concepción de la racionalidad, la existencia de la función de utilidad en la mente del tomador de decisiones implica que los individuos poseen un mecanismo que relaciona sus objetivos con su comportamiento maximizador. Los objetivos son ordenados en su mente preferencialmente. Es decir, la función de utilidad es, simplemente, una "cuantificación" (ordinal, no cardinal) de las preferencias del tomador de decisiones; lo que obliga a que dichas preferencias sean comparables y coherentes, transitivas (i.e. si A es preferible a B, y B a C, entonces A debe ser preferible a C). Y también obliga a traducir los valores ordinales de la "cuantificación" a un común denominador: la utilidad, que es la que se maximiza (Orive, 2006: 76).

El punto de partida de esta teoría es explicar la conducta de elección racional de los consumidores y los productores vistos como un individuo promedio. Con base en un conjunto de supuestos que se refieren a las condiciones de elección de un consumidor o un productor, se deduce su comportamiento en el mercado. Por ejemplo, en el caso de un consumidor, se supone que su elección en el mercado la lleva a cabo bajo las siguientes condiciones: *i)* al elegir entre ciertas cantidades de artículos de consumo, puede decidir sobre cuál opción prefiere o puede declararse indiferente; *ii)* es coherente al escoger entre combinaciones de bienes; *iii)* prefiere más a menos —principio de insaciabilidad—; y *iv)* tiene pleno conocimiento de la disponibilidad de bienes, de sus cualidades tecnológicas y de sus precios exactos —principio de racionalidad completa— (Varian, 1999). Con base en este modelo, se deduce la curva de demanda del mercado y se extiende al comportamiento del productor para deducir también la curva de oferta del mercado. Una vez que se tienen ambas curvas, se estudian, con base en la formalidad matemática, las condiciones de posibilidad de equilibrio del mercado. Cabe señalar que el equilibrio de mercado es estático, es decir, una vez que se logra no hay motivos para abandonar dicho estado ya que en ese punto consumidores y productores están satisfechos. Posteriormente, este modelo básico se extiende a escala macroeconómica y en otros ámbitos de la economía tales como los

mercados financieros, crecimiento económico, economía internacional, economía del medio ambiente, economía de la salud, entre otras áreas.

Es un cuerpo teórico que, desde el punto de vista lógico, es coherente y, por ello, es la base para elaborar políticas públicas en distintos ámbitos, de ahí que sea la vertiente dominante. Además, con base en la econometría, los economistas que se inscriben en esta teoría han tratado de mostrar la correspondencia entre los resultados de esta y el comportamiento observable de la economía en las últimas décadas (Orive, 2006).

Sin embargo, en el proceso de extensión de la teoría ortodoxa, han surgido una serie de anomalías que muestran las limitaciones de su enfoque y dan pie a la búsqueda de alternativas teóricas y metodológicas para el estudio de la economía y una mejor comprensión de ella. En el siguiente apartado se presenta una revisión de algunas de estas anomalías.

Las limitaciones de la teoría económica ortodoxa

En su libro *La estructura de las revoluciones científicas*, Thomas S. Kuhn plantea la idea de que un paradigma científico",[4] una vez que ha sido aceptado por una comunidad científica, entra en un periodo de ciencia normal, caracterizado por éxitos y extensiones de la teoría dominante a partir de la solución de problemas. Sin embargo, durante ese periodo de extensiones pueden surgir "anomalías, es decir, nuevos descubrimientos que plantean problemas de investigación no resueltos satisfactoriamente por el paradigma en curso, lo que suele llevar a los científicos a realizar nuevas propuestas teóricas (Kuhn, 1986). Así:

> La ciencia normal no tiende hacia novedades fácticas y, cuando tiene éxito, no descubre ninguna. Sin embargo, la investigación científica descubre repetidamente fenómenos nuevos e inesperados y los científicos han inventado, de manera continua, teorías radicalmente nuevas (Kuhn, 1986: 92).

Se puede afirmar que, en parte, esto ha sucedido con la teoría económica ortodoxa. De esta forma, entre la segunda mitad del siglo XIX y el primer tercio del siglo XX, la teoría neoclásica transitó por su fase normal, extendiendo el modelo básico del consumidor hacia la producción y otras áreas como el mercado monetario y la bolsa de valores. Sin embargo, la dinámi-

[4] El término "paradigma científico" se entiende como el conjunto de teorías, compromisos ontológicos y metodológicos que comparten los científicos que pertenecen a una comunidad científica.

ca de la economía la ha puesto a prueba en distintos momentos de crisis durante el siglo XX y la primera década del XXI.

Por ejemplo, en la primera gran crisis de la era moderna, ocurrida entre 1929 y 1933, la teoría ortodoxa se vio incapaz de explicar los mecanismos de esta, así como de proponer medidas de política para salir de ella. Esto condujo a John Maynard Keynes, economista inglés formado en esta vertiente, a reconocer esta incapacidad de la teoría y las limitaciones de su enfoque en su libro *Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero*, por lo que propuso otro enfoque —macroeconómico— a partir de supuestos más realistas, como el desempleo involuntario y el equilibrio con desempleo (Keynes, 2006). Cabe señalar que en la visión de Keynes acerca de la economía está presente la idea de su dinámica e inestabilidad, por lo que sugiere la presencia rectora del Estado para reactivar a la economía cuando se encuentra en recesión.

Bajo estas ideas, la economía moderna se expandió y fortaleció durante el periodo de posguerra. Sin embargo, las contradicciones en las que incurrió el Estado Benefactor[5] marcaron su agotamiento y, nuevamente, se dio el fortalecimiento de la teoría ortodoxa a partir de los años setenta del siglo XX. En el contexto de lo que hoy día se conoce como Estado Neoliberal,[6] el *mainstream* se ha extendido no solo teóricamente sino también políticamente por medio de sus escuelas, que forman a funcionarios públicos.[7] No obstante, la economía mundial ha tenido crisis financieras sucesivas entre los años ochenta y la primera década del siglo XXI. En particular, la crisis de 2008 ha mostrado nuevamente la incapacidad de la teoría ortodoxa. Además de estas crisis, se pueden mencionar otros problemas: el problema del desarrollo, la formación de estructuras socioeconómicas, el reconocimiento y comprensión del comportamiento de agentes heterogéneos, el cambio tecnológico y los procesos de desigualdad (Porcile *et al.*, 2016).

Ante estas limitaciones, los economistas han comenzado a buscar otras perspectivas teóricas y metodológicas, algunas ya presentes en la historia del pensamiento económico, tales como la economía política clásica, la es-

[5] El Estado Benefactor se caracterizó por la intervención directa del Estado en la economía para orientar el crecimiento y el desarrollo de un país hacia el bienestar social.

[6] El Estado Neoliberal se caracteriza por su intervención limitada en la economía, dejando la orientación del crecimiento y el desarrollo de un país en manos del funcionamiento de los mercados y de la iniciativa privada. En México inició en 1982 a raíz de la crisis de la deuda externa.

[7] Algunos ex presidentes de México se formaron en la corriente ortodoxa, tal fue el caso de Carlos Salinas y de Ernesto Zedillo.

cuela poskeynesiana, la vertiente marxista, la teoría evolucionista y otras no presentes en la economía, como el paradigma de SC.

Vertientes en la economía heterodoxa y similitudes con sistemas complejos

A diferencia de la teoría neoclásica, la economía heterodoxa se compone de una variedad de teorías que, si bien tienen diferencias entre sí, comparten algunos compromisos ontológicos y metodológicos en su manera de investigar y comprender los fenómenos económicos. Así, en general se pueden distinguir tres grandes vertientes heterodoxas: poskeynesiana, evolucionista y marxista. Sin exponer cada una de estas vertientes, lo cual requeriría de un espacio amplio, se pueden caracterizar brevemente con el propósito de resaltar algunos aspectos afines al paradigma de SC.

