
**TEORÍAS DE REDES COMPLEJAS: UNA HERRAMIENTA
PARA EL ESTUDIO DEL CAMBIO ESTRUCTURAL
EN FENÓMENOS SOCIALES Y ECONÓMICOS**



Raymundo Vite Cristóbal¹
Rosa María Mendoza Rosas²
Edgar Acatilla Romero³

Resumen

El propósito del presente ensayo es mostrar la relevancia de la teoría de redes complejas como una alternativa metodológica en el estudio de los fenómenos sociales y económicos, en particular la construcción de relaciones sociales en la dinámica social y el cambio estructural. Para alcanzar este objetivo, se expone primero el enfoque de la teoría de sistemas complejos, describiendo sus conceptos básicos que hacen referencia a propiedades de los sistemas complejos. Después, se ubican los fenómenos sociales y económicos como sistemas complejos en evolución. Por último, después de presentar los conceptos introductorios en el estudio de redes complejas se exponen, a manera de ejemplo, dos casos representativos: un estudio de redes sociales basada en Facebook y el cambio estructural en la economía mexicana con base en la información que proporcionan las matrices de insumo producto de los años 2003 y 2012. En ambos casos, se muestra el potencial explicativo de la teoría de redes complejas en el estudio de fenómenos sociales y económicos.

Palabras clave: cambio estructural, dinámica social, redes complejas, redes sociales, sistemas complejos.

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Académica Xochimilco (UAM-X).

² Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (CEIICH), UNAM.

³ Facultad de Contaduría y Administración (FCA) UNAM.

Introducción

Uno de los problemas centrales en la sociología y en la economía es el de explicar los mecanismos causales que determinan los cambios en las sociedades y en los sistemas productivos. Sin abundar en las distintas perspectivas teóricas que forman parte de la sociología y de la economía como disciplinas, lo que implica también distintas definiciones de estas disciplinas, ambas se plantean comprender, en última instancia, los patrones o estructuras que caracterizan a los sistemas sociales y económicos, así como sus cambios en el tiempo. En el caso de la sociología, la explicación de la construcción de las relaciones sociales cotidianas con base en estructuras sociales y, a su vez, la modificación de estas con base en las relaciones sociales, constituye el núcleo de la explicación sociológica:

...los vínculos sociales entre sujetos, actores y fuerzas políticas que interactúan en sociedad guardan una relación con las transformaciones que continuamente están desarrollando los individuos en el proceso mismo de construcción de lo social (Roitman, 1998: 11).

En esta labor de explicar la realidad social, el sociólogo pone a prueba los marcos conceptuales y las herramientas metodológicas con las que cuenta, poniendo en evidencia muchas veces sus limitaciones ante un problema que, por su naturaleza, es dinámico.

En el caso de la economía ocurre algo semejante: el comportamiento económico individual o de grupo tiene sentido en el marco de estructuras productivas que, a su vez, condicionan formas distintas de crecimiento y desarrollo. Así, el cambio estructural y sus efectos en el desarrollo, se refieren a:

...un proceso de transformación del aparato productivo y del modelo de organización social [...] afectando la estructura del producto, el ritmo de crecimiento de la economía, la generación de puestos de trabajo, el patrón de inserción competitiva internacional, la equidad distributiva y el desarrollo de la capacidad tecnológica local (Katz, 2007: 72).

Aunque este problema ha sido abordado desde los albores de la economía como disciplina, los enfoques y las herramientas metodológicas usadas por sus especialistas no han sido las más adecuadas. Tal es el caso, por ejemplo, del enfoque referido en los análisis económicos como la estática compa-

rada, que consiste en estudiar la dinámica económica y el cambio estructural a partir de comparar diagnósticos de la economía realizados en distintos momentos. Una limitación importante de este enfoque consiste en que si bien es posible observar los cambios entre un diagnóstico y otro, no es posible describir ni averiguar el mecanismo causal que generó el proceso de cambio.

Ante estas limitaciones metodológicas, resulta conveniente proponer alternativas que ayuden en el estudio y la comprensión de la dinámica social y el desarrollo económico, en particular el cambio estructural.

El marco conceptual que ofrece la teoría de sistemas complejos permite identificar la complejidad inherente en muchos fenómenos y concebirlas como sistemas complejos en evolución, es decir, como sistemas dinámicos que evolucionan en forma no lineal y por una diversidad de comportamientos. También proporciona las herramientas metodológicas para su estudio, entre ellas la teoría de redes complejas, la cual tiene como fundamento a la teoría de gráficas pero incorpora el enfoque dinámico que proviene del estudio de los sistemas dinámicos. Así, la teoría de redes complejas pone énfasis en el estudio de dos aspectos presentes en las redes: su estructura y su dinámica.

Este ensayo propone, como una alternativa metodológica, estudiar la dinámica social y económica con base en el marco conceptual y herramientas de análisis de la teoría de sistemas complejos, en particular la teoría de redes complejas. Con este propósito, el trabajo se halla estructurado de la siguiente forma: en el primer apartado se exponen los conceptos básicos que hacen referencia a las propiedades de los sistemas complejos, esto con el propósito de caracterizar a los fenómenos sociales y económicos como sistemas complejos en evolución. Una vez logrado este objetivo, en el segundo apartado se describen los elementos básicos de la teoría de gráficas y los conceptos y propiedades centrales para el estudio de redes complejas. En la tercera parte se presentan dos ejemplos: el primero se refiere a la construcción de redes sociales por medio de Facebook y, el segundo, a un análisis del cambio estructural en la economía mexicana con base en la información que proporcionan las matrices de insumo producto de 2003 y 2012, con el propósito de mostrar el potencial de la teoría de redes complejas en la comprensión de la dinámica inherente a estos fenómenos. Por último, se presentan algunas conclusiones.

Sistemas complejos y fenómenos sociales

Sistemas complejos

En el marco conceptual de la teoría de sistemas complejos (TSC) ¿qué se entiende por “sistema complejo”? De acuerdo con Bertalanffy: “Un sistema puede ser definido como un complejo de elementos interactuantes.” (Bertalanffy, 1986: 56). La importancia de esta breve definición de sistema es que establece un criterio para distinguir entre lo que es un conjunto y un sistema. Ambos se componen de elementos pero, en un sistema, a diferencia de un conjunto, los elementos son interactuantes, es decir, guardan algún tipo de relación entre sí. La palabra complejo, que acompaña como un adjetivo a la palabra sistema, sugiere que se trata de un tipo de sistema que, por sus peculiaridades, se distingue de otros sistemas. Así, la peculiaridad principal de los sistemas complejos reside en que, por la forma en que se dan las interacciones entre sus elementos, el sistema en su conjunto cambia con el tiempo de manera no lineal (Miramontes, 1999). Esto significa que un pequeño cambio en las condiciones iniciales del sistema puede producir resultados inesperados en su estado; los cambios ocurridos en el sistema no son necesariamente proporcionales a los cambios dados en sus condiciones iniciales. En oposición, los sistemas simples son aquellos donde la forma en que interactúan los elementos de un sistema genera una dinámica lineal, donde los cambios que experimenta el sistema son proporcionales a los cambios en sus condiciones iniciales. Además, los sistemas complejos son sistemas abiertos, esto es, que interactúan con su entorno. Por ello, la dinámica del sistema ocurre en dos escalas: entre sus componentes —escala local— y con respecto a su entorno —escala global— (Miramontes, 1999). Estudiar las propiedades de estos sistemas significa estudiar su dinámica —espacial y temporal— en estas dos escalas.

Ahora bien, la segunda ley de la termodinámica establece que:

...si bien la cantidad total de energía es constante en un sistema cerrado, la energía útil capaz de ser utilizada para efectuar un trabajo disminuye, pues en todo proceso una fracción de la energía se transforma inevitablemente, por fricción, rozamiento, etc., en calor, lo que no puede ya aprovecharse para su conversión en alguna forma de energía (Sametband, 1999: 86).

De acuerdo con esta ley, los sistemas aislados tienden a alcanzar su máximo grado de desorden conforme transcurre el tiempo; a tal estado se le conoce como equilibrio termodinámico. Ahora bien, los seres vivos son sistemas

que interactúan con su entorno, intercambiando materia y energía, por lo cual se mantienen alejados del equilibrio termodinámico, estado que significaría su muerte. De esta forma:

El organismo no es un sistema estático cerrado al exterior y que siempre contenga componentes idénticos: es un sistema abierto en estado (cuasi) uniforme, mantenido constante en sus relaciones de masas en un intercambio continuo de material componente y energías: entra continuamente material del medio circundante, y sale hacia él (Bertalanffy, 1986: 125).

Desde este punto de vista, los sistemas complejos son sistemas abiertos que se mantienen alejados del equilibrio termodinámico mientras interactúan con su entorno. En un comentario de Germinal Cocho sobre la obra de Ilya Prigogine referente al estudio de los sistemas complejos, señala que:

En sus trabajos, Prigogine enfatiza la importancia de los sistemas abiertos lejos del equilibrio, de la creación de estructuras disipativas espacio-temporales en esas condiciones, teniendo como mecanismo principal la amplificación de fluctuaciones y considerando la vida como una cascada de transiciones de unas estructuras disipativas a otras (Cocho, 1999: 45).

Aunque los estudios de sistemas complejos se refieren a una variedad de propiedades, la mayor parte de los autores coincide con las siguientes: emergencia, autoorganización, ruptura de simetría, criticalidad autoorganizada y fractalidad.

La emergencia es la propiedad más asociada con los sistemas complejos. Son patrones o estructuras globales que resultan de la dinámica dada por las reglas de interacción entre los componentes del sistema a nivel local. La información acerca de estas propiedades globales no está contenida en las reglas de interacción de las cuales surge, por ello se conocen como propiedades emergentes:

...las propiedades emergentes son el resultado de los procesos en paralelo que se llevan a cabo en un sistema complejo y su naturaleza es intrínsecamente colectiva; surgen en cada nivel sucesivo de complejidad y no se pueden deducir a partir de los componentes del sistema (Miramontes, 1999: 76).

La autoorganización hace referencia a procesos en los cuales, como resultado de las interacciones locales entre los componentes, surge un orden en el sistema sin que haya ninguna dirección central y si el entorno cambia, entonces el sistema se adapta.

La criticalidad autoorganizada es una propiedad de los sistemas complejos que se refiere a un proceso en el cual las interacciones entre los componentes del sistema lo llevan, sin ninguna dirección central —de ahí que sea autoorganizada—, a un valor crítico. Si el sistema rebasa dicho parámetro, entonces transitará a otra estructura. A esto se le llama transición de fase del sistema. El experimento realizado por los físicos Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld, en 1987, y conocido en la literatura científica como el modelo BTW (por las iniciales de Bak, Tang y Wiesenfeld), es el más representativo de este proceso. Sobre este experimento, Luque comenta que:

Al formar una pila de arena añadiendo granos poco a poco, el montón de arena en forma de cono aumenta poco a poco su pendiente media hasta alcanzar un valor crítico cuasiestable. Si la pila se forma sobre una plancha finita, el montón deja de crecer cuando la cantidad de arena añadida queda compensada, en término medio, por la eliminada por los bordes a través de avalanchas. En ese momento, la pila se encuentra en estado crítico (Luque, 2013: 3-4).

