

(Arte)
Estampa Digital

Título
Arquitectura 10 P.M.

Autor:

Luis Fernando Luna

Técnica:

Impresión Digital Giclée sobre papel de Algodón 255 gr.

Medida: 40 X 40 cm (Estampa 30 X 30 cm)

Edición de 25 ejemplares

SISTEMAS COMPLEJOS Y MODELOS MULTIAGENTES: HERRAMIENTAS PARA EL ESTUDIO DE LAS DINÁMICAS ECONÓMICAS URBANAS

COMPLEX SYSTEMS AND MULTI-AGENT BASED MODELS: TOOLS FOR
STUDYING THE DYNAMICS OF URBAN ECONOMIC

Diego Silva Ardila ¹

Resumen

En los últimos años, se ha generado un interesante debate académico sobre las posibilidades que los sistemas complejos y los modelos multiagentes brindan al estudio de los procesos sociales y las dinámicas económicas. El artículo hace una presentación de este nuevo marco teórico y de algunas de sus herramientas metodológicas a través de la discusión de dos investigaciones preliminares: la primera, explora la existencia de redes en el sistema urbano latinoamericano y la otra, referida al estudio de los mercados de suelo en las periferias urbanas, que enfatiza sobre la incidencia de la informalidad en la ocupación del suelo y la distribución espacial de los precios. Las posibilidades de extensión a modelos y aplicaciones futuras de esta nueva perspectiva se discuten al final del documento y se invita al uso de este tipo de herramientas por parte de los analistas económicos contemporáneos.

Palabras clave:

Sistemas complejos, modelos multiagentes, redes, informalidad, mercados de suelo urbano

Abstract

In recent years, there has been an interesting academic debate about possibilities that complex systems and multi-agent based models provide to study social processes and economic dynamics. The article presents this new theoretical framework and some of its methodological tools through the discussion of two preliminary research: the first explores the existence of networks in the Latin American urban system and the other one refers to a market research of the land at urban peripheries, which emphasizes on the incidence of informality in land use and spatial distribution of prices. The possibility of extending to models and future applications by using this new approach is discussed at the end of the document and it also invites contemporary economic analysts to use such kind of tools.

Keywords:

Complex systems, multi-agent based models, networks, informality, urban land markets.

1 Economista e Historiador de la Universidad de los Andes con maestría en Economía de la Universidad de los Andes y Maestría en Análisis de Problemas Políticos, Económicos e Internacionales Contemporáneos de la Universidad Externado de Colombia. Candidato a Doctor en Urban Planning and Policy de la Universidad de Illinois en Chicago. Profesor e investigador de la Escuela de Economía y Administración de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. dsilva@uis.edu.co

Introducción

El estudio de los procesos sociales y, en particular de las dinámicas económicas, se ha caracterizado por las generalizaciones resultantes de simplificaciones y abstracciones. Dichas generalizaciones permiten analizar las posibles relaciones que pueden existir entre lo micro y lo macro, en otras palabras entre las acciones de individuos y los agregados colectivos presentes en las relaciones sociales, pero no constituyen una herramienta adecuada para la consideración de la variable espacial. Adicionalmente, la ausencia de esta variable en un gran número de estudios y análisis, es un rasgo común de los métodos tradicionales de la economía neoclásica, a pesar de algunos esfuerzos recientes por incorporarla. Este documento pretende presentar el estudio de sistemas complejos y el uso de modelos multiagentes como nuevas perspectivas teóricas y metodológicas para abordar la construcción de modelos que incluyan la variable espacial y, al mismo tiempo, permitan reducir los problemas de las generalizaciones del análisis neoclásico tradicional.