La vertiente poskeynesiana se compone de un conjunto de teorías que abarcan distintos temas de la economía, tales como: consumo, producción, precios, empleo, ciclo económico, crecimiento económico, moneda, finanzas, política fiscal y política monetaria, entre otras. Estas teorías se inspiran, principalmente, en ideas contenidas en la obra de Keynes (1936), en la que se plantea una alternativa a la teoría ortodoxa pero sin romper completamente con ella. Ahí Keynes acepta, por ejemplo, los principios de rendimientos marginales decrecientes y de utilidad marginal decreciente presentes en las teorías neoclásicas de la producción y del consumo, respectivamente;[8] pero rechaza su enfoque estático, bajo el cual el tiempo histórico no existe, y también la idea de que, en un sistema competitivo, los precios relativos son condición necesaria para garantizar el equilibrio y el pleno empleo en el mercado de trabajo (Caballero, 2006). De esta forma, Keynes llega a la conclusión de que los mercados, por sí solos, no garantizan un crecimiento estable de la economía, ya que el equilibrio entre oferta y demanda agregada no ocurre de forma automática debido a que el ahorro no necesariamente es igual a la inversión. Además, si la actividad económica depende solo de las decisiones de inversión que realizan los empresarios con base en sus expectativas de rentabilidad (*animal spirits*), las cuales están basadas a su vez en la incertidumbre, entonces la activi-

[8] La ley de rendimientos marginales decrecientes fue propuesta por David Ricardo y afirma que, dado un factor de la producción variable y otro fijo, la cantidad de producto que aporta una unidad adicional del factor variable al producto total es cada vez menor. Mientras que el principio de utilidad marginal decreciente señala que la satisfacción que aporta el consumo de un bien a la utilidad total es cada vez menor por cada unidad adicional.

dad económica es inestable expresándose en fluctuaciones con intervalos combinados de auge y depresión. Ante este comportamiento cíclico se requiere la intervención, en distintos grados, del Estado en la economía mediante las políticas fiscal y monetaria, con el propósito de atenuar la magnitud de tales fluctuaciones (Vargas, 2006).

Los economistas Joan Robinson, Roy Harrod, Evsey Domar, Hyman Minsky, Nicholas Kaldor, Jan A. Kregel y Jan Tinbergen, entre otros seguidores de Keynes, abordaron distintos problemas de la economía compartiendo los siguientes supuestos: *i)* la economía es inestable; *ii)* existe desempleo involuntario; *iii)* las decisiones de los agentes son tomadas con base en acontecimientos pasados; *iv)* el ahorro no necesariamente es igual a la inversión; y *v)* la demanda agregada es insuficiente para garantizar el equilibrio de pleno empleo.

De manera independiente, Michael Kalecki, Piero Sraffa y Joseph Schumpeter, economistas contemporáneos de Keynes, realizaron críticas importantes a la teoría ortodoxa por lo que en ocasiones aparecen en la literatura económica como autores poskeynesianos.

Por otra parte, la vertiente marxista toma como referencia las ideas de Karl Marx acerca del funcionamiento del capitalismo y su crítica a la economía política clásica. En su obra máxima *El Capital*, Marx (2015) describe las pautas que caracterizan a la economía capitalista haciendo explícito su carácter crítico debido, básicamente, a dos motivos: *i)* al papel que desempeña el dinero no simplemente como un *medium* sino en sus diversas funciones —equivalente de mercancías, medio de circulación, medio de pago, medio de atesoramiento y dinero mundial—; y *ii)* la posibilidad siempre presente de que no puedan realizarse las operaciones de compra y venta en el mercado —"salto mortal" de la mercancía. La distribución de la renta se define en el conflicto entre las clases sociales de tal forma que, visto desde una perspectiva global, el proceso de producción y de reproducción del capitalismo es inestable. Marx fue el primero en concebir el comportamiento de la economía capitalista como un proceso cíclico (Guerrieri, 1990). Cabe resaltar que, bajo la perspectiva de Marx, el tiempo tiene un papel importante ya que se reconoce que el sistema económico atraviesa por distintas fases históricas en su proceso de acumulación: libre mercado, monopolio, oligopolio, capital financiero, etc., modificándose también la dinámica que sigue el patrón de acumulación.

Los economistas que se inscriben en el marxismo no se pueden agrupar de acuerdo con los mismos criterios metodológicos ya que existe una

amplia variedad de escuelas y formas de investigar los fenómenos económicos. Destacan algunos, como Ernest Mandel, Paul Sweezy, Paul Baran, Rudolf Hilferding, Michio Morishima, Anwar Shaikh, Richard Goodwin y Duncan Foley, entre otros, que abordan diversos temas que van desde las ondas largas del capitalismo hasta su comportamiento caótico. No obstante, todos ellos comparten la idea de que la economía capitalista es inestable.

Por último, la vertiente evolucionista se inspira principalmente en ideas de Joseph Schumpeter en el área de la economía y otras provenientes de otros campos, como la biología o la filosofía. Schumpeter (1997), en su *Teoría del desenvolvimiento económico*, argumenta que el capitalismo se caracteriza por su comportamiento cíclico en el largo plazo. Debido al papel central que juega el emprendedor, el cambio tecnológico ocurre de forma endógena, las innovaciones ocurren en distintos niveles: organización, producción, distribución y ventas, estableciendo nuevos estándares de productividad e, incluso, nuevos estilos de vida. La dinámica que sigue la economía capitalista en este proceso es inestable ya que la introducción de innovaciones genera procesos de destrucción creativa, es decir, surgen y desaparecen empresas, productos, industrias, mercados, organizaciones e instituciones. Así, la inestabilidad del sistema económico es endógena a su evolución y la principal causa reside en la innovación tecnológica.

Los economistas que sostienen esta vertiente teórica abordan problemas relacionados con el crecimiento económico y el desarrollo, poniendo atención a los cambios tecnológicos que generan cambios importantes. Autores como Richard Nelson y Sidney G. Winter, han desarrollado ideas acerca de una microeconomía evolutiva, mientras que otros, como Giovanni Dosi, han contribuido con sus estudios acerca de los paradigmas tecnológicos. Christopher Freeman y Carlota Pérez acuñaron el concepto de paradigma tecnoeconómico para referirse a estudios de cambio económico-social de largo alcance; otros, como Lundvall y Freeman, construyeron el concepto de sistema nacional de innovación para referirse al conjunto de instituciones y organizaciones que intervienen en los procesos de innovación en un país, siguiendo determinadas estrategias. Por último, autores como Pier-Paolo Savioti han estudiado los factores del cambio tecnológico que influyen en el desarrollo de las economías.

Al incorporar el tiempo como una variable explicativa de los fenómenos económicos, las tres vertientes comparten el supuesto ontológico de que la economía no tiende al equilibrio estable. Las tres vertientes hetero-

doxas también comparten el realismo con el que modelan los fenómenos de la economía, en el sentido de incorporar variables que evolucionan en el tiempo como los salarios nominales en Keynes, las distintas fases en el patrón de acumulación de capital en Marx y las etapas en la evolución del capitalismo dadas por la innovación tecnológica en Schumpeter. A su vez, estas variables resultan de interacciones entre distintos agentes de la economía, como trabajadores y empresarios en Keynes para negociar los salarios nominales; lucha de clases en Marx entre capitalistas y trabajadores; y universidades, empresas y gobierno que interactúan en el sistema nacional de innovación para dar origen a los cambios tecnológicos en los evolucionistas.

La afinidad con el paradigma de SC reside en entender la dinámica de evolución del sistema por medio de: *i)* introducir el tiempo como una variable de cambio de los fenómenos económicos; y *ii)* establecer agentes representativos heterogéneos y las relaciones generales entre ellos. Se describe la dinámica mediante cambios de fases, cambios estructurales y estadios con el propósito de mostrar la inestabilidad del sistema. Se consideran escalas temporales para entender los procesos económicos a corto y largo plazos.

Una de las aportaciones importantes de los SC a la economía es considerar conjuntos de agentes heterogéneos que actúan con información limitada en un entorno local y que interaccionan a partir de un conjunto de reglas que pueden evolucionar y adaptarse en el tiempo a diferentes escalas temporales y espaciales, a nivel micro, meso y macro.

El estudio de la economía como un sistema complejo en evolución

Mencionadas algunas de las limitaciones de la teoría económica ortodoxa se propone abordar a la economía desde la perspectiva sistémica con las metodologías y las herramientas de los SC. Para entender la dinámica actual de la economía en cualquiera de sus escalas espaciales —por ejemplo, municipal, estatal, regional, nacional, internacional o mundial— como un sistema que evoluciona al transcurrir el tiempo es necesario el uso de técnicas y herramientas de distintas disciplinas, como sistemas dinámicos, modelación basada en agentes, redes complejas, autómatas celulares, cómputo evolutivo, geometría fractal, etc. Hay una dinámica que se genera por

la interacción de muchas clases de elementos —por ejemplo, consumidores, productores, instituciones, políticas gubernamentales, etc.— que actúan al mismo tiempo, sin estar coordinadas necesariamente; donde la actividad de estos elementos depende de su estado previo y del entorno.