La ruptura de simetría se refiere a una transición del sistema de una estructura homogénea a otra no homogénea: “aparición de estructuras y patrones espacio-temporales en donde antes había únicamente homogeneidad” (Miramontes, 1999: 75).

La propiedad de fractalidad significa que la distribución de las fluctuaciones que ocurren en los sistemas complejos siguen una ley de potencias, es decir, de la forma $1/f$. Esta distribución se da en cualquier escala del sistema. En este sentido, se dice que el sistema tiene la propiedad de autosemejanza como ocurre en la geometría fractal. Cabe mencionar también que la propiedad de fractalidad se halla vinculada con la de criticalidad autoorganizada en el sentido de que el tamaño de las fluctuaciones, que ocurren en torno del valor crítico, se distribuyen como una ley de potencias.

Las propiedades que presentan los sistemas complejos hacen difícil su explicación desde una sola perspectiva, por ello, su estudio requiere de la investigación interdisciplinaria. Cabe poner énfasis en este punto, acerca de que la interdisciplina no rechaza el conocimiento especializado que proviene de cada una de las disciplinas, por el contrario, requiere de él para comprender la diversidad de comportamientos que caracterizan a los sistemas complejos. Así, el estudio de estos sistemas se basa en la creación de equipos multidisciplinarios para realizar investigación interdisci-

plinaria con base en los “puentes” de colaboración entre especialistas. Esto posibilita formular explicaciones más integradas del objeto de estudio rebasando las limitaciones que presentan los enfoques reduccionistas, estáticos y lineales usados, por lo general, en cada una de las disciplinas. La TSC es una alternativa metodológica para superar estas limitaciones.

El estudio integrado de los sistemas complejos se apoya en su modelación matemática y computacional. Existen varios métodos formales para esclarecer sus propiedades dinámicas en el tiempo y en el espacio: sistemas dinámicos no lineales, modelación basada en agentes y teoría de redes complejas. Los sistemas dinámicos no lineales se basan en un enfoque de tipo *top down* (de arriba hacia abajo) en el que, a partir de establecer reglas de interacción entre variables, las cuales representan comportamientos promedio de los componentes del sistema, se construyen modelos matemáticos con base en sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, con el propósito de estudiar la dinámica temporal y/o espacial del sistema a una escala global. Se estudian propiedades tales como rupturas de simetría —bifurcaciones— o comportamientos caóticos en sistemas que son altamente inestables, tales como los fenómenos meteorológicos. La modelación basada en agentes consiste en un enfoque *bottom up* (de abajo hacia arriba) y consiste en la construcción de modelos computacionales que representan interacciones, por medio de reglas sencillas, entre agentes individuales, lo cual permite estudiar la evolución del sistema y la identificación de propiedades emergentes en las escalas meso y macro. Por último, las redes complejas, que permiten modelar los vínculos entre los componentes del sistema y estudiar sus propiedades estructurales o topológicas e identificar cómo estas cambian en el transcurso del tiempo. Por este motivo, el uso de redes complejas tiene un gran potencial en el estudio del problema de cambio estructural en sistemas sociales y económicos.

Los fenómenos sociales y económicos como sistemas complejos en evolución y el problema del cambio estructural

Con base en las características de los sistemas complejos presentadas, se puede afirmar que las sociedades humanas son sistemas complejos en evolución (Holland, 1998; Arthur, 2013) ya que, para sostenerse en el tiempo, mantienen interacciones con su entorno natural o medio ambiente. Es decir, las sociedades se conservan al interactuar con la naturaleza mediante el sistema económico, el cual funciona dentro de un sistema social. De esta

manera, no puede existir un sistema social sin interactuar con el sistema natural y, a su vez, no puede existir un sistema económico sin interactuar con el sistema social. Debido a las interacciones con el entorno y entre sus componentes, los sistemas sociales y económicos presentan propiedades globales o estructuras que cambian con el tiempo, es decir, son sistemas que si bien muestran cierta estabilidad a escala global, también presentan cambios que modifican sus patrones globales de comportamiento. A estos cambios se les conoce, en la literatura de las ciencias sociales, como cambio estructural.

En el caso particular de la economía, el problema del cambio estructural está vinculado a otro problema de gran magnitud: el desarrollo económico. Los sistemas económicos evolucionan en el transcurso del tiempo modificando su estructura productiva y las funciones que desempeñan los sectores de la producción. Por ejemplo, el rol que desempeña el sector agrícola cambia conforme otros sectores, como el industrial o de servicios, se expanden. A su vez, el cambio en las relaciones intersectoriales condiciona el modo en que una economía crece y cómo este crecimiento se refleja o no en mejores condiciones de vida para la población de un país. Así, el cambio estructural es un fenómeno económico y consiste en:

...transformaciones de largo plazo en la composición de los agregados económicos, los que representan modificaciones en la estructura económica en términos de especialización e interrelaciones y que, en consecuencia, impactan sobre el crecimiento. Su estudio atiende al efecto diferencial del progreso técnico, su relación con la expansión productiva y la distribución del ingreso, así como su articulación con los componentes de la demanda (Bianchi y Willebald, 2013: 4).

El problema del cambio estructural en economía consiste en explicar los factores que lo determinan y en describir las fases de su evolución con el propósito de analizar escenarios posibles que puedan preverse mediante políticas de desarrollo.

Se identifican distintas causas del cambio estructural: *i*) relocalización de la fuerza de trabajo: la tasa de crecimiento de un país se ve afectada por un incremento en la productividad total de los factores, como consecuencia de los procesos de aprendizaje y de un incremento en el *stock* de capital, lo cual absorbe la mano de obra expulsada en otros sectores de baja productividad (Lewis, 1954; Kuznets, 1961; Kaldor, 1966 y Kindelberger, 1967); *ii*) cambio tecnológico: se concibe el cambio estructural como un cambio espontáneo y discontinuo determinado por el surgimiento de

innovaciones que pueden ser nuevos bienes de consumo, nuevos métodos de producción, nuevos mercados o nuevas formas de organización industrial. Estas innovaciones, cuya aparición no es uniforme en el tiempo, modifican de manera disruptiva los usos y costumbres de las operaciones comerciales y productivas, dando lugar a los ciclos económicos (Schumpeter, 1942), y *iii*) coevolución entre oferta y demanda: el cambio estructural se explica por la combinación de demanda y oferta (Barletta y Yoguel, 2017).

Para explicar el cambio estructural, los economistas ponen énfasis en alguna de estas posibles causas. Sin embargo, la complejidad de los procesos de desarrollo muestra que existen diversas causas del cambio estructural, por lo que es plausible concebirlo como una propiedad emergente en la que sus causas se ubican en los niveles meso y micro, donde ocurren fenómenos de interdependencia y retroalimentación entre los diversos componentes del sistema: procesos de competencia y el rol de las instituciones en el mercado (Barletta y Yoguel, 2017). Así, desde la perspectiva de los sistemas complejos, el concepto de cambio estructural se puede ampliar como sigue:

El cambio estructural consiste en una propiedad emergente que es la consecuencia de múltiples y heterogéneos procesos de retroalimentación positiva entre los componentes del sistema cuando este se analiza desde una perspectiva micro-, meso- y macroeconómica. En la perspectiva microeconómica se debería tomar en cuenta el desarrollo de capacidades, rutinas y reglas por parte de las empresas. La perspectiva mesoeconómica requiere centrarse en el análisis de la destrucción creativa y la forma en que funciona la competencia en cuyo marco tienen lugar los procesos de innovación, así como también el rol de las instituciones (el mercado como una de ellas) que pueden potenciar o bloquear esos procesos. Por último, la perspectiva macroeconómica requiere tener en cuenta los procesos de retroalimentación que van desde el plano institucional hasta los planos meso- y micro-, y que permitan el desarrollo de capacidades y conectividad (Barletta y Yoguel, 2017: 56).

En cuanto al problema del cambio estructural, en la sociología se halla relacionado con el problema de la dinámica social. Talcott Parsons abordó este problema desde una perspectiva sistémica. De acuerdo con este autor, las sociedades no están aisladas ya que sus procesos internos se ven condicionados por factores externos, los cuales pueden ser: otras sociedades, personas y fenómenos naturales. El sistema social puede presentar cambios cuando las condiciones de equilibrio son perturbadas. Esto significa que una pequeña alteración en el sistema puede causar graves problemas. Estas perturbaciones son de dos tipos: endógenas y exógenas.

Si bien la estructura social hace posible el equilibrio, el cambio estructural da cabida a conflictos pues no todos los agentes sociales están de acuerdo con su posición en la nueva estructura, por lo que se presentan enfrentamientos entre subgrupos. Como consecuencia de estas transformaciones, desaparecen ocupaciones, aparecen tareas de especialización, diferentes dimensiones de la vida colectiva, nuevas formas de organización política y, junto con todo esto, incertidumbre e inestabilidad.

Sin embargo, las sociedades se adaptan a las nuevas condiciones. En esto consiste, según Parsons, el proceso de evolución social, el cual se caracteriza por ser: *i*) problemático: en el sentido de que un conflicto interno puede generar cambios; *ii*) dinámico: porque tiene lugar en el tiempo y solo puede entenderse en una visión histórica; *iii*) no lineal: en el sentido de que evoluciona en distintas direcciones, incluida la involución; y *iv*) complejo: porque existen distintas formas de adaptarse al entorno (Tobar, 2019).

Ahora bien, el proceso de evolución social ocurre en un tiempo histórico en el que, cotidianamente, se van construyendo y destruyendo relaciones sociales entre los individuos. Dichas relaciones tienen significado sociológico en relación con la estructura social que, a su vez, modifican. Así, el estudio de la dinámica social cotidiana, y su relación con las estructuras sociales globales, es parte fundamental en la comprensión de la realidad social:

Lo cotidiano, la vida en sociedad es resultado de mediaciones que articulan, mantienen y modifican el sentido de las estructuras y tipos de acción social que dan origen a una explicación específica: la explicación sociológica de los comportamientos humanos. Dicha historicidad presupone, igualmente, la construcción de un sistema donde la realidad emerge como resultado propio de la acción del hombre con su entorno natural (Roitman, 1998: 11).