La observación de sistemas urbanos ha permitido el estudio de la complejidad existente en las relaciones sociales. A diferencia de las abstracciones generales, donde se supone que todos los individuos maximizan el mismo tipo de funciones de utilidad o que el riesgo percibido afecta de manera homogénea a una población, la complejidad implica partir de supuestos donde todos los actores poseen diferentes atributos y, por ende, diferentes preferencias, reacciones y decisiones al enfrentarse a estímulos iguales o similares. En este orden de ideas, se hace necesario partir de nuevos postulados teóricos que den soporte a herramientas metodológicas renovadas para la observación y el análisis de las dinámicas económicas presentes en sistemas complejos. El estudio de sistemas complejos se ha convertido en estrategia analítica de disciplinas tradicionales tan diversas como la biología o la química, así como de algunas relativamente novedosas, como el estudio de redes o de comportamiento. Los fenómenos observados por la economía no son ajenos a estas nuevas perspectivas, lo cual ha motivado la realización de esfuerzos encaminados a la adopción de teorías y metodologías que respondan a los nuevos interrogantes que surgen al asumir el estudio urbano de los fenómenos económicos.

El documento parte de una descripción general del estudio de sistemas complejos y discute la capacidad de los modelos multiagentes para incorporar la complejidad al trabajo científico. Posteriormente, se presentan dos trabajos que incorporan la visión de los sistemas complejos y modelos multiagentes para observar relaciones económicas en la escala urbana. El primero derivado de la tesis presentada para la maestría en Análisis de Problemas Políticos, Económicos e Internacionales Contemporáneos de la Universidad Externado de Colombia y posteriormente presentado en algunas

conferencias internacionales², está enfocado a la observación de redes urbanas y sus cambios en tamaño de acuerdo al crecimiento natural de la población incluido, a su vez, el impacto de la conexión a estas redes en los procesos de concentración y jerarquización de ciudades inmersas en sistemas de ciudades. El segundo es el resultado de más de dos años de investigación con un grupo en la Universidad de Illinois, *Stanford University* y el Colegio de San Luis Potosí en México también presentado en algunas conferencias internacionales³ y a la espera de publicación, el caso estudia las dinámicas de ocupación de suelos periféricos urbanos, para explorar las dinámicas informales de ocupación y uso de suelo. Una vez presentados los casos, se discuten los potenciales usos de las herramientas teóricas y metodológicas del estudio de sistemas complejos, mediante el análisis de las fortalezas y debilidades que dichos modelos tienen a la hora de observar los procesos sociales y las dinámicas económicas que interesan a los investigadores en economía y, particularmente, en economía urbana.

Sistemas complejos y modelos multiagentes

A diferencia de los sistemas simples que cuentan con pocos componentes siguiendo reglas relativamente sencillas y fáciles de comprender, los sistemas complejos - como puede ser un ecosistema o una ciudad - cuentan con numerosos elementos que interactúan mediante reglas difíciles de observar, o incluso inexistentes (en las situaciones en las que opera la aleatoriedad). Por otro lado, existen también sistemas denominados complicados, que funcionan con un gran número de componentes pero cuya operación es claramente observable y definible, como puede ser una locomotora o un computador. Estos últimos sistemas requieren que todos los elementos actúen de acuerdo a las particularidades de su diseño y funcionalidad, ya que ante el fallo o ausencia de uno de ellos, el sistema como tal deja de operar. Así, los sistemas complejos difieren de los complicados en la medida en que los resultados no son predecibles y los cambios en los componentes o en sus relaciones no determinan el colapso u obstrucción del sistema, sino que afectan los resultados, modificando los escenarios posibles o los resultados esperados. Amaral y Ottino (2004, p 148) afirman que un “sistema complejo es un sistema compuesto por un gran número de elementos capaces de interactuar entre ellos y con el entorno” que, adicionalmente,

2 ACSP Annual Conference Minneapolis, Minnesota, October 10 de 2010. *The Latin-American Urban Network: Complexity and agent based modeling*. Y EUR, European Urban Research Association Conference 2010 Darmstadt, September 25 de 2010. *Spatial reconfiguration in Latin-America: From Nation-states based strategies to Urban Networks dynamics*