Aunque en los sistemas económicos se pretende tener control por medio de políticas macroeconómicas, debido a las interacciones entre sus elementos se genera incertidumbre e impredictibilidad, ya que muestran una gran diversidad de dinámicas, como competencia, coordinación, creación de reglas y normas, establecimiento de roles, alianzas; donde todas ellas cambian en el tiempo y dan como resultado una dinámica global.

En general, la teoría económica moderna se divide en macroeconomía y microeconomía; John Holland (1988) propone estudiar el sistema económico en diferentes escalas de organización a partir de la hipótesis de "bloques de construcción" la cual afirma que son estructuras que codifican un rasgo importante de información que permite construir niveles superiores con sus propias interacciones y procesos, genera flujos de información espaciales entre escalas de organización, a nivel micro, meso y macro. En este tipo de sistemas hay adaptación, esto significa que "los bloques de construcción" se combinan y evalúan en el entorno continuamente, a medida que el sistema económico acumula experiencia.

Otra idea importante es que la competencia entre elementos del sistema en el entorno genera estructuras locales llamadas "nichos" que pueden ser explotados por adaptaciones particulares de los agentes, por tal motivo no hay un super-competidor universal que pueda optimizar su función objetivo en todos los nichos. Continuamente aparecen y se destruyen nuevos nichos como resultado de la innovación tecnológica; Holland (1988) propone varios procesos para explicar la diversidad y la adaptación de los agentes en su entorno —como parasitismo, simbiosis, exclusión competitiva, etc.—, como resultado se genera una novedad perpetuada debido a una continua evolución del sistema. Debido a la diversidad de nichos, el sistema económico opera lejos del equilibrio óptimo, como lo establece la teoría económica ortodoxa; por el contrario, todo el tiempo están ocurriendo cambios en el sistema económico que lo llevan a tener una diversidad de dinámicas y de estados tales como leyes de potencias, fractalidad, criticalidad autoorganizada (CAO), etcétera.

Brian Arthur propone el área de estudio de la economía de la complejidad como una manera diferente de abordar esta disciplina:

> La economía de la complejidad ni es una añadidura a la economía estándar, ni consiste en añadir un comportamiento basado en agentes a los modelos de la economía estándar. Es una manera diferente de pensar la economía. Se ve a esta no como un sistema en equilibrio, sino como uno en movimiento. Perpetuamente "computándose" a sí mismo —permanentemente construyéndose a sí mismo una y otra vez. Donde la economía del equilibrio enfatiza orden, determinación, deducción e inmovilización, este nuevo marco conceptual enfatiza contingencia, indeterminación, toma de decisiones y apertura al cambio (Arthur, 2014: 19).[9]

La economía estándar supone que en el sistema económico hay orden, problemas bien definidos, es estático, no toma en cuenta la evolución en el tiempo, las fallas del mercado son por factores exógenos al sistema. En cambio, la economía de la complejidad reconoce la contingencia, la indeterminación, la apertura al cambio, la evolución que se crea en cada momento como producto de las interacciones y las adaptaciones de los agentes económicos, las posibles fallas del mercado como fenómenos endógenos, una perspectiva orgánica del sistema económico, con un cierto grado de desorden.

Tanto Holland como Arthur ven a la economía como un sistema en permanente construcción; el cambio del entorno y de las reglas hacen que el sistema evolucione con su propia escala temporal hacia un estado crítico donde las dinámicas locales ejercen presión y tensión sobre los agentes, los cuales experimentan procesos de adaptación y de aprendizaje.

Es posible crear modelos matemáticos y computacionales para comprender y hacer simulaciones de fenómenos económicos.

Abordar al sistema económico como un SC en evolución permite realizar abstracciones y construir modelos de sus procesos en los que se consideren las partes más relevantes del sistema en cuestión, por ejemplo, para estudiar los *crashes* financieros se pueden considerar las tomas de decisiones de los agentes; para el fenómeno del consumo, la información del entorno, la adaptación y el aprendizaje; para la descripción de la población económicamente activa, la dinámica demográfica, la migración y la oferta y demanda del empleo.

En el siguiente apartado se propone el modelo de la "pila de arena" como un ejemplo para estudiar el comportamiento de los agentes en los mercados financieros.

[9] La traducción de la cita es de los autores de este ensayo.

El modelo de la "pila de arena" como ejemplo para estudiar a los mercados de valores

Los fenómenos económicos se caracterizan por estar compuestos por diversos tipos de elementos, interactuando de manera paralela, no lineal, y con cierto grado de descentralización. Cada elemento o agente actúa bajo sus propios intereses, tratando de maximizar sus atributos —función de utilidad— y corriendo riesgos a partir de decisiones tomadas con información de su entorno —racionalidad limitada. Las regulaciones del sistema se basan en límites establecidos por las instituciones, pero los agentes cuentan con cierta libertad para actuar y desempeñar estrategias propias basadas en la experiencia, el conocimiento y el procesamiento de información. Las casas de bolsa de valores experimentan estas propiedades, ya que hay un cierto grado de incertidumbre, información limitada e impredictibilidad, el reflejo de estas dinámicas se muestra en sus series temporales de datos que describen su tendencia y las fluctuaciones que experimentan, creadas de manera intrínseca en el sistema.

En particular, la Bolsa Mexicana de Valores (BMV) tiene indicadores como el Índice de Precios y Cotizaciones (IPC) que muestra las ganancias y pérdidas durante la evolución del mercado de valores mexicano. Este índice está compuesto por 35 empresas de 75 que cotizan en la bolsa de valores. En la figura 1 se muestra la serie de tiempo del IPC. Los valores fueron recabados del sito oficial de la BMV[10] de manera diaria, cada 5 minutos, durante 5 meses, iniciando el 29 de mayo del 2018.

Los datos recabados durante cinco meses muestran el comportamiento típico de la BMV; como se observa, existe un cierto grado de incertidumbre reflejado en pequeñas y grandes fluctuaciones a lo largo del tiempo. Benoit Mandelbrot, en las décadas de los ochenta y noventa, dedicó una gran parte de su productividad académica a analizar las series de tiempo de mercados financieros, con ello mostró que las fluctuaciones no siguen una distribución normal, como lo estipula la economía ortodoxa sino, por el contrario, hay fenómenos de escalamiento autosemejantes, es decir, tiene propiedades fractales. Lo que implica que temporalmente hay fluctuaciones de todos los grados de magnitud distribuyéndose como una ley de potencias o ley de Zipf. En la figura 2 se muestran las fluctuaciones de la serie de tiempo del IPC en el mismo periodo de tiempo.

[10] Véase <http://www.bmv.com.mx>.

FIGURA 1. Serie de tiempo del IPC construida con alrededor de 8 600 datos, del 29 de mayo al 31 de octubre de 2018

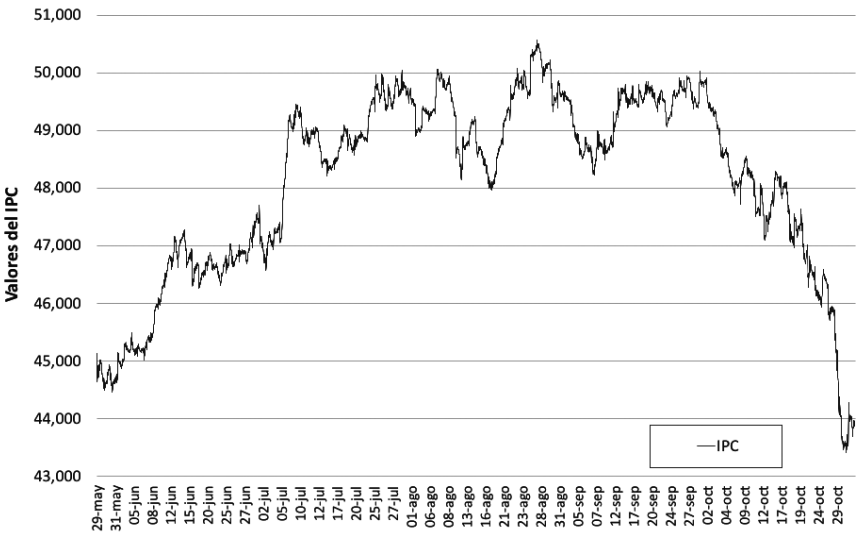
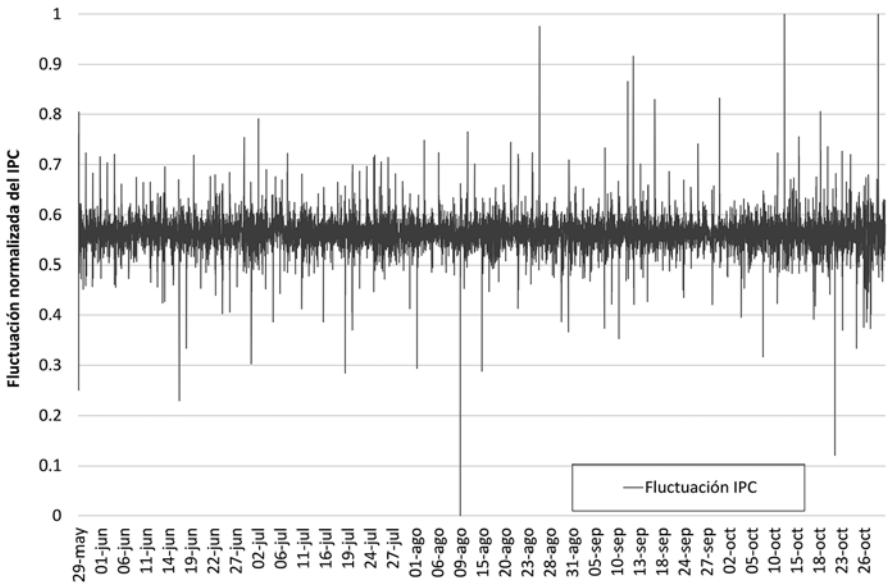