En ambos casos, en la economía y la sociología, el problema del cambio estructural consiste en describir los mecanismos causales de las dinámicas económica y social en el tiempo, los cuales presentan procesos de adaptación, ruptura, conflicto e involución. Ante tal complejidad, el uso de redes complejas es una herramienta de análisis importante para su estudio, en el siguiente apartado se exponen algunos conceptos básicos de la teoría de redes complejas, así como ejemplos de sus aplicaciones, con el propósito de mostrar su potencial como una herramienta metodológica en el estudio de fenómenos sociales y económicos.

Redes complejas: teoría y aplicaciones

El uso de redes complejas requiere de un conjunto de conceptos provenientes de la teoría de gráficas, por lo que aquí se expondrán algunos conceptos básicos a manera de introducción.

Conceptos básicos de teoría de gráficas

La teoría de gráficas tuvo su origen en el siglo XVIII, en Europa, gracias al matemático y físico suizo Leonard Euler, quien definió formalmente los elementos que componen a una gráfica. Una gráfica es una estructura compuesta por elementos individuales relacionados entre sí de alguna forma. Estos elementos se llaman nodos o vértices y las relaciones entre ellos se llaman aristas o lados. Por ejemplo, supóngase que en un país hay siete ciudades aisladas, por lo que el gobierno ha decidido conectarlas con el propósito de integrar la actividad económica y comercial de ese país. Para ello, construye vías ferroviarias que unen a las ciudades pasando por cada una de ellas una sola vez. En este caso, las ciudades son los nodos y las vías ferroviarias que las unen son las aristas. Así, esta estructura se compone de dos conjuntos: el de ciudades (nodos) y el de vías ferroviarias (aristas). Pero también hay una manera específica en la conexión de las ciudades: las vías ferroviarias pasan por ellas solo una vez, lo que describe una trayectoria cerrada. Cabe señalar que si el gobierno de ese país decidiera que las vías ferroviarias pasen más de una sola vez por cada ciudad, la estructura resultante sería distinta. A la forma particular en que las aristas conectan a los nodos se le llama aplicación o incidencia. Una definición formal de gráfica es la siguiente:

Una gráfica (o gráfica no dirigida) G consiste en un conjunto V de vértices (o nodos) y un conjunto E de aristas (o arcos) tal que cada arista $e \in E$ se asocia con un par no ordenado de vértices. Si existe una arista única e asociada con los vértices u y w , se escribe $e = (v, w)$ o $e = (w, v)$. En este contexto, (v, w) denota una arista entre v y w en una gráfica no dirigida y no es un par ordenado (Johnsonbaugh, 2005: 320).

Con base en esta definición, es importante mencionar que las gráficas pueden ser dirigidas o no dirigidas. En las no dirigidas no importa en qué sentido ocurre la relación entre un vértice y otro. Un ejemplo de una gráfica dirigida es la representación de las relaciones de poder que hay entre hermanos en una familia, si estas relaciones son simétricas, entonces se pue-

den representar con una gráfica no dirigida. En cambio, las relaciones entre padres e hijos se pueden considerar como asimétricas y se pueden representar mediante una gráfica dirigida. Otro ejemplo es el siguiente: supóngase que hay cinco estaciones de teléfono y están conectadas entre sí de la siguiente manera: la estación uno recibe señal de la estación cinco y dos pero, a su vez, proporciona señal a la estación dos; la estación dos recibe señal de la estación cuatro y de la uno y da señal a la cinco; la estación tres envía y recibe señal de la cuatro; la estación cuatro envía señal a la dos y recibe señal de la cinco y la tres y, por último, la estación cinco recibe señal de la dos y envía señal a la uno y a la cuatro. Nótese que las señales están dirigidas. Las gráficas dirigidas tienen diversas aplicaciones, por ejemplo en telecomunicaciones, para optimizar rutas. También en procesos de difusión: difusión de enfermedades, de innovaciones tecnológicas, etc. En el primer caso, ayuda a comprender los patrones que pueden seguir la difusión o propagación de un virus en una población, lo cual es muy importante para prevenir la emergencia de una posible epidemia (Mansilla y Mendoza, 2015). En cuanto a las innovaciones tecnológicas, ayuda a comprender la difusión de tecnologías en un mercado o en una economía (Frenken, 2000; Leite y Teixeira, 2011). Formalmente, una gráfica dirigida se define como sigue:

Una gráfica dirigida (o digráfica) G consiste en un conjunto V de vértices (o nodos) y un conjunto E de aristas (o arcos) tal que cada arista $e \in E$ está asociada con un par ordenado de vértices. Si hay una arista única e asociada con el par ordenado (v, w) de vértices, se escribe $e = (v, w)$ que denota una arista de v a w (Johnsonbaugh, 2005: 320).

Es importante señalar que en las gráficas puede haber “lados paralelos” cuando dos vértices están conectados por dos lados; y “lazos”, cuando un lado conecta a un vértice consigo mismo (García, 2006). Si la gráfica incluye lados paralelos y lazos, se llama “multigráfica”. También puede haber “islas”, las cuales son subgráficas en las que sus vértices se hallan conectados entre sí, pero no están conectados con el resto de los nodos de la gráfica (Aldana, 2006). Otro concepto fundamental en el estudio de la estructura de una red es el de grado de conexión de un nodo. El “grado” mide el número de lados de la gráfica que inciden en un vértice.

Los conceptos de vértices vecinos, caminata, sendero, camino, ciclo, distancia y diámetro, complementan el conjunto de conceptos básicos en la teoría de gráficas. En el siguiente cuadro se definen.

CUADRO 1. Conceptos básicos de la teoría de gráficas

Término	Formulación matemática	Descripción
Gráfica (Red)	$G(V, E)$	Conjunto de vértices (nodos) y enlaces (aristas) que conectan esos nodos.
Vértice (nodo, actor)	$v \in V$	Cada una de las partes (actores) que integran la red.
Arista (enlace)	$e \in E : E \subseteq V \times V$	Cada relación (conexión) que se establece entre los vértices (nodos).
Vértices vecinos	$\exists e : e(u, v) \in E \Leftrightarrow \forall u, v \in V g_{uv} \in \{0, 1\} \wedge g_{uv} = 1$	El Nodo u se llama vecino del Nodo v si y solo si existe una arista e que los conecte.
Caminata (w)	$w = (v_1, e_1, v_2, e_2, \dots, v_{n-1}, e_{n-1}, v_n)$: $\forall i \ i \ n \ \{v_i, v_{i+1}\} = e_i$	Una lista de vértices y aristas conectados secuencialmente y que forman una ruta continua en una red.
Sendero (t)	$t = (v_1, e_1, v_2, e_2, \dots, v_{n-1}, e_{n-1}, v_n)$: $\forall i, j \ i \ n \ \{v_i, v_{i+1}\} = e_i \ \wedge \ e_i \neq e_j$	Caso particular de una caminata donde todas las aristas son distintas (no se recorren más de una vez).
Camino (p)	$p = (v_1, e_1, v_2, e_2, \dots, v_{n-1}, e_{n-1}, v_n)$: $\forall i, j \ i \ n \ \{v_i, v_{i+1}\} = e_i \ \wedge \ v_i \neq v_j$	Caso particular de una caminata donde los vértices no se recorren más de una vez (todos son distintos).
Ciclo	$c = (v_1, e_1, v_2, e_2, \dots, v_{n-1}, e_{n-1}, v_n)$: $\forall i, j \ i \ n \ \{v_i, v_{i+1}\} = e_i \ \wedge \ \forall 2 \ k \ n-1 \ v_k \neq v_j \ \wedge \ v_1 = v_n$	Caso particular de una caminata que inicia y termina en el mismo nodo visitando los demás nodos una vez.
Distancia	$d(u, v) = \min \left\{ \sum_{p_i \in P} e(u, v) \right\}$	Longitud del camino más corto entre dos vértices de la red. Cuando no hay conexión entre dos vértices la distancia se considera.
Diámetro	$diam(G) = \max \{d(u, v) \ \forall u, v \in V\}$	Es la mayor distancia de todas entre los caminos que llegan de un vértice a otro en la red.

Fuente: tomado de Acatitla y Urbina (2017: 16).

La teoría de gráficas se basa en los conceptos de caminata, sendero, camino y ciclo para estudiar su estructura y clasificarlas.

Tipos de gráficas

Las gráficas —dirigidas o no dirigidas—, de acuerdo con las estructuras que forman las conexiones entre sus nodos, se clasifican en gráficas de Euler, de Hamilton, bipartidas, planas y árboles. En el siguiente cuadro se describen las características de cada una de ellas.

Cuadro 2. Tipos de gráficas según su estructura

Nombre de la gráfica	Características
De Euler	Es una gráfica con un “circuito de Euler”, este es un “camino de Euler” que es cerrado. Un camino de Euler es un recorrido en el que aparecen todas las aristas.
De Hamilton	Es una gráfica que contiene un “camino de Hamilton”, este es un camino que recorre todos los vértices una sola vez.
Bipartidas	Es una gráfica en la que el conjunto de vértices (V) se puede descomponer en dos subconjuntos disyuntos, es decir, que no comparten elementos, V_1 y V_2 . Además, toda arista incide en un vértice de V_1 y en un vértice de V_2 .
Planas	Son gráficas en las que los vértices y aristas se encuentran en un plano y las aristas que unen dos vértices no se cortan.
Árboles	Son gráficas que no tiene ciclos.

Fuente: elaboración propia con base en García (2006).

El estudio de cada uno de estos tipos de gráficas es amplio. Las aplicaciones de la teoría de gráficas en matemática, ingeniería y computación se extienden a muchos problemas. Por ejemplo, en matemática se plantea el problema de los colores en topología y de los poliedros regulares en geometría; en ingeniería se plantean problemas de optimización; en electricidad, problemas relacionados con redes eléctricas y, en computación e informática, se abordan problemas relacionados con redes de computadoras, entre otros (Álvarez y Parra, 2013). También es una herramienta útil en el estudio de fenómenos sociales, por lo que se conoce como teoría de redes sociales. Un aporte metodológico de esta teoría son los conceptos de centralidad de

grado, centralidad de intermediación y centralidad de cercanía, propuestos por el sociólogo Linton Freeman (1979), conocidas en la literatura de redes sociales como medidas de centralidad. La “centralidad de grado” se refiere simplemente al grado de un vértice, es decir, al número de lados que unen a un vértice con los demás; la “centralidad de intermediación” cuantifica las veces que un vértice se encuentra en el camino más corto, en la gráfica, entre dos vértices; por último, la “centralidad de cercanía” de un vértice mide la distancia promedio de este respecto a los demás vértices en su componente conexa.