3 GLP, Global Land Project 2010 Open Science Meeting Tempe, Arizona October 17 de 2010. *Informal Land Markets in Urban Peripheries in Latin America*; ICA-ISPRS Joint Workshops on Geospatial Analysis and Modeling Simon Fraser University. *Complex World: Representation, Analysis and Modeling* Vancouver, Canadá, August 11 de 2011. *Land Market Dynamics in Latin American Urban Peripheries*; y UAA Annual Conference Pittsburgh, April 20 de 2012. *Urban Land Markets and Informality in Latin American Urban Peripheries: An Agent Based Model Approach*

presenta una organización sin la existencia de un principio organizador externo. En este sentido, consideran los autores precitados, que tanto el mercado de capitales, una colonia de termitas, el cerebro humano y las ciudades son sistemas complejos que responden a condiciones externas y presentan la adaptabilidad como uno de sus principales atributos.

El elemento articulador de las relaciones que se proponen en la esfera teórica del análisis de sistemas complejos es la descentralización del accionar de los agentes. En este sentido, los agentes toman decisiones a partir de sus propios atributos y características, interactúan con otros agentes y con el entorno, ajustan o adaptan su comportamiento y generan resultados agregados que no responden a una organización central ni están determinados por las herramientas metodológicas utilizadas (Axtell et al., 2002; Batty, 1997; Batty, 2008; Clifton, Ewing, Knaap, & Song, 2008; Coelho & Ruth, 2006 Wu, 2007). En estos sistemas donde la complejidad emerge a partir de la descentralización, muchas veces se hace difícil pronosticar o predecir los resultados, dada la diversidad existente entre los agentes y las condiciones del entorno que hace importante el estudio de variables temporales y espaciales ya que éstas son determinantes también de los resultados observados. Efectos de vecindad, aglomeración o distancia afectan los resultados generales y, a su vez, influyen en los procesos de adaptabilidad que los agentes asumen, convirtiéndose en factores relevantes para el estudio de este tipo de sistemas. Así, como afirma Zellner (2012) el estudio de sistemas complejos debe enfocarse en la investigación sobre las propiedades colectivas, los comportamientos individuales y los procesos locales que conducen a ellas.

En los esfuerzos de modelaje tradicional en economía (McDonald, 1989) se parte, igualmente, de la observación de individuos y su comportamiento, pero con el fin de considerar condiciones y restricciones matemáticas, se utiliza la generalización de un agente representativo. En estos casos, las herramientas computacionales son usadas para resolver los sistemas de ecuaciones que resultan del modelo analítico, pero no se incluye el potencial computacional como parte del modelaje mismo o como herramienta para construir el modelo. En el caso de modelos multiagentes los atributos y los comportamientos de los agentes se abstraen para lograr simplificar al agente sin pretensiones de generalización. Estos agentes son simplificados para mantener sus principales características (individuo, célula y fábrica, entre otros) sin intentar ajustar dichas características a futuras soluciones matemáticas del sistema de ecuaciones. En este orden de ideas, Miller y Page (2007) afirman que la forma como se da “solución” a los modelos multiagentes consiste en dejar interactuar a los agentes a través de la computación y dejar que ésta se convierta en parte de la misma teoría y del modelaje, más que en una simple herramienta de solución. Mientras existen modelos que pretenden la solución total del sistema, como muchos formulados desde la visión tradicional de la economía, en los modelos multiagentes los esfuerzos van encaminados a observar las dinámicas resultantes o a analizar las relaciones de dependencia que hay entre los parámetros y supuestos con los

resultados. Es decir, que a pesar de proponer sistemas de ecuaciones, es posible que no se puedan solucionar totalmente.

La red urbana latinoamericana como un sistema complejo

Los arreglos espaciales y las dinámicas de intercambio existentes en el mundo contemporáneo de reconfiguración y re-territorialización, pueden considerarse fácilmente como sistemas complejos donde interactúan un gran número de agentes (Estados-nacionales, organismos transnacionales, corporaciones, ciudades o individuos, entre muchos más) de acuerdo a atributos particulares, que desembocan en resultados agregados difíciles de observar con herramientas tradicionales de generalización y que, por el contrario, responden a procesos descentralizados que se adaptan a través de diferentes escalas y generan el llamado “orden internacional”. Sin responder a una autoridad central, el sistema mundial de ciudades (Taylor, 1998) es resultado de un proceso de larga duración (similar al planteado por Braudel para explicar la consolidación del capitalismo) donde las relaciones de complejidad son determinadas por procesos históricos de interacción entre agentes y de las restricciones geográficas sobre las cuales dichas interacciones operan.