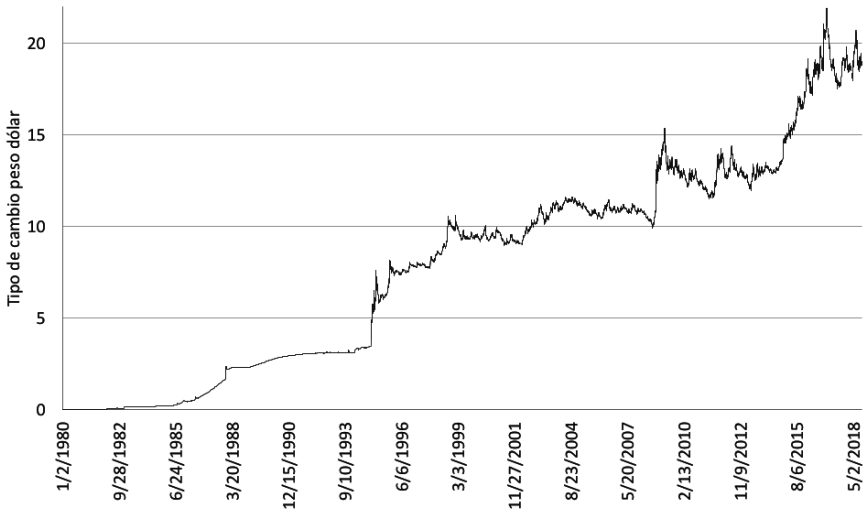
FIGURA 2. Serie de tiempo de las fluctuaciones del IPC del 29 de mayo al 31 de octubre de 2018



La construcción de la serie de fluctuaciones toma en cuenta la diferencia entre el valor actual y el anterior, para ajustarse a una escala apropiada se normaliza en el intervalo [0,1]. La fluctuación a la baja más grande surge alrededor del 9 de agosto, y la fluctuación más grande al alza el 27 de agosto. El comportamiento es impredecible ya que no es posible saber el momento ni la magnitud exacta de fluctuaciones subsecuentes. En la teoría ortodoxa se argumenta que las fluctuaciones de los precios son independientes y se distribuyen como una función normal —fórmula de Black-Scholes—, sin embargo, hay estudios donde se muestra que no son independientes (Fama y French, 1992) y su función de distribución puede ser descrita por "vuelos de Lévy" truncados (Mantegna y Stanley, 1995).

Otro ejemplo que muestra incertidumbre, impredictibilidad y un estado crítico es la dinámica del tipo de cambio peso-dólar. En la figura 3 se muestra la serie de tiempo del 1° de enero de 1980 al 25 de septiembre de 2018 con mediciones diarias promedio.

Figura 3. Serie de tiempo del tipo de cambio MXN-USD (1980-2018)*



* Nótese que a partir del 22 de diciembre de 1994 el tipo de cambio entró en un régimen de "libre flotación". Antes de esta fecha se aplicaron varios tipos de control.

Las series de datos de los dos ejemplos anteriores son un reflejo de la dinámica compleja que surge de la interacción de miles de componentes en el sistema, cada componente con sus propias estrategias de operación, con

el objetivo de maximizar sus ganancias. Cada agente económico toma decisiones a partir de su información disponible y capacidad de procesamiento. Esto genera como resultado un sistema que tiende hacia un estado crítico de manera autoorganizada, ya que no hay un agente central que regule el comportamiento, en este caso el sistema se regula por "libre flotación". Con la teoría de SC se pueden tender puentes y usar modelos específicos para comprender, estudiar y analizar este tipo de fenómenos.

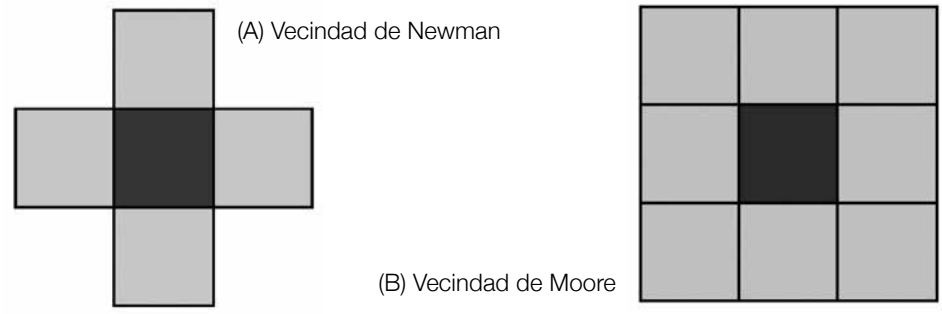
A continuación, se describirá el modelo de la "pila de arena" como una propuesta de sistema que tiende hacia un estado crítico de manera autoorganizada para entender lo que sucede en fenómenos económicos reales.

Modelo de la pila de arena

Desde la década de los ochenta se aplica la teoría de autómatas celulares (AC) como una herramienta para modelar y estudiar sistemas complejos (Wolfram, 1983, 1994, 2002). Los AC se han utilizado para estudiar, por ejemplo, fenómenos físicos (Mikhailov, 1990), biológicos (Deutsch *et al.*, 2005), cooperativos (Boccara *et al.*, 1993), sociales (Batty, Couclelis y Eichen, 1997), y económicos (Schelling, 1971).

Los AC son sistemas dinámicos discretos espacio-temporales definidos regularmente en retículas homogéneas compuestas por celdas, permiten modelar las interacciones que existen entre los elementos mediante un conjunto de reglas de transición que operan de manera local en una vecindad, tradicionalmente de Newman o de Moore (véase figura 4), y un conjunto de estados que actualizan el valor de las celdas.

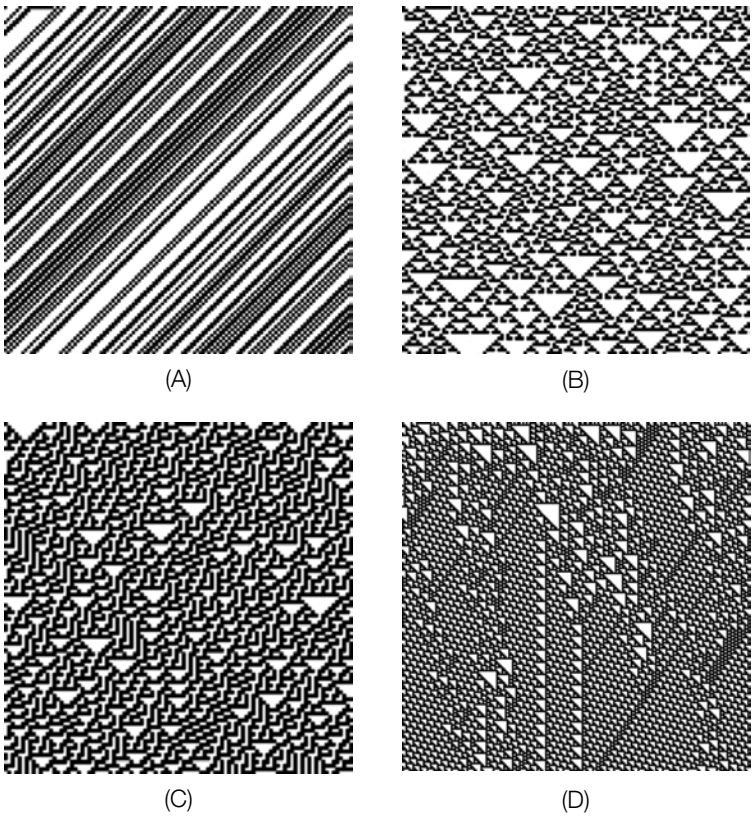
FIGURA 4. Tipos de vecindades para actualizar la celda central marcada en gris obscuro



La evolución de los AC, bajo ciertas reglas, puede generar dinámicas estables, periódicas, aleatorias, complejas y caóticas (véase figura 5) (Wolfram, 1983; Langton, 1990).