Con base en este breve panorama de la teoría de gráficas, cabe resaltar los siguientes alcances y límites como una herramienta para el estudio de los sistemas complejos: *i*) es un enfoque de sistemas, ya que estudia estructuras —o topologías— que resultan de los vínculos dados entre los elementos o componentes de un todo —sistema; *ii*) pone énfasis en el estudio de las estructuras formadas por los vínculos y no en la constitución material de los elementos o componentes del sistema. Sin embargo, presenta una limitación: *iii*) es un enfoque estático, ya que estudia la topología o estructura de un sistema en un momento del tiempo, pero deja de lado su evolución o dinámica, lo que impide describir los patrones dinámicos que caracterizan a los sistemas complejos. Esta limitación es superada por la teoría de redes complejas.

Teoría de redes complejas

El estudio de redes complejas considera dos propiedades: *i*) la estructura, y *ii*) la dinámica de la red. En el análisis de la estructura de la red, se consideran las propiedades estructurales o topológicas de la red, es decir, aquellas propiedades que indican cómo están conectados los nodos, como se hace en la teoría de gráficas. Mientras que la dinámica de la red consiste en el estudio de patrones dinámicos en el proceso de formación de dicha estructura o topología (Aldana, 2011).

En el estudio de la estructura o topología de la red se toman como base los avances de la teoría de gráficas, mientras que en el estudio de la dinámica se consideran los avances de la teoría de sistemas dinámicos que estudia, con base en sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, la formación de patrones temporales y espaciales que se derivan de las interacciones promedio de los elementos que componen el sistema.

Algunas de las propiedades estructurales o topológicas que se estudian en las redes complejas aparecen resumidas en el siguiente cuadro.

CUADRO 3. Propiedades estructurales más estudiadas de las redes complejas

Propiedad	Características
Distribución de conexiones (o vecinos), $P(k)$	Probabilidad que tiene cualquier nodo de la red, de tener k conexiones o vecinos.
Coefficiente de agregación, C	Probabilidad de que dos nodos conectados directamente a un tercer nodo, estén conectados entre sí.
Longitud mínima entre dos vértices	Es el número mínimo de “pasos” que se tienen que dar para llegar de un nodo de la red, a cualquier otro nodo.
Longitud promedio de la red, L	Promedio de las longitudes mínimas entre todas las posibles parejas de nodos de la red.
Distribución de tamaños de islas, $P(s)$	Probabilidad de que una isla esté compuesta por s nodos.
Tamaño de la isla más grande.	Isla compuesta por s nodos, donde s es el número más grande.

Fuente: elaboración propia con base en Aldana (2011).

Ahora bien, en cuanto a la distribución de los vecinos, $P(k)$, se distinguen tres tipos de redes: *i*) tipo Poisson (o redes tipo Erdős-Rényi), se caracteriza por el hecho de que sus nodos se distribuyen de manera homogénea, según la siguiente expresión:

$$P(k) = \frac{e^{-z} z^k}{k!}$$

ii) tipo exponencial, se produce en redes donde cada nuevo nodo que se añade, posee la misma probabilidad de ser enlazado que el resto —enlace igualitario— y se distribuyen de la siguiente forma:

$$P(k) = C e^{-\alpha k}$$

Y, por último, *iii*) red tipo libre de escala. La distribución entre nodos no ocurre en forma igualitaria, por lo que Barabási la llamó “enlace prefe-

rencial”. Los nodos nuevos que se añaden a la red se conectarán preferentemente con los nodos ya existentes con mayor número de conexiones. Sus nodos se distribuyen de la siguiente forma:

$$P(k) = Ck^{-\gamma}$$

Cabe señalar que las redes complejas tienen la característica de ser libres de escala. Esto sugiere la propiedad que consiste en que se pueden observar patrones que ocurren en distintas escalas y niveles.

En el análisis de la dinámica de la red se estudian los patrones que existen en la agregación de nodos o componentes a una red, lo cual se analiza con base en modelos computacionales y ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales utilizadas en física y, a veces, conocidas como ecuaciones maestras, tales como la ecuación de Fucker-Planck. Se podría decir que uno de los retos científicos planteados en el estudio de las redes complejas es hallar la ecuación diferencial que explica la formación de una red compleja, esto es, la pauta o el patrón dinámico en la formación o construcción de una red (Aldana, 2011). En este aspecto, queda mucho por investigar.

Aplicaciones en sociología y economía

Un ejemplo aplicado en sociología

A continuación se presentan los resultados del análisis de la red social virtual de un usuario de Facebook originario de Colombia, llevado a cabo por Torres *et al.* (2012). El estudio se orientó en identificar la estructura y los medios de asociación social del usuario —empleando su cuenta previo consentimiento—, a la cual se le realizó el proceso de identificación de la totalidad de integrantes de la red con el fin de definir el tamaño de la misma y las posibilidades de análisis sociométrico. Los resultados muestran la influencia de Facebook en la construcción de vínculos sociales de un individuo.

La cuenta de Facebook estudiada contaba con 118 contactos o amigos, de los cuales 44 eran hombres (37.3%) y 73 mujeres (60.2%), mientras que tres (2.5%) correspondió a grupos de Facebook. Los contactos presentaron una media de edad de 27.35 años —con desviación estándar de 8.47— con valores extremos de 11 y 58 años. Los contactos a su vez reportaron una media de 297.87 contactos —con desviación estándar de

343.42—, algunos de ellos con redes virtuales muy pequeñas —13 contactos— y otros con megaredes —2 961 contactos—; asimismo, en la red se identificó que el *ego* —usuario de la red analizada— con los integrantes presentaban una media de 15.25 contactos en común —desviación estándar de 12.48; valor mínimo igual a 0 y valor máximo igual a 76.

En el estudio, las características estructurales de la gráfica se obtuvieron a partir del cálculo de indicadores de centralidad y poder, para ello se estimaron los valores de grado nodal de entrada y salida, cercanía de entrada y salida, intermediación, densidad y la centralización asociada a cada uno de estos indicadores.

En cuanto a la densidad de la red, esta resultó ser muy baja, con un valor de 0.1422, pese a tratarse de una red con un número elevado de actores. Este resultado indica que las relaciones dentro de la red virtual se centran en 14% de los actores que la conforman, es decir, de la totalidad de contactos existen 18 con los que el vínculo se da de forma más intensa. Un resultado similar sucedió con el resto de los indicadores de poder social y centralidad, mostrándose valores reducidos para la mayoría de los contactos (Torres *et al.*, 2012).

Atendiendo las medidas de centralidad se encontró que la red social analizada posee pocos actores con posiciones ventajosas, mientras que un número elevado de contactos al parecer ocupan posiciones periféricas. Sin embargo, los altos niveles de centralización hallados en la red indican que la gráfica está organizada en torno a sus puntos más centrales. Todo parece indicar que se trata de una red relativamente amplia en la que los contactos se centran en un número pequeño de actores que intermedian las relaciones o vínculos con los actores más periféricos. De esta forma, pese al bajo poder social de la mayoría de los actores, la red se muestra cohesionada alrededor de los actores centrales (Torres *et al.*, 2012).

Cabe poner énfasis en la detección de la importancia relativa de los contactos. Se realizó con base en dos procedimientos: *i*) se creó una gráfica de pirámide para identificar los subgrupos; y *ii*) se crearon gráficas en las que se visualizaron la participación de los actores de acuerdo con su indicador de grado nodal dentro de la red virtual, esto con el propósito de observar la participación de cada actor en particular, según el género —hombre o mujer— o el grupo de Facebook.

La organización de la gráfica de pirámide se realizó con base en la detección de subagrupaciones establecidas por diversos conjuntos de actores, que compartían características comunes. En total, se identificaron nueve subgrupos que se diferencian en las gráficas de acuerdo con el co-

lor de sus nodos y aristas. Los grupos identificados fueron clasificados en las categorías descritas en el siguiente cuadro.

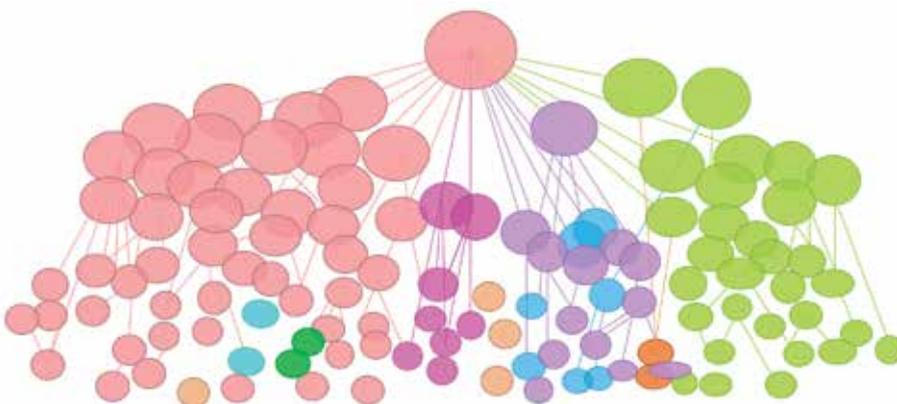
CUADRO 4. Subgrupos identificados con base en las gráficas

Color	Grupo que representa
Rojo	Círculo académico de la misma profesión
Verde-azul	Círculo académico de profesión diferente
Morado	Familiares de línea generacional
Verde	Familiares del cónyuge
Fucsia	Familiares de amistades cercanas
Anaranjado	Miembros de comunidad religiosa

Fuente: Torres *et al.* (2012).

En la figura 1 se presenta la agrupación de actores de acuerdo con el nivel de relaciones que los mismos ejercen dentro de la red virtual, para ello se construyó un gráfica de pirámide que delimita la posición de los actores desde los más centrales hacia los más periféricos leyéndose de forma descendente, es decir, de arriba hacia abajo.

FIGURA 1. Gráfica de pirámide con actores agrupados según centralidad

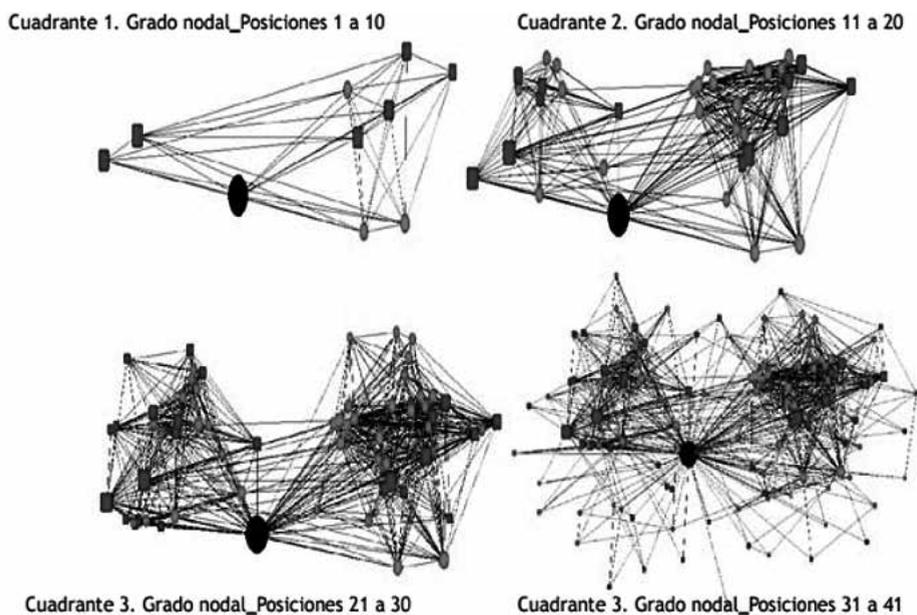


Fuente: Torres *et al.* (2012).