La teoría de redes es una herramienta teórica y metodológica relevante para estudiar los sistemas complejos, aplicable al estudio contemporáneo del sistema mundial urbano, particularmente a sus arreglos y dinámicas (Michael Batty, 2008; Coelho & Ruth, 2006; Gastner & Newman, 2006). En esta línea, las redes se definen como un sistema de *nodos* que presentan conexiones sobre las cuales es posible la transferencia de un punto a otro (Ottino y Amaral, 2004). Este sistema complejo se caracteriza por la ausencia de control centralizado y por la tendencia auto-organizadora de las partes, de acuerdo a las acciones individuales y a las relaciones espaciales de vecindad e interacción con las condiciones del entorno.

A continuación se presentan algunos de los elementos teóricos y metodológicos utilizados para la construcción de un modelo analítico del sistema de redes urbanas en América Latina a partir del uso de modelos multiagentes. Se parte del supuesto que los flujos de intercambio, entendidos como relaciones entre las ciudades, pueden ser observadas a partir de modelos donde las ciudades se asumen como nodos articuladores de las relaciones de intercambio (de mercancías, capitales o población entre otras) y que el flujo de dichos intercambios responde a la cantidad y calidad de conexiones (vías, puertos, aeropuertos o redes de infraestructura) existentes entre nodos. Así, los elementos constitutivos del modelo son: (1) las ciudades como nodos, (2) las conexiones, (3) la jerarquía que responde a la topología de la red y las (4) restricciones de tipo político o social que afectan el flujo como son las fronteras nacionales o características geográficas. El reto de este estudio consistió en representar de manera sencilla la complejidad existente en la interacción entre ciudades, con el fin de observar procesos de concentración de población, riqueza o actividades económicas, de acuerdo a las condiciones de la topología de la red.

Adicionalmente, se intentó establecer los potenciales efectos que se pueden presentar ante la ausencia o presencia de condiciones que faciliten o dificulten el intercambio.

El modelo utiliza las **aglomeraciones urbanas** como la unidad central de análisis, las cuales concentran población y actividades económicas que determinan la capacidad de intercambio en la red. Las ciudades son los puntos de salida y llegada y, en consecuencia, los agentes encargados de permitir y facilitar las dinámicas de intercambio de personas, mercancías y capital. En términos de la perspectiva de sistemas complejos y, en particular, de la teoría de redes, las ciudades son nodos, con una ubicación particular y exclusiva, que aglutinan valores para las diferentes variables que se incluyen en el modelo. Se utiliza el tamaño del nodo para representar la cantidad acumulada de una variable y colores para representar la posición relativa del nodo en la organización jerárquica de la red.

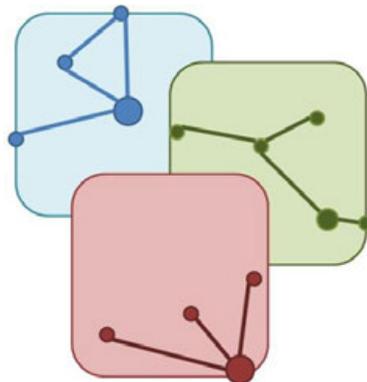
Las ciudades están conectadas en el modelo por líneas que representan los diferentes canales de intercambio posibles entre una ciudad y otra. Dichas **conexiones** significan canales como carreteras, autopistas o vías férreas, sobre las cuales se desplazan los elementos móviles de la red. Las conexiones marítimas y aéreas no se representan físicamente en la red, pero su existencia aparece en el modelo y fortalecen la calidad y cantidad de intercambios entre una ciudad y otra. En este sentido, las líneas que representan las conexiones no son exclusivamente representaciones de los canales físicos de intercambio sino de la conexión existente entre un nodo y otro, que incluye todo tipo de mecanismos de intercambio entre los dos; en otras palabras, las conexiones representan los canales a través de los cuales se da difusión en la red.