FIGURA 5. Ejemplos de la dinámica de los autómatas celulares elementales (ACE)

Existen 256 posibles ACE, cada uno con su propia dinámica
(A) periódico, (B) caótico, (C) aleatorio, (D) complejo



Dentro de estos sistemas, se encuentra el modelo de la pila de arena (MPA), propuesto por Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld (1987), con el fin de estudiar, de manera teórica, sistemas que tienden hacia una criticalidad autoorganizada. El MPA puede transitar de un estado homogéneo a una configuración donde se presentan invariancias de escala temporales y espaciales; el sistema tiende a un cierto arreglo de estados internos de tal forma

que las perturbaciones —propagación de información— se distribuye como una ley de potencias o función $f(x) = 1/x$.

Para explicar brevemente el modelo, el lector puede imaginarse un mecanismo que tira granos de arena continuamente, semejante a un reloj de arena, este va creando un cúmulo o montaña de granos en la superficie que, al transcurrir el tiempo, crece más y más, hasta que llega un momento en el que el cúmulo de granos de arena se desborda, cayendo granos de arena por sus laderas; después de un tiempo, esta montaña vuelve a crecer y se desborda nuevamente. Per Bak (1999) propuso un experimento con instrumentos adecuados para medir los tamaños de las avalanchas que ocurren mientras caen los granos de arena. La cantidad de granos que se mueven en cada avalancha pueden registrarse para generar una serie de tiempo, donde se observan las variaciones producidas. La función de distribución de estas avalanchas sigue una ley de Zipf o ley de potencias, donde la distribución de tipo rango-orden decae como una función $1/x$. Hay muchos fenómenos que se distribuyen como una ley de Zipf, por ejemplo, la frecuencia de palabras en textos (Zipf, 1949), los precios del algodón (Mandelbrot y Hudson, 2006), el crecimiento de las ciudades (Batty y Longley, 1994; Batty, 2007) y el número de citas por autor (Réka y Barabási, 2002).

El MPA rescata muchas propiedades interesantes de los fenómenos reales, cada región está influenciada por sus zonas vecinas; hay cierto grado de incertidumbre y la imposibilidad de predecir comportamientos, en este caso las magnitudes de las avalanchas. Hay similitudes con algunos fenómenos económicos, tensión entre los elementos que los constituyen, impredictibilidad de las fluctuaciones, operatividad con información local y tendencia del sistema hacia un estado crítico.

El modelo puede ayudar a comprender la naturaleza inestable de algunos fenómenos de la economía y que, al evolucionar, alcanzan de manera endógena un estado crítico donde ocurren fluctuaciones que se distribuyen como una ley de potencias. En particular, este modelo puede ayudar a comprender el funcionamiento de los mercados financieros y, por ende, la naturaleza de las crisis financieras.

Definición e interpretación del modelo de agentes especuladores

La forma estándar del MPA se define en una retícula cuadrada homogénea de tamaño N x N constituida por celdas, donde cada celda tiene una capacidad de carga o de granos de arena denotada por $Z(x,y)$ con $0 < x < N$, 0

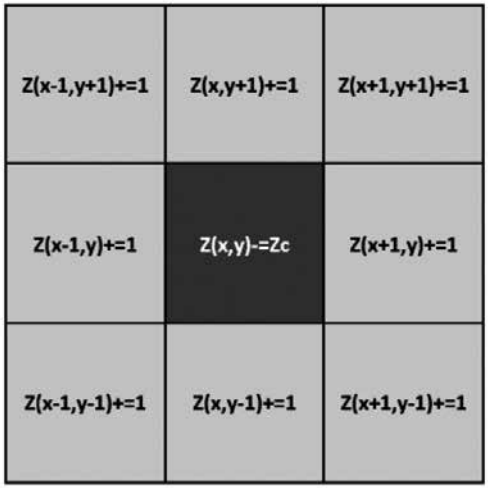
< y < N. La función Z(x,y) toma valores en un rango de {0, …, 8}, es decir, el número de granos de arena que soporta la celda. La dinámica principal consiste en tirar granos de manera aleatoria sobre la retícula de tal manera que se van sumando en cada celda y cuando llegan a un estado crítico denotado por $Z_c = 8$, se desbordan estos granos de arena a su vecindad de Moore,[11] lo que representa también una transferencia de información. En el cuadro 1 se muestra el algoritmo del modelo.

CUADRO 1. Algoritmo del modelo de la pila de arena

1. Se inicializa de manera aleatoria los valores de las celdas en un rango de {0,…,7}.
2. Se lanzan granos de arena de manera aleatoria sobre la retícula de tamaño N x N.
3. En la celda (x, y) donde cae el grano de arena, se suma una unidad al valor actual de la siguiente manera, Z(x, y) = Z(x, y) + 1.
4. Si el valor de la celda Z(x, y) supera o es igual al valor crítico Z_c, se inicializa la celda haciendo Z(x, y) = Z(x, y) – Z_c y se actualizan los estados de su vecindad de Moore como se muestra en la figura 6. Los granos de arena se reparten equitativamente entre sus vecinos sumando una unidad.

FIGURA 6. Actualización en una vecindad de Moore

El operador += significa que al valor contenido en la celda se le suma una unidad, y el operador -= significa que al valor de la celda se le resta Zc=8.



[11] En la versión original de la simulación computacional, propuesta por Per Bak y su equipo, se usó una vecindad de Newman.

Se usa el MPA como base para construir un modelo de agentes especuladores (MAE) de la siguiente manera; supóngase que una cuadrícula de N x N, representa un mercado de valores. Cada una de las celdas Z(x,y), modela el nivel de especulación de un agente que posee un tipo de documento con algún valor, como acciones de firmas, bonos del gobierno, etc., el cual retiene mientras espera a que el valor aumente porque desea obtener la mayor utilidad posible. La especulación del agente es alimentada por su entorno, cuando llega a un nivel crítico Zc, el agente libera su especulación ante el riesgo de perder, así que vende sus documentos[12] y el entorno recibe mayor nivel de especulación. Este comportamiento supone que los agentes especuladores deciden bajo racionalidad limitada. Así, el modelo funciona bajo las reglas del cuadro 2.

CUADRO 2. Reglas del modelo de agentes especuladores

1. El agente especulador Z(x,y) tiene acciones financieras y un nivel de especulación de 0.
2. Debido a la especulación del entorno, de manera aleatoria, un agente Z(x,y) incrementa su valor de especulación en 1.
3. Ahora bien, si el nivel de especulación del agente Z(x,y) alcanza su valor máximo, Zc = 8, entonces vende sus acciones y el valor de la especulación se establece como Z(x,y) = Zc. A nivel local influye en su vecindad de Moore y estos incrementan su nivel de especulación en una unidad.
4. Si en la vecindad existen más agentes especuladores con Zc, entonces se repite el paso 3.
5. Se contabiliza el número de especuladores que vendieron sus acciones, para saber la magnitud de la fluctuación de especulación.
6. Se repite el punto 2 para generar más especulación.