Se observa que los individuos con mejores posiciones son aquellos que precisamente comparten la formación académica con el *ego*, de hecho son los principales actores que aportan a la centralización con 14 integrantes frente a 4 que pertenecen al grupo de familiares. Asimismo, los miembros del núcleo familiar de origen y la familia política —adquirida por vía conyugal— también muestran una posición relativa importante en la gráfica. Dentro de las posiciones descritas sobresale, a su vez, el flujo de comunicaciones con individuos con los cuales se compartió vecinazgo en ciudades o residencias anteriores, lo que parece señalar que el uso de la red virtual permite el sostenimiento de lazos de relación con actores significativos pese a la reubicación geográfica de los contactos (Torres *et al.*, 2012).

En segundo lugar, se construyeron gráficas para identificar la importancia particular de cada actor bien fuera persona —según su género— o una asociación en la red virtual. Los resultados de este procedimiento pueden observarse en la figura 2, en la que se aprecia la unión de actores por cuadrantes acorde al nivel de grado nodal de entrada de cada actor. En total, los 118 contactos se distribuyeron en 41 posiciones de acuerdo con el grado nodal, tales posiciones se organizaron en 4 cuadrantes con promedio de 10 posiciones por cuadrante. En las gráficas se aprecia que las primeras 10 posiciones —los individuos mejor ubicados en la red— son hombres pero, paulatinamente en la ampliación de posiciones, las mujeres van ocupando un flujo importante de relaciones en la red mostrando, incluso, relaciones más apiñadas que los contactos de los hombres. El nivel de interacción entre hombres y mujeres también es significativo, aunque se sesga a los subgrupos en los cuales interactúa cada actor restringiéndose el margen de relaciones intergrupales. Finalmente, los grupos o asociaciones de Facebook son de poca participación dentro de la red analizada (Torres *et al.*, 2012).

FIGURA 2. Gráfica organizada de acuerdo con la identificación de amistades significativas



Fuente: Torres *et al.* (2012).

En términos de las características sociométricas de la red analizada, se desprende la siguiente conclusión: la distribución jerárquica de relaciones de acuerdo con la posición social de los actores de la red y de los subgrupos a los cuales pertenecen, muestra un fuerte vínculo con aquellos individuos con los que se comparte información, y se tienen intereses comunes, aunque la familia sigue mostrando un elevado nivel de importancia en la participación relacional a pesar de ser un medio de interacción social virtual.

Un ejemplo aplicado a la economía

El segundo ejemplo se ubica en la economía. Sin lugar a dudas el avance de la teoría de redes sociales se ha transmitido al análisis de insumo pro-

ducto, en particular al análisis del cambio estructural.⁴ Existe una línea de investigación sugerida por Morillas (1983, 1995), García y Ramos (2003 y 2006) y otros, quienes sustentados en el uso de las medidas de centralidad de la red de insumo producto, proponen analizar los cambios en las relaciones intersectoriales de una economía. Vistas las matrices de requisitos, directos e indirectos de producción como una red, es posible detectar dichos cambios intersectoriales utilizando los indicadores nodales de centralidad.

Utilizando este enfoque, aplicado a las matrices de requisitos directos e indirectos de producción de la matriz de insumo producto total de la economía mexicana de 2003 y 2012, agregada a 19 sectores productivos, se calcularon los indicadores de centralidad nodal de grado, de cercanía y de intermediación. Los sectores analizados se presentan en el cuadro 5.

CUADRO 5. Actividades económicas agregadas a 19 sectores

Núm.	Características
S1	Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza
S2	Minería
S3	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final
S4	Construcción
S5	Industrias Manufactureras
S6	Comercio
S7	Transportes, correo y almacenamiento
S8	Información en medios sociales
S9	Servicios financieros y de seguros
S10	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles
S11	Servicios profesionales, científicos y técnicos
S12	Corporativos
S13	Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación
S14	Servicios educativos

⁴ En el enfoque de insumo producto, el análisis del cambio estructural se refiere al cambio en las relaciones intersectoriales vistas a partir del cambio en los efectos totales calculados a partir de la matriz inversa de Leontief (Mariña, 1993).

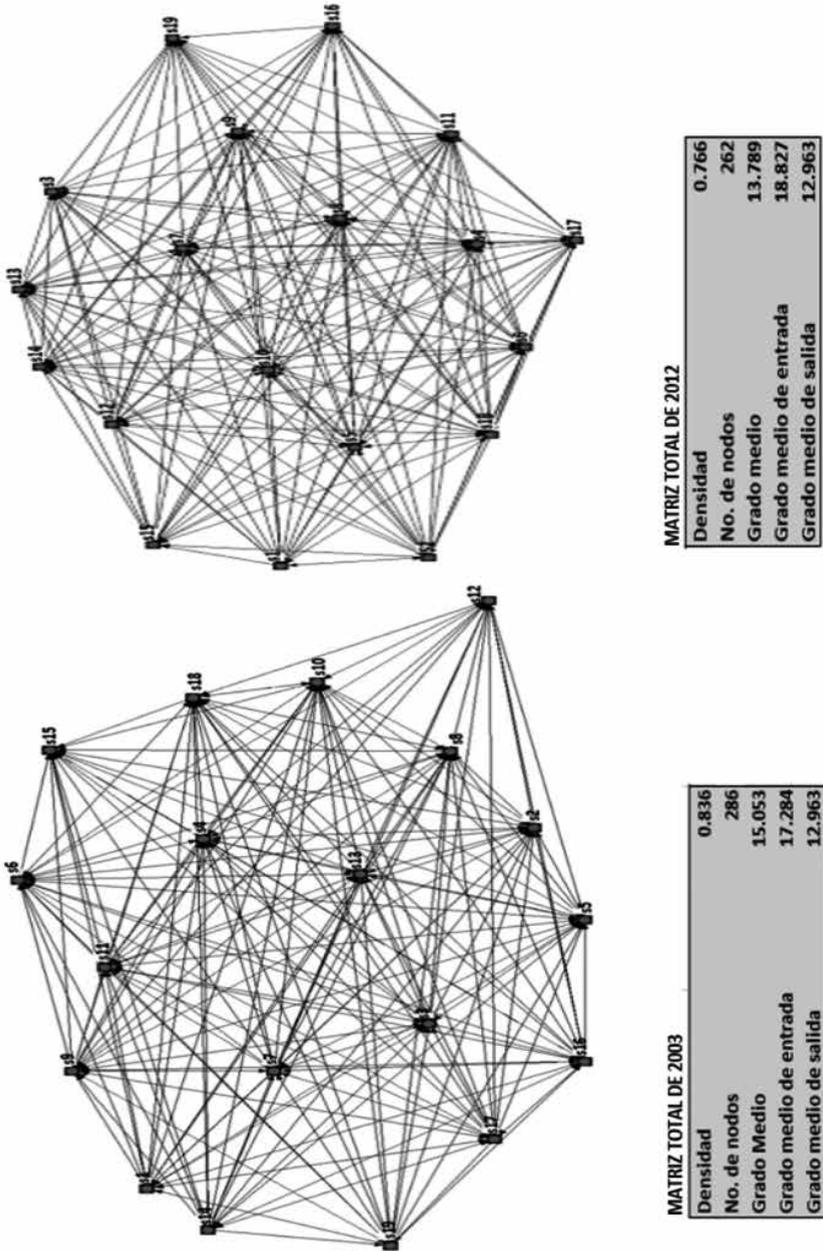
S15	Servicios de salud y de asistencia social
S16	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos
S17	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
S18	Otros servicios excepto actividades gubernamentales
S19	Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales

Fuente: INEGI, SCNM, Matriz Simétrica de Insumo Producto Total 2003 y 2012, respectivamente.

Antes de analizar las medidas de centralidad de las matrices involucradas, en la figura 3 se presentan la densidad y la centralidad de grado medio como indicadores globales de la red de insumo producto. Se observa muy claramente que la matriz de 2003 es más densa y posee un grado medio relativamente más alto que su contraparte matriz de 2012, lo que indica que en 2003 hay más compra-venta de insumos intermedios y que las relaciones directas entre los sectores son mayores que las de 2012. El grado medio de entrada para ambos años indica que las transacciones entre los sectores son dominadas por las compras.

En las medidas de centralidad se obtuvieron los siguientes resultados. Atendiendo la centralidad de grado para 2003 hay 12 sectores que tienen el mismo grado máximo de compras de insumos, con 18 vínculos (véase cuadro 5). Para 2012, siguen siendo 12 sectores los que dominan las compras de insumos, aunque el número de vínculos máximo se reduce a 17 vínculos. Repiten los sectores: servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles (S10), servicios profesionales, científicos y técnicos (S11), construcción (S4), comercio (S6), transportes, correos y almacenamiento (S7), información en medios masivos (S8), servicios financieros y de seguros (S9), otros servicios excepto actividades gubernamentales (S18) y servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación (S13); se observan los sectores: generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final (S3), industrias manufactureras (S5) y servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (S17); y surgen los sectores: corporativos (S12), servicios educativos (S14) y actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales (S19) como los más influyentes de la red.

FIGURA 3. Indicadores globales de la red de insumo producto total de México de 2003 y 2012



Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla de Insumo Producto Total (TIP) de 2003 y 2012 utilizando Unicet for Windows.