La **jerarquía urbana** se utiliza en el modelo como mecanismo para observar los diferentes roles que juegan las ciudades en la red. Las ciudades pueden ser centros de poder político o de actividades económicas y comerciales particulares (capitales políticas, ciudades industriales o refinerías petroleras). La jerarquía es resultado de las condiciones históricas y geográficas del sistema y, a su vez, condiciona el desempeño de la misma, ya que determina las posibilidades de intercambio. Cada red puede tener características particulares que van desde redes con alto nivel jerárquico (macrocefalia centrada en una gran ciudad y muchas ciudades satélites) o con bajo nivel jerárquico, como es el caso de un conjunto relativamente homogéneo de ciudades. El concepto de jerarquía urbana dentro de una red ha sido discutido en detalle por Taylor (1997) y refleja la complejidad de su estudio; para el alcance de este trabajo se utiliza la categorización jerárquica exclusivamente por grupos de tamaño poblacional y su tamaño relativo al conjunto de ciudades pertenecientes a la red. Otros estudios similares han realizado esfuerzos para el estudio y observación de las redes urbanas (Beaverstock, Smith, Taylor, Walker, & Lorimer, 2000; Beckmann, 1958; Kogut, 2001; Sassen, 2002; P J Taylor, Catalano, & Walker, 2002; Peter J Taylor, 1997).

Finalmente, se incluye en los modelos parámetros que afectan la composición y el comportamiento de la red. **Restricciones** como regulaciones gubernamentales, relaciones internacionales y acuerdos comerciales, entre otros, que limitan o fortalecen las posibilidades de intercambio que pueden aparecer en el sistema urbano. Las fronteras nacionales se encargan de encapsular o aislar a una economía de manera que funcione como una única red autónoma o permiten que se conecte con otras redes y se expanda la posibilidad de interconexiones presentes en un sistema. Las restricciones se convierten así en un elemento central del modelaje de los sistemas complejos urbanos. Adicionalmente, las dotaciones iniciales de cada ciudad (resultado de procesos históricos) como pueden ser la población, los recursos y la infraestructura determinan las posibilidades de conexión y, consecuentemente, la dinámica de la red.

Una vez los elementos integrales del modelo se han presentado, es posible comprender que el sistema complejo existente en el sistema de ciudades puede representarse por una frontera claramente delimitada (que define los espacios nacionales) donde las ciudades aparecen como nodos interconectados y las dotaciones iniciales están incluidas en cada uno de los nodos como lo muestra la *Figura 1*. Tanto las ciudades como las conexiones, pueden utilizar su atributo de tamaño para representar sus valores cuantitativos o cualitativos (como veremos más adelante, esta información se mantiene y actualiza para cada elemento del modelo gracias a las herramientas computacionales existentes). Este primer paso hace evidente la reducción del sistema complejo observado a un sistema más simple que mantiene los principales atributos y que no está restringido por las necesidades metodológicas–matemáticas, sino que permite la interacción para observar comportamientos agregados, resultado de las dinámicas de adaptabilidad y del accionar descentralizado de cada agente.

Figura 1. Esquema del modelo



Fuente: Elaboración propia

Para construir las simulaciones se utilizó el programa NetLogo 4.0.4 desarrollado por Uri Wilensky en el *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* de *Northwestern University*⁴. El programa, inspirado en la herramienta de dibujo de los años ochenta permite crear escenarios donde se crean “tortugas” (Logo, la aplicación mencionada utilizaba una tortuga a la cual se le daban indicaciones para moverse en una pantalla y de, esa forma, elaborar dibujos) con características propias de forma, color y ubicación. Adicionalmente, cada una posee atributos individuales que se almacenan en una base de datos individuales, y que sirve para la inclusión de los mecanismos de decisiones por agente. El programa también permite darle características al entorno, éste dividido en celdas que poseen, igualmente, atributos que son utilizados para la toma de decisiones o para influir en la toma de decisiones de los agentes. Una vez la interacción toma lugar, se pueden monitorear las variables y atributos de cada agente así como las variables globales y los resultados agregados que se dan a partir de la interacción.