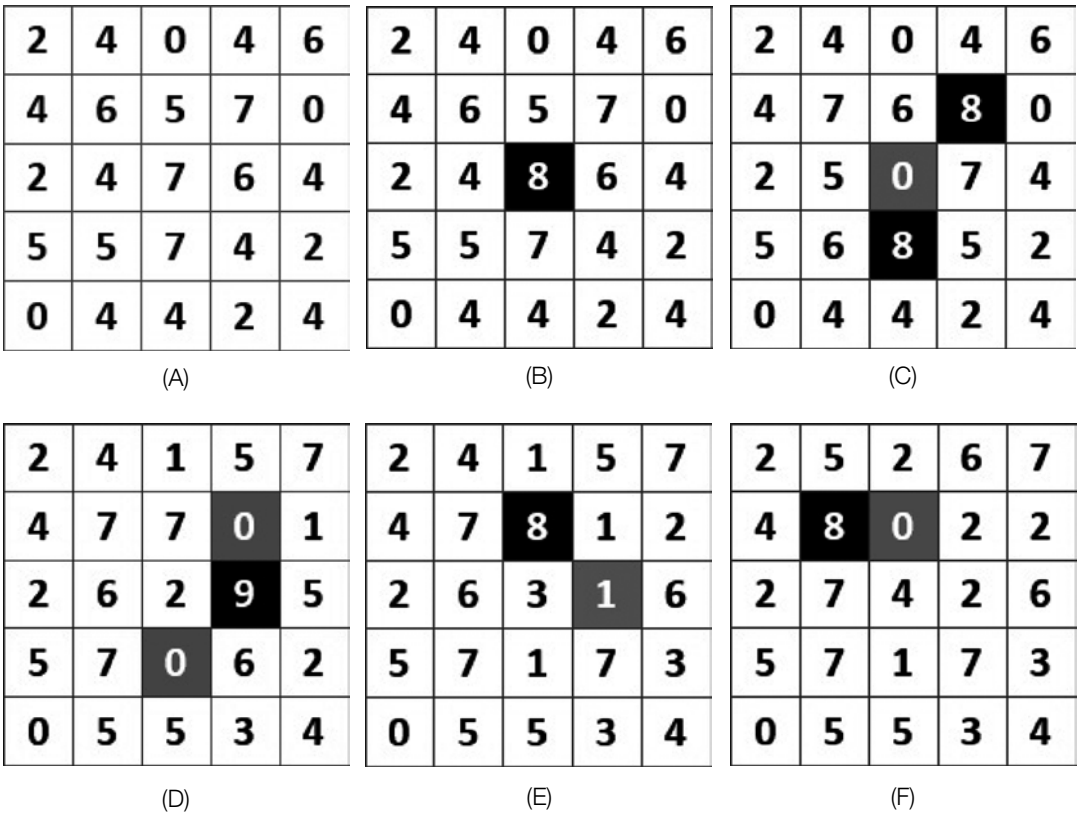
Hay situaciones en las que la especulación genera una reacción en cadena, como un comportamiento de manada. La actualización de un agente puede generar en su vecindad estados críticos Zc, los cuales transfieren cierto grado de especulación al entorno, dando lugar a más de estos, y así sucesivamente hasta que se estabilice temporalmente el sistema, es decir, hasta que ya no se generen más estados críticos. En la figura 7 se muestra un ejemplo del surgimiento de una avalancha de especulación. En 7(A) se

[12] En el modelo no está explícita la compra y venta de documentos, así como la tendencia del mercado de valores.

genera un grado de especulación de manera aleatoria, el cual lo recibe el agente especulador central con valor de 7, si cayera en otro lugar no se generaría una avalancha; en 7(B) llega al umbral y transfiere la especulación al entorno; en 7(C) otros dos especuladores llegan al estado crítico; en 7(D) un especulador llega al estado crítico $Z_c > 8$, ya que se suma el grado de especulación de los vecinos adyacentes; de 7(E) a 7(H) la avalancha continúa y termina en 7(I); y en 7(J) se muestran los especuladores que participaron en la avalancha.

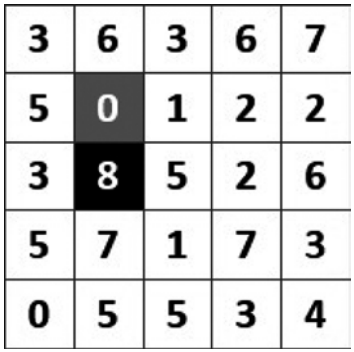
FIGURA 7. Evolución de una avalancha a partir de un especulador

Los especuladores marcados en negro indican que llegaron al nivel de especulación Zc, y las grises el valor que toman después de la venta de sus acciones. Al finalizar el proceso se tiene una avalancha de tamaño 8.

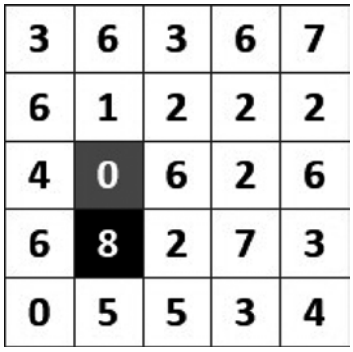


Continúa...

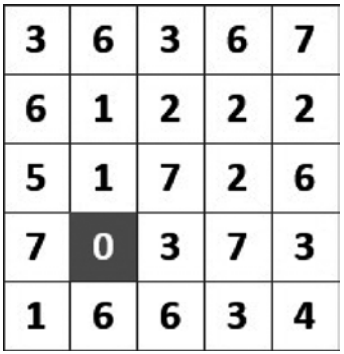
...continuación



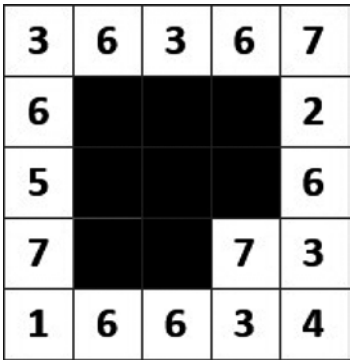
(G)



(H)



(I)



(J)

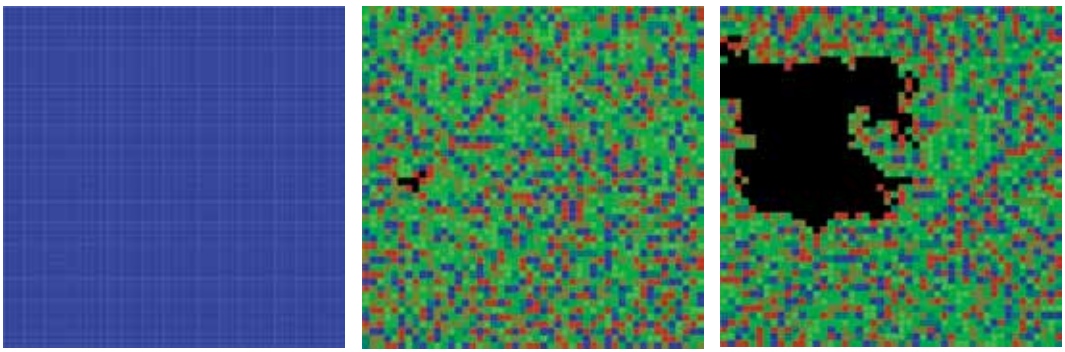
Simulación computacional del MAE

Para mostrar los resultados del MAE se desarrolló una simulación computacional en el lenguaje de programación Java. Se define una retícula de tamaño 50 x 50 y se inicializa las celdas con el valor cero. Para evolucionar el sistema se aplican las reglas del cuadro 2 durante 10 000 iteraciones. El grado de especulación se visualiza mediante una gama de colores, específicamente, de 0 a 4 grados toman gamas de azules a verdes, y de 5 a 8, gamas de verdes a rojos.

En la figura 8 se muestra una evolución típica del MAE; en 8(A) se muestra la inicialización del sistema donde todos los agentes especuladores están en azul ya que no hay especulación; posteriormente, se incrementa el grado de especulación de forma aleatoria; donde poco a poco los agentes toman diversos colores. En 8(B) se muestra el sistema aproximadamente en la iteración 5 000 y el surgimiento de una pequeña avalancha en color ne-

gro. En 8(C) se muestra la iteración 10 000, donde se forman avalanchas de todos las ordenes de magnitud.

FIGURA 8. Evolución del MAE, el sistema transitó de una configuración homogénea a un estado crítico



(A) Iteración 1 (B) Iteración 5 000 (C) Iteración 10 000

Durante la evolución del sistema surgen muchas avalanchas pequeñas y pocas grandes; en la figura 9 se observa la serie de tiempo de las primeras 1 000 avalanchas, al inicio las avalanchas son pequeñas, el sistema está transitando de un estado homogéneo a un estado crítico. Posteriormente, empiezan a surgir avalanchas más grandes, por ejemplo de tamaño 700, que abarca aproximadamente 30% de los agentes especuladores. Resulta impredecible saber la magnitud de la siguiente avalancha, no hay una forma analítica con la que se pueda obtener el tiempo de ocurrencia y la magnitud, lo que sí se puede calcular es la distribución de eventos a lo largo del tiempo (véase figura 10).