CUADRO 6. Centralidad de grado: matrices de insumo producto de México, 2003 y 2012

Centralidad de grado 2003					Centralidad de grado 2012				
Sector	Out-degree	In-degree	NrmOut degree	NrmIn degree	Sector	Out-degree	In-degree	NrmOut degree	NrmIn degree
10	18 000	16 000	100.000	88.889	10	17 000	13 000	94.440	88.889
11	18.000	14.000	100.000	77.778	11	17.000	16.000	94.440	72.222
3	18.000	15.000	100.000	83.333	12	17.000	15.000	94.440	83.333
4	18.000	17.000	100.000	94.444	4	17.000	15.000	94.440	94.444
5	18.000	17.000	100.000	94.444	14	17.000	14.000	94.440	94.444
6	18.000	12.000	100.000	66.667	6	17.000	15.000	94.440	66.667
7	18.000	16.000	100.000	88.889	7	17.000	16.000	94.440	88.889
8	18.000	16.000	100.000	88.889	8	17.000	15.000	94.440	88.889
9	18.000	15.000	100.000	83.333	9	17.000	14.000	94.440	83.333
18	18.000	17.000	100.000	94.444	19	17.000	14.000	94.440	94.444
13	18.000	15.000	100.000	83.333	13	17.000	12.000	94.440	83.333
17	18.000	15.000	100.000	83.333	18	17.000	14.000	94.440	77.778
16	14.000	15.000	77.778	83.333	5	16.000	16.000	88.889	88.889
2	14.000	15.000	77.778	83.333	15	15.000	13.000	83.333	72.222
14	13.000	14.000	72.222	77.778	2	10.000	15.000	55.556	83.333
12	10.000	13.000	55.556	72.222	3	9.000	15.000	50.000	83.333
1	10.000	14.000	55.556	77.778	17	8.000	14.000	44.444	77.778
19	9.000	14.000	50.000	77.778	16	0.000	16.000	0.000	88,889
15	9.000	16.000	0.000	88.889	1	0.000	0.000	0.000	0.000
Mean	15.053	15.053	83.626	83.626	Mean	13.789	13.789	76.608	76.608

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla de Insumo Producto Total (TIPT) de 2003 y 2012, utilizando Ucinet for Windows.

Cabe mencionar que no existe ningún sector que monopolice las compras y ventas de insumos. Lo que sí puede afirmarse es que el predominio de estas compras y ventas de insumos es compartido entre varios sectores. La estructura de 2012 varió respecto a la de 2003, presentó ligeros cambios. Para 2012 hay sectores compradores que repiten, tres que salen y tres nuevos sectores que se incorporan como compradores netos. En cuanto a los flujos de salida, las ventas, no se vislumbra un patrón de comportamiento, aunque también se observan ligeras diferencias.

En cuanto a la centralidad de cercanía. En el cuadro 7 se observa que, para la matriz de 2003, los sectores con cercanía de entrada por encima de la media —sectores compradores que están cerca de los vendedores de

insumos— se tienen, en primer lugar, el sector de servicios de salud y de asistencia social (S15), después le siguen los sectores: industrias manufactureras (S5), otros servicios excepto actividades gubernamentales (S18) y construcción (S4). Los sectores con cercanía de salida por encima de la media —sectores vendedores que están cerca de los compradores de insumos—: industrias manufactureras (S5), otros servicios excepto actividades gubernamentales (S18), construcción (S4), transportes, correos y almacenamiento (S7), información en medios masivos (S8), servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles (S10), generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final (S3), servicios financieros y de seguros (S9), servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación (S13), servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (S17), servicios profesionales, científicos y técnicos (S11) y comercio (S6) alcanzan el valor máximo normalizado (100), esto significa que son sectores muy relacionados como vendedores netos de insumos. Se trata de sectores con valor de centralidad alto. En tanto que el sector de agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza (S1) tiene el valor de cercanía de salida más bajo —se trata de un sector aislado como vendedor de insumos—, el sector de comercio (S6) tiene el valor de cercanía de entrada más bajo —sector aislado como comprador de insumos.

En la matriz de 2012 se observa que bajaron radicalmente los valores de cercanía de grado, de entrada y de salida: los sectores que están por encima de la media como vendedores de insumos, casi todos, excepto: servicios de salud y de asistencia social (S15), servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles (S10), servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación (S13) y agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza (S1). De hecho, el sector más aislado es (S1). Los que están por encima de la media como compradores de insumos, casi todos, excepto: servicios de esparcimiento, culturales y deportivos, y otros servicios recreativos (S16) y (S1). El sector más aislado o desconectado por el lado de las compras de insumos es también (S1). Un resultado sorprendente es que, comparando el indicador de cercanía de entrada y salida de ambos años, se observa que en 2012 se redujo aproximadamente 50% la capacidad de conexión por ventas, en tanto que la capacidad de conexión por compras se redujo aproximadamente 40%.

CUADRO 7. Centralidad de cercanía: matrices de insumo producto de México, 2003 y 2012

Centralidad de cercanía 2003					Centralidad de cercanía 2012				
Sector	In-Farness	Out-Farness	In-Closeness	Out-closeness	Sector	In-Farness	Out-Farness	In-Closeness	Out-closeness
15	20.000	342.000	90.000	5.263	16	37	342	48.649	5.263
5	36.000	18.000	50.000	100.000	11	54	36	33.333	50.000
18	36.000	18.000	50.000	100.000	5	54	37	33.333	48.649
4	36.000	18.000	50.000	100.000	7	54	36	33.333	50.000
7	37.000	18.000	48.649	100.000	3	55	44	32.727	40.909
8	37.000	18.000	48.649	100.000	6	55	36	32.727	50.000
10	37.000	18.000	48.649	100.000	2	55	43	32.727	41.860
2	38.000	22.000	47.368	81.818	4	55	36	32.727	50.000
3	38.000	18.000	47.368	100.000	8	55	36	32.727	50.000
9	38.000	18.000	47.368	100.000	12	55	36	32.727	50.000
13	38.000	18.000	47.368	100.000	19	56	36	32.143	50.000
16	38.000	22.000	47.368	81.818	9	56	36	32.143	50.000
17	38.000	18.000	47.368	100.000	17	56	45	32.143	40.000
1	39.000	26.000	46.154	69.231	14	56	36	32.143	50.000
11	39.000	18.000	46.154	100.000	18	56	36	32.143	50.000
14	39.000	23.000	46.154	78.261	15	57	38	31.579	47.368
19	39.000	27.000	46.154	66.667	10	57	36	31.579	50.000
12	40.000	26.000	45.000	69.231	13	58	36	31.034	50.000
6	41.000	18.000	43.902	100.000	1	342	342	5.363	5.263
Average	37.053	37.053	49.667	86.963	Average	69.632	69.852	31.852	43.648

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla de Insumo Producto Total (TIPT) de 2003 y 2012, utilizando Ucinet for Windows.

En cuanto a la centralidad de intermediación, se observa escasa capacidad de intermediación para ambos años de las matrices. Aunque se nota mayor capacidad de intermediación para 2003, los sectores con mayor intermediación son: industrias manufactureras (S5), construcción (S4) y otros servicios excepto actividades gubernamentales (S18), los cuales sirven de puente a cuatro pares de nodos; y los sectores con menor intermediación son: servicios de salud y de asistencia social (S15) y corporativos (S12). Para la matriz de 2012, los sectores con mayor intermediación son: transportes, correos y almacenamiento (S7) y servicios profesionales, científicos y técnicos (S11), los cuales, sirven de puente a tres pares de nodos, y como sectores aislados, los sectores: agricultura, cría y explotación de animales,

aprovechamiento forestal, pesca y caza (S1) y servicios de esparcimiento culturales y deportivos y otros servicios recreativos (S16).

CUADRO 8. Centralidad de intermediación: matrices de insumo producto de México, 2003 y 2012

Centralidad de intermediación 2003			Centralidad de intermediación 2003		
Sector	Between-ness	n-Between-ness	Sector	Between-ness	n-Between-ness
5	4.034	1.318	7	3.380	1.104
4	4.034	1.318	11	3.380	1.104
18	4.034	1.318	5	2.993	0.978
7	3.072	1.004	8	2.501	0.817
10	3.072	1.004	12	2.255	0.737
8	2.943	0.962	6	2.255	0.737
3	2.875	0.939	4	2.255	0.737
9	2.715	0.887	18	2.081	0.680
13	2.479	0.810	14	1.370	0.448
17	2.132	0.697	9	1.370	0.448
2	1.950	0.637	10	1.293	0.422
16	1.259	0.411	19	1.124	0.367
11	1.170	0.382	1	0.327	0.107
6	0.811	0.265	17	0.154	0.050
1	0.556	0.182	3	0.111	0.036
19	0.439	0.144	15	0.077	0.025
14	0.250	0.082	13	0.077	0.025
12	0.174	0.057	16	0.000	0.000
15	0.000	0.000	1	0.000	0.000
Mean	2.000	0.654	Mean	1.421	0.464

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla de Insumo Producto Total (TIPT) de 2003 y 2012, utilizando *Ucinet for Windows*.

Con base en este ejemplo, algo queda de manifiesto: aunque hay sectores que por su importancia sostienen la estructura de la red de insumo producto —tal es el caso del sector de industrias manufactureras, S5—, la conectividad es cambiante de un año a otro. Así, de 2003 a 2012 tanto la capacidad de intermediación nodal de la red como la centralidad de grado nodal —relaciones directas— y la centralidad de cercanía nodal —relaciones indirectas— se reducen, aunque en estos dos últimos indicadores

se percibe muy claramente que para 2012 desaparecen sectores y surgen otros. Cabe señalar que estos cambios son difíciles de detectar utilizando las metodologías tradicionales del cambio estructural, tales como las metodologías Chenery-Watanabe y Rasmussen.

En términos del aporte metodológico en ambos ejemplos, queda claro el procedimiento para detectar la estructura de la red como resultado de la interacción entre los distintos actores, esto facilita la detección de patrones relacionales y permite situar la posición —o rol— de cada actor al interior de la red. Un actor cuya acción depende del entorno. Se trata de la detección de propiedades emergentes, un concepto afín a las propiedades de los sistemas complejos.

Conclusiones

Los fenómenos sociales y económicos estudiados por la sociología y la economía se caracterizan por su estructura y dinámica. Los enfoques y métodos usados en la explicación de los mecanismos causales de estos fenómenos han puesto de manifiesto sus límites, llevando a la búsqueda de otras herramientas metodológicas. En este sentido, la teoría de sistemas complejos así como sus herramientas de análisis, en particular la teoría de redes complejas, representan una alternativa metodológica para abordar estos problemas.

La teoría de redes complejas, basada en la teoría de gráficas, proporciona los elementos conceptuales y las herramientas para representar fenómenos sociales tales como los de la dinámica en la construcción de relaciones sociales y el cambio estructural en economía. Así lo muestran los ejemplos revisados en este ensayo.

De esta forma, la aplicación de redes al estudio de la construcción de vínculos sociales de un individuo, muestra que el uso de Facebook no solo puede ser un medio para ampliar los vínculos sociales, sino también un medio para reforzar los vínculos ya establecidos en los entornos cercanos, como las relaciones entre familiares, convirtiéndose así en un medio de interacción social que moldea hoy en día las relaciones sociales.