El primer paso consiste en crear ciudades distribuidas de manera aleatoria (distribución que se almacena para poder estudiar diferentes contextos para la misma distribución) y asignarle una población inicial a cada una de ellas. A continuación se establecen, de manera también aleatoria, las conexiones existentes entre ciudades según criterios diferentes, de acuerdo al diseño de los experimentos deseados. El escenario requiere una medición inicial donde las variables de (1) población, (2) conectividad y (3) aglomeración se almacenan para cada ciudad e, igualmente, se miden variables globales de distancia entre la red, clústers y total de conexiones.

El proceso de difusión de las variables inicia con la dinámica particular de cada ciudad. De acuerdo a la cantidad de población e indicadores de desempeño de cada ciudad, se determina la cantidad de población que sale de la ciudad hacia otras ciudades, así como la cantidad de población requerida o demandada por ella. Una vez se determina la cantidad de población que sale y entra de una ciudad, la variable fluye de una ciudad a otra de acuerdo a parámetros para cada escenario observado (a veces la variable sólo fluye en la vecindad mientras que en otros casos penetra toda la red). Al finalizar la dinámica de flujo, se calculan los nuevos indicadores para cada ciudad y se reorganizan las variables globales y las categorías de tamaño, jerarquía y concentración.

El estudio al que se hace referencia aquí, como se mencionó anteriormente ha sido presentado en conferencias internacionales⁵. Para dicho trabajo, se construyeron cinco escenarios analíticos cada uno con características iniciales particulares que

4 NetLogo (1999). <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.

5 ACSP Annual Conference Minneapolis, Minnesota, October 10 de 2010. *The Latin-American Urban Network: Complexity and agent based modeling*. Y EUR, European Urban Research Association Conference 2010 Darmstadt, September 25 de 2010. *Spatial reconfiguration in Latin-America: From Nation-states based strategies to Urban Networks dynamics*

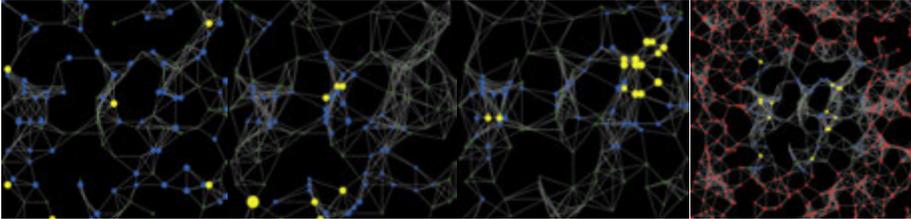
permitían observar diferentes dinámicas y comportamientos de la red, los nodos y las variables globales de jerarquía y concentración. Los primeros dos escenarios observan el comportamiento de la red cuando la población se distribuye de maneras diferentes: (1) población uniformemente distribuida, donde todas las ciudades tienen más o menos la misma población, y (2) población sesgada, donde existen ciudades con mayor población que otras. En el primer caso, la población tiende a concentrarse a pesar de la distribución inicial uniforme y la explicación de donde se aglomera dicha población está dada por la composición de la red y su topología. Así, en aquellas ciudades ubicadas en posiciones relativamente importantes para el flujo de la red, los procesos de aglomeración llevan a crecimiento urbano. El segundo caso parte de parámetros iniciales donde ya existe una jerarquía definida entre ciudades con población diferente, y en el que, al fluir la población en la red, las condiciones iniciales no se mantienen estables sino que se fortalecen o debilitan, de acuerdo a la ubicación de la ciudad en la topología de la red.