FIGURA 9. Serie de tiempo del tamaño de las avalanchas

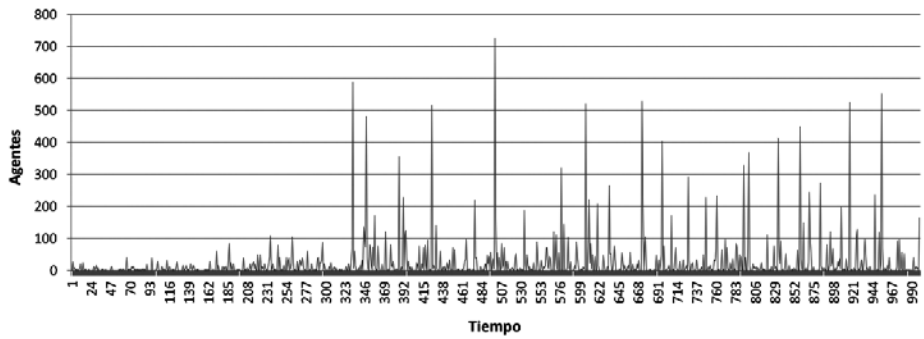
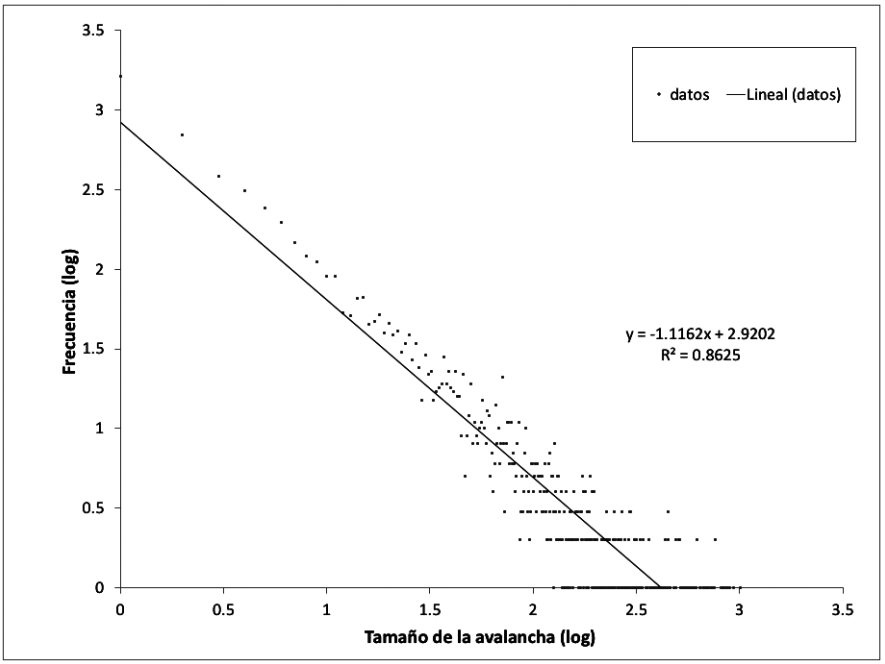


FIGURA 10. Distribución de las avalanchas a partir de su tamaño en escala logarítmica



En la figura 10 se muestra la distribución de avalanchas en escala logarítmica, la pendiente de la recta que ajusta a los datos por medio del método de mínimos cuadrados es de -1.11 lo que indica un fenómeno libre de escala temporal y espacial.[13]

Las fluctuaciones de baja magnitud representan burbujas especulativas pequeñas. Sin embargo, las fluctuaciones grandes pueden representar crisis financieras las cuales, si bien no ocurren frecuentemente (véase figura 10), cuando lo hacen pueden tener efectos de gran magnitud paralizando al conjunto de la economía.

Lo relevante del MAE es que propone un mecanismo para describir el comportamiento de las bolsas de valores hacia un estado crítico en el que ocurren fluctuaciones de todos los tamaños. Esta concepción acerca

[13] Este comportamiento está asociado a fenómenos fractales, es decir, si descartamos dinámicas transitorias y definimos ventanas de tiempo de un tamaño particular, obtendríamos la misma distribución.

del funcionamiento del mercado bursátil contradice a la concepción ortodoxa, según la cual tiende al equilibrio y, si hay fluctuaciones, son pasajeras; esta visión lineal acerca de la economía financiera no ha podido prever los *crashes*. Por el contrario, suponer que las bolsas de valores evolucionan hacia un estado crítico donde ocurren fluctuaciones de todos los tamaños, significa reconocer su naturaleza no lineal y, por consiguiente, la aparición inevitable de las crisis.

Conclusiones

En este capítulo se realizó un acercamiento a los conceptos centrales de los SC, se enlistaron sus principales propiedades, como predictibilidad a corto plazo, irreductibilidad, frustración, ruptura de simetría, autoorganización, emergencia, criticalidad autoorganizada y geometría fractal. Se describió una breve caracterización de la teoría económica ortodoxa poniendo énfasis en sus limitaciones para abordar a la economía con el paradigma de los SC. También se realizó un breve recorrido entre las principales vertientes heterodoxas y se mostraron algunos aspectos afines a este paradigma. Como ejemplo de la aplicación de la teoría de SC a un fenómeno de la economía, se propuso un modelo de autómata celular basado en la pila de arena para describir el comportamiento del mercado de valores.

Abordar a la economía como un SC en evolución asume un cambio constante estructural donde existen rupturas de simetría, transiciones de fase, surgimiento de patrones espacio-temporales y dinámicas de adaptación de los agentes; en contraparte, la teoría ortodoxa no considera estas propiedades debido a su enfoque estático y lineal, lo que le impide dar explicaciones satisfactorias acerca de fenómenos como el ciclo económico, el crecimiento, el cambio tecnológico y el desarrollo económico.

Los principales aportes de los SC a la economía son: *a)* el estudio de las relaciones entre los agentes; *b)* la capacidad de modelar agentes económicos heterogéneos que toman decisiones a partir de información incompleta y entornos con incertidumbre; *c)* la definición de escalas de organización; *d)* el desarrollo de una posible teoría a escala meso, es decir, el puente entre microeconomía y macroeconomía; *e)* el uso de teorías y herramientas metodológicas como sistemas dinámicos, autómatas celulares, modelación basada en agentes y redes complejas; *g)* el desarrollo de modelos y simulaciones computacionales alimentadas con datos de fenómenos económicos reales para construir posibles escenarios y hacer

propuestas de políticas económicas; y *f)* el desarrollo de trabajo interdisciplinario para construir nuevos conceptos y teorías.

En sentido metodológico, se mostró el uso del paradigma de los SC en el mercado de valores, se analizó en particular el índice de precios y cotizaciones de la BMV y el tipo de cambio peso-dólar. Se recabaron datos empíricos para construir las series de tiempo y se analizó su estructura cualitativa y cuantitativa, se puso énfasis en las fluctuaciones de las series del tiempo, las cuales no tienen importancia para la teoría ortodoxa. Se propuso un modelo sobre la dinámica de los agentes especuladores (MAE) basado en el modelo computacional de la pila de arena para estudiar la formación de avalanchas especulativas en el mercado de valores. Aunque es un modelo básico, puede ayudar a comprender la dinámica interna de estos mercados ya que se definen reglas locales que generan un comportamiento global semejante al fenómeno real en cuanto a la incertidumbre y las burbujas especulativas. Esta pequeña aproximación puede servir como base para construir modelos más realistas que permitan comprender mejor la evolución de los fenómenos económicos y tomar medidas preventivas para minimizar los efectos negativos.

Bibliografía

Anderson, P.W. 1972. "More is Different", *Science. New Series*, vol. 177, núm. 4047, pp. 393-396.

Arthur, W.B. 2014. "Complexity Economics: A Different Framework for Economic Thought", en *Complexity and the Economy*, Nueva York, Oxford University Press.

Ashby, W.R. 1947. "Principles of the Self-Organizing Dynamics Systems", *Journal of General Psychology*, núm 37, pp.125-128.

Bak, P. 1996. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Nueva York, Copernicus.

Bak, P., C. Tang y K. Wiesenfeld. 1987. "Self-Organized Criticality: An Explanation of 1 /f Noise", *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 381-384, en doi:10.1103/PhysRevLett.59.381. [Fecha de consulta: 15 de junio de 2019.]

Bar-Yam, Y. 1977. *Dynamics Of Complex Systems. Serie: Studies in NonLinearity*, Boston, Addison-Wesley.

Batty, M. 2007. *Cities and complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, Cambridge, MIT Press.

Batty, M. y P. Longley. 1994. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Londres, Academic Press.

Batty, M., H. Couclelis y M. Eichen. 1997. "Urban Systems as Cellular Automata", en *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, pp. 159-164.