Por otra parte, la aplicación de la teoría de redes complejas al análisis del cambio estructural por medio de insumo producto deja de manifiesto su enorme potencial, ofrece nuevos elementos metodológicos que complementan la visión tradicional del cambio estructural. Permite analizar la dinámica de las compras y ventas de los insumos intermedios a lo largo del

tiempo, detectando su concentración y los sectores que la controlan, ofrece una nueva forma de estudiar la configuración estructural cambiante de un periodo a otro aspectos que, sin lugar a dudas, complementan el enfoque tradicional del cambio estructural de insumo producto. Por ejemplo, de las matrices insumo producto totales de la economía mexicana de 2003 y 2012, da cuenta de que unos cuantos sectores dominan las compras y ventas de insumos intermedios y determinan la estructura productiva del país, aunque con cambios marginales, fiel al supuesto de coeficientes de insumo producto fijos en el corto plazo. Vemos que la capacidad de intermediación, como la de centralidad de grado y la de centralidad de cercanía se reducen para 2012, llama la atención que desaparecen tres sectores y surgen tres nuevos. Lo interesante es que las medidas de centralidad sí dejan ver los sectores que se mantienen, los que desaparecen y los que surgen, y que configuran y determinan una nueva red de insumo producto de un periodo a otro. Allí radica la importancia de las redes complejas aplicadas al análisis del cambio estructural de insumo producto.

Bibliografía

- Acatitla, E. y J. Urbina. 2017. "El uso de redes complejas en economía: alcances y perspectivas", *Interdisciplina*, vol. 5, núm. 12, mayo-agosto, p. 16.
- Aldana, M. 2006. "Redes complejas", México, <<http://www.fis.unam.mx/~max/English/notasredes.pdf>>. [Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2018.]
- _____. 2011. "Redes complejas: estructura, dinámica y evolución", México, <<http://www.fis.unam.mx/max/MyWebPage/notastwocolumn.pdf>>. [Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2018.]
- Álvarez, M.F. y J.A. Parra. 2013. *Teoría de grafos*, Chillán, Chile, Universidad del Bio-Bio, Facultad de Educación y Humanidades/Escuela de Pedagogía en Educación Matemática.
- Amsden, A.H. 1992. *Asia's Next Giant: South Korea and late industrialization*, Oxford, Oxford University Press.
- Arnold Cathalifaud, M. y F. Osorio. 1998. "Introducción a los conceptos básicos de la Teoría General de Sistemas", *Cinta de Moebio*, núm. 3, p. 1, <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10100306>>. [Fecha de consulta: 25 de enero de 2020.]

- Arthur, W.B. 2013. *Complexity Economics. A Different Framework for Economic Thought*, Oxford, Oxford University Press.
- Bak, P. y Chen K. 1991. "Criticalidad auto-organizada", *Investigación y Ciencia, Scientific American* (ed.), núm. 174, marzo.
- Barletta, F. y Gabriel Yoguel. 2017. "¿De qué hablamos cuando hablamos de cambio estructural?", en M. Abeles, M. Cimoli y Pablo Lavarello, *Manufactura y cambio estructural: aportes para pensar la política industrial en la Argentina*, Santiago, Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), núm. 149.
- Bertalanffy, L. von. 1986. *Teoría general de sistemas*, México, FCE.
- Bezanilla, J.M. 2011. *Sociometría: un método de investigación psicosocial*, México, PEI.
- Bianchi, C. y H. Willebald. 2013. "Desarrollo y cambio estructural: insumos para construir un marco teórico", miembros del Grupo de Cambio Estructural y Especialización Productiva (GCEEP), Montevideo, Uruguay, p. 4.
- Cáceres, V.E. 2014. *Propiedades emergentes en biología*, UNED, <<http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:masterFilosofiaLogica-Ecaceres/Documento.pdf>>.
- Cimoli, M., J.B. Pereima Neto y G. Porcile. 2015. "Cambio estructural y crecimiento", *Serie Desarrollo Productivo*, CEPAL, Santiago de Chile.
- Clark, C. 1940. *The Conditions of Economic Progress*, Nueva York, St. Martin's.
- Cocho, G. 1999. "Sobre la contribución de Prigogine, Haken, Atlan y el Instituto de Santa Fe al estudio de la dinámica de los sistemas complejos", en Santiago Ramírez (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*, México, Siglo XXI.
- Dagnino, D. et al. 2009. "Nucleación de vórtice como un estudio de caso de ruptura de simetría en sistemas cuánticos", *Nature Physics*, núm. 5, pp. 431-437, <<https://doi.org/10.1038/nphys1277>>.
- Fernández Bugna, C. y F. Peirano. 2011. "Cambio estructural. Cinco enfoques estilizados", *Revista de Ciencias Sociales*, 2a época, núm. 19, <<http://www.unq.edu.ar/advf/documentos/5138b6c06a000.pdf>>.
- Fisher, A.G.B. 1935. "Economic Implications of Material Progress", *International Labour Review*, núm. 11, julio, pp. 5-18.
- . 1939. "Primary, Secondary and Tertiary Production", *Economic Record*, junio.
- Freeman, L.C. 1979. "Centrality in Social Networks", *Social Networks*, vol. 1, núm. 1, pp. 215-239.

- _____. 2004. *The Development of Social Network Analysis. A Study in the Sociology of Science*, Vancouver, B.C., Empirical Press.
- Frenken, Koen. 2000. "A Complexity Approach to Innovation Networks. The Case of the Aircraft Industry (1909-1997)", *Research Policy*, vol. 29, núm. 2, pp. 257-272.
- García Miranda, J. 2006. "Introducción a la teoría de grafos", Departamento de álgebra, <<http://www.ugr.es/jesusgm/Curso%20205-2006/matematica%20Discreta/Grafos.pdf>>.
- García Muñiz, Ana Salomé y Carmen Ramos Carvajal. 2003. "Redes sociales como herramienta de análisis estructural *input-output*", *Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, núm. 4, junio-julio, Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona.
- _____. 2006. "Core/Periphery Structure Models: An Alternative methodological Proposal", *Social Networks*, vol. 28, núm. 4, pp. 442-448.
- Gerschenkron, A. 1952. "Economic Backwardness in Historical Perspective", en B. Hoselitz (ed.), *The progress of the Underdeveloped Countries*, Chicago.
- _____. 1962. *Economic Backwardness in Historical Perspective*, Cambridge, Mass., Harvard University Press. Traducido al español: *Atraso económico e industrialización*, Ariel.
- Heijs, Joost y Mikel Buesa. 2016. *Manual de economía de innovación, Teoría del cambio tecnológico y sistemas nacionales de innovación*, t. I. España, Instituto de Análisis Industrial y Financiero.
- Heylighen, F. 2008. *The Science of Self-Organization and Adaptivity*, <<http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/EOLSS-Self-Organiz.pdf>>.
- Hirschman, A. 1958. *The Strategy of Economic Development*, New Haven, Yale University Press. Traducido al español: *La estrategia del desenvolvimiento económico*, México, FCE.
- Holland, J. 1998. "The Global Economy as an Adaptive Process", en *The Economy as an Evolving Complex System. Studies in the Sciences of Complexity*, Boca Raton, FL, Addison-Wesley Publishing.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2003. *Sistema de Cuentas Nacionales de México (SCNM), Matriz Simétrica de Insumo-Producto Total*, México.
- _____. 2012. *Sistema de Cuentas Nacionales de México (SCNM), Matriz Simétrica de Insumo-Producto Total*, México.
- Johnsonbaugh, R. 2005. *Matemáticas discretas*, México, Pearson Educación.

- Kaldor, N. 1966. *Causes of the Slow Rate of Economic Growth in the United Kingdom*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Katz, J. 2007. “Cambio estructural y desarrollo económico”, *Revista de Economía Política*, Buenos Aires, año 1, vol. 1.
- Kindleberger, C.P. 1967. *Europe’s Postwar Growth: The Role of Labor Supply*, Cambridge, Harvard University Press.
- Krüger, J.J. 2008. “Productivity and Structural Change: A Review of the Literature”. *Journal of Economic Surveys*, vol. 22, núm. 2.
- Kuz, A., M. Falco, y R. Giandini. 2016. “Análisis de redes sociales: un caso práctico”, *Computación y Sistemas*, vol. 20, núm. 1, pp. 89-106, doi: 10.13053/CyS-20-1-2321.
- Kuznets, S., 1961. “Economic Growth and the Contribution of Agriculture: Notes on Measurement”, Conference August 19-30, Cuernavaca, Morelos, Mexico from International Asociación of Agricultural Economists, London Oxford University Press.
- Lee, K. 2013. *Schumpeterian Analysis of Economic Catch-up: Knowledge, Path-Creation, and the Middle-Income Trap*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Leite, R. y A. Teixeira. 2011. “Innovation Diffusion with Heterogeneous Networked Agents: A Computational Model”, *Journal of Economic Interaction and Coordination*, Springer-Verlag, núm. 7, pp. 125-144
- Lewis, W.A. 1954. “Economic Development with Unlimited Supplies of Labor”, *The Manchester School*, vol. 22.
- Los, B. y B. Verspagen. 2006. “The Evolution of Productivity Gaps and Specialization Patterns”, *Metroeconomica*, vol. 57, núm. 4.
- Luque, B. 2013. “Números críticos autoorganizados”, en Octavio Miramontes y Karen Volke (eds.), *Fronteras de la física*, México, CopIT-arXives, pp. 3-4.
- Mansilla, R. y R.M. Mendoza. 2015. “De las redes complejas a las epidemias”, *Interdisciplina. Medicina y Complejidad*, vol. 3, núm. 6, mayo-agosto.
- Mariña, Abelardo. 1993. *Insumo-producto: aplicaciones básicas al análisis económico estructural*, México, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco.
- Marsden P. y N. Lind. 1982. *Social Structure and Network Analysis*, Beverly Hills, Sage Publications.
- Metcalfé, S., J. Foster y R. Ramlogan. 2006. “Adaptive Economic Growth”, *Cambridge Journal of Economics*, vol. 30, núm. 1.

- Miramontes, P. 1999. “El estructuralismo dinámico”, en Santiago Ramírez (coord.). *Perspectivas en las teorías de sistemas*, México, Siglo XXI.
- Montobbio, F. y F. Rampa. 2005. “The Impact of Technology and Structural Change on Export Performance in Nine Developing Countries”, *World Development*, vol. 33, núm. 4.
- Moreno, J.L. 1951. *Sociometry, Experimental Method and the Science of Society: An Approach to a New Political Orientation*, Beacon House.
- Morillas Raya, A. 1983. *La teoría de grafos en el análisis Input-Output, La estructura productiva andaluza*, España, Universidad de Málaga.
- _____. 1995. “Aplicación de la teoría de grafos al estudio de los cambios en las relaciones intersectoriales de la economía andaluza en la década de los 80”, en *Tablas input-output y cuentas regionales*, Andalucía, Instituto de Estadística.
- Newman, M., A.L. Barabási y D.J. Watts (eds.). 2006. *The Structure and Dynamics of Networks*, New Jersey, Princeton University Press.
- Nurkse, R. 1953. *Problems of Capital Formation in Underdeveloped Countries*, Oxford, Basil Blackwell. Traducción al español: *Problemas de formación de capital en los países insuficientemente desarrollados*, México, FCE.
- Pasinetti, Luigi. 1981. *Structural Change and Economic Growth. A Theoretical Essay on the Dynamics of the Wealth of Nations*, Cambridge, Cambridge University Press.
- _____. 1993. *Structural Economic Dynamics: A Theory of the Economic Consequences of Human Learning*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Pinto, A. 1970. “Naturaleza e implicancias de la ‘heterogeneidad estructural’ de la América Latina”, *El Trimestre Económico*, vol. 37, núm. 145 (1), enero-marzo.
- Prebisch, R. 1949. *El desarrollo de la América Latina y algunos de sus principales problemas*, Santiago, CEPAL.
- Prigogine, I. 1995. “¿Qué es lo que no sabemos?”, conferencia pronunciada en el Forum Filosófico de la UNESCO en 1995, <<http://www.unesco.org/phiweb/Irpu/nobel/presnobel.html>>. [Fecha de consulta: 28 de septiembre de 2018.]
- Ramírez, S. 1999. “Teoría general de sistemas de Ludwig von Bertalanffy”, en Santiago Ramírez (coord.), *Perspectivas en las teorías de sistemas*, México, Siglo XXI.
- Roitman, M. 1998. *La sociología: del estudio de la realidad social al análisis de sistemas*, México, UNAM, CEIICH.
- Rosenstain-Rodan, Paul. 1943, “Industrialization of Eastern and South Eastern Europe”, *Economic Journal*, vol. 53, núm. 210/211, pp. 202-211.

- Sametband, M.J. 1999. *Entre el orden y el caos. La complejidad*, México, FCE.
- Saviotti, P. y A. Pyka. 2004. “Economic Development by the Creation of New Sectors”, *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 14, núm. 1.
- Saviotti, P. y K. Frenken. 2008. “Export Variety and the Economic Performance of Countries”, *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18, núm. 2.
- Schumpeter, Joseph A. 1942. *Capitalism, Socialism and Democracy*, Nueva York, Harper and Brothers.
- _____. 1983 [1911]. *The Theory of Economic Development: An inquiry into profits, capital, credit, interest and the business cycle*, Transaction Publishers.
- Singer, H. 1950. “The Distribution of Gains Between Investing and Borrowing Countries”, *The American Economic Review*, vol. 40, núm. 2.
- Soete, L. 1987. “The Impact of Technological Innovation on International Trade Patterns: The Evidence Reconsidered”, *Research Policy*, vol. 16, núm. 2-4, agosto.
- Tobar, Q.J. 2019. “Parsons, cambio social y visión sistémica”, <<https://sistemaspoliticos.org/parsons-cambio-social-vision-sistemica/>>.
- Torres Narváez, Karina, Leyla Álvarez Guzmán, Bernard Gutiérrez Vega y José Hernando Ávila-Toscano, 2012. “Análisis de redes sociales en el contexto virtual”, en Hernando Ávila-Toscano, (ed.), *Redes sociales y análisis de redes, Aplicaciones en el contexto comunitario y virtual*, Barranquilla, Colombia, pp. 168-201.
- Thirlwall, A.P. 1979. “The Balance of Payments Constraint as an Explanation of International Growth Rate Differences”, *Banca Nazionale del Lavoro Quarterly Review*, vol. 32, núm. 128.

Glosario

Autoorganización. Este concepto fue recuperado por el ciberneta británico W. Ross Ashby, en 1947. Él notó que un sistema dinámico, independientemente de su tipo o composición, siempre tendía a evolucionar hacia un estado de equilibrio, o lo que podríamos ahora llamar un atractor. La autoorganización es básicamente la creación espontánea de patrones coherentes globalmente provenientes de interacciones entre componentes inicialmente independientes. Este orden colectivo está organizado en función de su propio mantenimiento, y de este modo tiende a resistir perturbaciones. Su robustez se logra con el control distribuido y redundante de modo que cualquier daño pueda

- ser restaurado por las secciones restantes no dañadas. En pocas palabras, quiere decir que el sistema se adapta (Heylighen, 2008: 3-5)
- Centralidad de cercanía.* El grado de cercanía de un vértice en un grafo es una medida de la distancia media respecto a los demás vértices en su componente conexas. Esta medida se calcula como el inverso de la lejanía (*National Geographic*, 2017: 66).
- Centralidad de grado.* Es el número de enlace o conexiones que tiene un nodo con los demás nodos de la red, es decir, el número de vecinos con los que se conecta.
- Centralidad de intermediación.* El grado de intermediación de un vértice cuantifica las veces que este se encuentra en el camino más corto en el grafo entre otros dos vértices (*National Geographic*, 2017: 65).
- Criticalidad autoorganizada.* Este concepto fue concebido originalmente por los físicos, Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfeld (BTW), del Laboratorio Nacional de Broohaven, en un artículo publicado en *Physical Review Letters*, en 1987, y es considerado uno de los mecanismos que generan la complejidad. Los autores postularon que los sistemas grandes, con muchos componentes que interaccionan entre sí, evolucionan a un estado crítico, en el cual un acontecimiento menor puede provocar eventos de distintos tamaños y en algunas ocasiones catastróficos. Este concepto es aplicado en muy diversos campos: geofísica, cosmología, evolución, ecología, economía, gravedad cuántica, sociología, física, neurobiología, etcétera (Bak y Chen, 1991).
- Densidad de una red.* El estadístico densidad de la red representa la proporción de posibles relaciones en la red que están presentes. El valor va de 0 a 1, donde el límite inferior se corresponde con redes sin relaciones y el límite superior representa redes con todas las posibles relaciones. Cuanto más cerca esté el valor a 1, mayor será la densidad de la red y sus nodos estarán más conectados.
- Emergencia.* En 1875, Georg Henry Lewes utilizó por primera vez el concepto de emergencia en su obra *Problems of Life and Mind* para referirse a este tipo de propiedades. John Stuart Mill, profesor de Lewes, aludía a la existencia de cualidades que no podían derivarse simplemente de su composición, sino que aparecían como algo novedoso. Mill hablaba en el contexto de modos mecánicos y químicos donde los primeros se comportan de forma homopática, es decir, el efecto total resulta como una mera suma de sus componentes, mientras que el segundo lo hace de forma heteropática, apareciendo propiedades no presentes en sus componentes. George Henry Lewes, utilizó el térmi-

no “emergente” para referirse, precisamente, a los efectos heteropáticos. Esta novedad cualitativa fue la que posteriormente fue desarrollada ya con el nombre de propiedades emergentes en el siglo XX por autores como Charlie Dunbar Broad, Samuel Alexander y C. Lloyd Morgan, quienes pertenecían a la corriente de los emergentistas británicos (Cáceres, 2014: 21).

Medidas de centralidad. El sociólogo estadounidense Linton Freeman estableció las bases de las medidas de centralidad a partir de tres conceptos básicos: centralidad de grado, centralidad de cercanía y centralidad de intermediación, no siendo las únicas. Estos conceptos fueron propuestos por Freeman para redes no ponderadas (Freeman, 1979: 215-239), hoy día son utilizadas también para redes ponderadas. La centralidad es un atributo estructural, un valor asignado que depende únicamente de la posición del nodo en la red, no del propio nodo.

Redes complejas. Las redes complejas son conjuntos de muchos nodos conectados que interactúan de alguna forma. A los nodos de una red también se les llama vértices o elementos y los representaremos por los símbolos v_1, v_2, \dots, v_N , donde N es el número total de nodos en la red. Si un nodo v_i está conectado con otro nodo v_j , esta conexión se representa por una pareja ordenada (v_i, v_j) (Aldana, 2011: 1-2).

Ruptura de simetría. La ruptura de simetría ha llegado a ser tan importante en la ciencia moderna como la simetría misma. En 1894, Pierre Curie resaltó la importancia de la simetría con el llamado “principio de simetría” que lleva su nombre. Este principio afirma que un efecto no puede ser menos simétrico que su causa o, dicho de otra manera, un efecto no puede tener una falta de simetría que no esté en su causa eficiente. La ruptura de simetría puede observarse en cualquier sistema donde el estado de mínima energía esté degenerado, comenta Daniel Dagnino, “Los fenómenos que los provocan pueden ser diversos. Cuando se dan en sistemas degenerados, son rupturas espontáneas de simetría. En otros casos, la ruptura es el resultado de pequeñas perturbaciones del sistema” (Dagnino y Barberán, 2009).

Sistemas complejos. Max Aldana comenta que los sistemas complejos no pueden definirse con un simple enunciado. Por lo que considera que es mejor enumerar las características más importantes y que le son comunes:

1. Están compuestos de muchas partes que interactúan entre sí.
2. Cada parte tiene su propia estructura interna y realiza una función específica.

3. Lo que ocurra a una parte del sistema afecta de manera altamente no lineal a todo el sistema.

4. Presentan comportamientos emergentes, de tal manera que el todo no es la simple suma de sus partes.

Entonces un sistema complejo es aquel que posee las características arriba mencionadas.

Sociometría. Este concepto surgió a inicios del siglo XX en Norteamérica, a partir del trabajo *Fundamentos de la sociometría*, desarrollado y promovido por el psicoterapeuta rumano, nacionalizado estadounidense, Jacob Levy Moreno, discípulo de Freud. Esta nueva conceptualización dio pie a los métodos que harían de la sociometría una técnica con capacidad para estudiar, diagnosticar y predecir dinámicas de interacción grupal y social, en grupos de pocos miembros, como en contextos sociales de más complejidad y tamaño. Esta disciplina ha permitido visualizar niveles de interacción social entre miembros de distintos grupos educativos, económicos, políticos, sociológicos, por mencionar algunos (Bezanilla, 2011).

Teoría General de Sistemas (TGS). Este concepto fue utilizado por primera vez por el biólogo Ludwig von Bertalanffy, en 1969, en su obra *Teoría general de sistemas*. El autor buscaba que esta teoría fuese un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales, como un medio para crear teorías y formulaciones conceptuales que pudieran ser aplicables. (Arnold y Osorio, 1998). Para Bertalanffy, un sistema puede ser definido como un complejo de elementos interactuantes y puede distinguirse de tres maneras, por su número, su especie o sus relaciones. Un complejo según sus relaciones posee características constitutivas —en oposición a las características sumativas que se obtienen independientemente de la pertenencia al complejo— dependientes del modo en que el elemento establece relaciones dentro del complejo (Ramírez, 1999: 15-16).