Boccara, N. *et al.* 1993. *Cellular Automata and Cooperative Systems*, Bonneville, Kluwer Academic.

Caballero, A. 2006. "La economía post-keynesiana", *Principios*, núm. 4, pp. 93-103.

Corning, P. 2002. "The Re-emergence of 'Emergence'", *Complexity*, vol. 7, núm. 6, pp. 18-30.

Deutsch, A. y S. Dorman. 2005. *Cellular Automaton Modeling of Biological Pattern Formation: Characterization, Applications and Analysis*, Boston, Birkhäuser.

Fama, E.F. y K.R. French. 1992. "The Cross-Section of Expected Stock Returns", *The Journal of Finance*, vol. XLVII, núm. 2, pp. 427-465.

Fernández, D.A. 2000. *Dinámica caótica en economía*, Madrid, Mc Graw Hill.

Fieguth, P. 2017. *An Introduction to Complex Systems: Society, Ecology, and Non-Linear Dynamics*, Nueva York, Springer-Verlag.

Gershenson, C. 2013. "¿Cómo hablar de complejidad?", *Llengua, Societat i Comunicació*, núm. 11, pp. 15-20, Barcelona, en <http://revistes.ub/index.php/LSC/lsc@ub.edu>. [Fecha de consulta: 19 de mayo de 2019.]

Guerrieri, P. 1990. *Las fluctuaciones económicas*, Barcelona, Oikos-Tau.

Holland, J. 1998. "The Global Economy as an Adaptive Process", en *The Economy as an Evolving Complex System*, vol. 5, Santa Fe, Addison-Wesley.

Keynes, J.M. 2006. *Teoría general de la ocupación, el interés y el dinero*, México, FCE.

Kuhn, T.S. 1986. *La estructura de las revoluciones científicas*, México, FCE.

Langton, C.A. 1990. "Computation at the Edge of Chaos", *Physica D.*, núm. 42, pp. 12-37, en <https://pdfs.semanticscholar.org/cb4c/df7812fc8ad56d13317eaabc99b76659e95f.pdf>. [Fecha de consulta: 17 de junio de 2019.]

Lewin, R. 1995. *Complejidad. El caos como generador del orden*, Barcelona, Tusquets.

Mandelbrot, B. 1977. *Fractals, Form, Chance and Dimension*, 1ª ed., San Francisco, W.H. Freeman.

_____. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*, Nueva York, W.H. Freeman and Company.

Mandelbrot, B. y R.L. Hudson, 2006. *The Misbehavior of Markets. A Fractal View of Financial Turbulence*, Nueva York, Basic Books.

Mantegna, R.N. y H.E. Stanley. 1995. "Scaling Behavior in the Dynamics of an Economic Index", *Nature*, vol. 376, pp. 46-49.

Marx, K. 2015. *El capital*, t. I. vol. 1, México, Siglo XXI.

Mikhailov, A.S. 1990. *Foundations of Synergetics I. Distributed Active Systems*, Nueva York, Springer-Verlag.

Miramontes, O. 1999. "Los sistemas complejos como instrumentos de conocimiento y transformación del mundo", en Santiago Ramírez (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*, México, Siglo XXI, pp. 83-92.

Miramontes, P. 1999. "El estructuralismo dinámico", en Santiago Ramírez (coord.) *Perspectivas en las teorías de sistemas*, México, Siglo XXI, pp. 70-82.

Orive, A. 2006. "De la racionalidad neoclásica a la racionalidad situada", *Estudios Políticos*, 8ª epoca, núm. 9, septiembre-diciembre, pp. 75-116.

Porcile, G., M. Cimoli y J. Basilio. 2016. "Introduction to the Special Issue SCED: Complexity and Economic Development", *Structural Change and Economic Dynamics*, vol. 38, septiembre, pp. 1-106.

Prigogine, I. 1999. *Las leyes del caos*, Barcelona, Crítica.

Réka, A. y A.L. Barabási. 2002. "Statistical Mechanics of Complex Networks", *Review of Modern Physics*, vol. 74, pp. 47-97.

Rosu, H.C. (ed.). 1999. "Curso: mecánica clásica", en *Los Alamos Electronic Archives: physics/9906066*, Guanajuato, en <https://arxiv.org/pdf/physics/9906066>. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2019.]

Sayama, H. 2015. *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*, Nueva York, Open SUNY Textbooks.

Schelling, T.C. 1971. "Dynamic Models of Segregation", *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, pp. 143-186.

Schumpeter, J.A. 1997. *Teoría del desenvolvimiento económico*, México, FCE.

Thurner, S., R. Hannel y P. Klimek. 2018. *Introduction to the Theory of Complex Systems*, Oxford, Oxford University Press.

Vargas, G. 2006. *Introducción a la teoría económica*, México, Pearson Educación.

Varian, H.R. 1999. *Microeconomía intermedia*, Barcelona, Antoni Bosch.

Wannier, G.H. 1950. "Antiferromagnetism. The Triangular Ising Net", *Physical Review Journals Archive*, núm. 79, pp. 357-364.

Wolfram, S. 1983. "Statistical Mechanics of Cellular Automata", *Review of Modern Physics*, núm. 55, pp. 601-644.

_____. 1994. *Cellular Automata and Complexity: Collected Papers*, Boulder, Addison-Wesley.
_____. 2002. *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media.
Zipf, G.K. 1949. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, Cambridge, Massachusetts, Addison-Wesley.

Glosario

*Autoorganización***.** Es un proceso que genera un tipo de orden espacio-temporal a nivel global producido por las interacciones locales de los elementos constituyentes del sistema sin la intervención de fuerzas externas. El término se ha moldeado en el transcurso del tiempo, pero una caracterización importante fue realizada desde la cibernética, en el trabajo "Principles of the Self-Organizing Dynamics Systems" (1947), de W. Ross Ashby.

Criticalidad autoorganizada (CAO). Es un término propuesto por Per Bak en su libro *How Nature Works* (1996), ahí caracteriza el proceso de un sistema que evoluciona de manera autoorganizada —por la propia dinámica interna— hacia un estado llamado crítico, ya que existen correlaciones de corto y largo alcance, y fluctuaciones que se distribuyen como una ley de Zipf-Pareto, es decir, una ley de potencias de la forma 1/f la cual exhibe propiedades de autosemejanza temporal y espacial. Ejemplos de criticalidad autoorganizada son los sismos y los mercados financieros.

*Frustración***.** Es una propiedad de un sistema complejo en el cual no es posible satisfacer simultáneamente las restricciones impuestas por el entorno debido a la dinámica de las interacciones. El término es tomado de la física, en el artículo *Antiferromagnetism. The Triangular Ising Net* (1950), donde G.H. Wannier planteó un modelo de Ising en espacio triangular que exhibía este tipo de dinámicas.

*Geometría fractal***.** Estudia objetos geométricos que presentan estructuras autosemejantes a cualquier escala, espacial o temporal, con la particularidad de que tienen dimensión fraccionaria. El termino se definió en el trabajo *Fractals, Form, Chance and Dimension* (1977), de Benoit Mandelbrot.

*Irreductibilidad***.** Se refiere al principio de irreductibilidad computacional —mencionado en el libro *A New Kind of Science* (2002), de Stephen Wolfram—, el cual significa que, para conocer estados futuros del

sistema, no se puede omitir ningún paso en la evolución, no hay forma de encontrar una fórmula explícita que defina los estados pasados y futuros del sistema.

*Predictibilidad a corto plazo***.** Debido a la naturaleza no lineal de los sistemas complejos, las múltiples interacciones que ocurren de manera paralela reducen la predictibilidad de mediano y largo plazos. A finales del siglo XIX, Henri Poincaré mostró que no es posible predecir la posición y velocidad incluso de tres cuerpos interaccionando, causado por la sensibilidad a las condiciones iniciales.

*Propiedades emergentes***.** Es el resultado de la interacción local entre las partes constituyentes del sistema, la cual genera nuevos comportamientos, estructuras o funcionalidades en un nivel global. El significado del término se remonta al siglo XIX, pero en la actualidad una caracterización acorde al paradigma de los sistemas complejos se encuentra en el artículo *The Re-emergence of "Emergence"* (2002), de Peter Corning.

*Ruptura de simetría***.** Es un término tomado del área de la física para describir cómo un sistema parte de un estado homogéneo y, en su evolución, tiende hacia nuevos estados caracterizados por el cambio de información. P.W. Anderson, en el artículo *More is Different* (1972), plantea la posibilidad de abordar y estudiar sistemas compuestos con diferentes bases materiales con una teoría de rupturas de simetría.