El segundo grupo de modelos trata de analizar la forma en que cambian las variables de concentración si las conexiones no están fijas sino, por el contrario, responden a la configuración resultante en la red. En este caso, los escenarios observados son: (1) conexiones con vecindad donde las variables sólo fluyen entre ciudades con radios de cercanía determinada y, (2) conexiones con toda la red y con variación de acuerdo al tamaño de la ciudad, en los que la población puede moverse a cualquier nodo de la red (motivado por atributos de atracción) y, adicionalmente, el número de conexiones que tiene una ciudad depende de su tamaño. En estos escenarios se observan los procesos mediante los cuales se crean concentraciones locales que, en el sistema de ciudades, son centros urbanos regionales y aquellos que promueven que, las ciudades con gran población, sean capaces de establecer conexiones con una mayor cantidad de homólogas, sin que estas interacciones se traduzcan necesariamente en mejor desempeño, ya que constantemente cambia la topología de la red y la ubica en una diferente posición relativa.

Finalmente, en el estudio se incluyó la variable territorial del Estado- nación que crea redes que rodean al sistema urbano y donde las conexiones se activan en puntos específicos que cambian la topología de la red. En este último tipo de experimentos es muy importante ver cómo el sistema urbano se ve afectado de manera heterogénea al vincularse a otras redes externas, ya que la jerarquía y topología de la red cambia y nuevas ciudades se convierten en nodos relevantes en la red mientras otros pierden su poder relativo, pues alteran considerablemente las dinámicas urbanas. Este resultado es muy importante en la medida en que, a pesar de los criterios políticos territoriales de soberanía y unidad de la nación, la misma configuración espacial de los procesos lleva a que las ciudades reaccionen de manera diferente a un mismo incentivo, desvirtuando las posibilidades de generalizar los beneficios o costos de una acción de este tipo. La Figura 2 muestra los resultados para algunos de los escenarios contemplados en el estudio: de izquierda a derecha, distribución uniforme de la

población, conexión local de redes de vecindad, movilidad extendida con creación de conexiones por tamaño y vinculación de red nacional a redes internacionales.

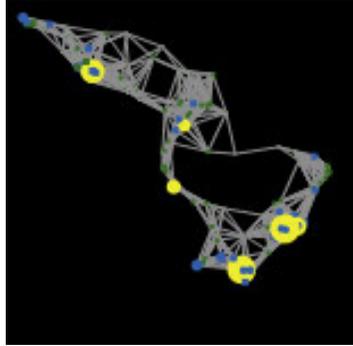
Figura 2: Resultados de los escenarios analizados con el modelo de redes urbanas



Fuente: Elaboración propia

Los modelos de redes urbanas que se presentan aquí son un ejemplo de la inclusión de la complejidad a la observación del comportamiento del sistema de ciudades. Como se planteó al inicio del documento, para utilizar esta perspectiva se requiere redefinir desde el plano teórico las formas de simplificación para poder tener elementos de modelaje y, posteriormente, establecer las interacciones existentes entre los elementos del modelo, con el fin de observar procesos de adaptabilidad y medir los resultados que no operan a través de decisiones centralizadas ni están delimitados por condicionalidades propias del modelo. En este caso, se comprueba que los sistemas complejos se convierten en una herramienta que facilita la observación de cambios en los agregados, a partir de micro-comportamientos. Los modelos que se obtuvieron en la primera fase del modelaje no utilizaron información real de la ubicación o de la población de las ciudades incluidas, eran en este sentido modelos “de laboratorio” utilizados para hacer pruebas al modelo teórico general. Sin embargo, el objetivo es estudiar el caso latinoamericano y, por lo tanto, la utilización de información georreferenciada y atributos de población reales permite observar el comportamiento del caso a la luz del modelo teórico. Así, la inclusión y uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite que la aleatoriedad en la ubicación de los nodos desaparezca y se estudien la configuración topológica del caso geográfico seleccionado, en este caso América Latina, así como los atributos demográficos del estudio de caso.

Figura 3: Modelo de red urbana dejarlo como está la topología de la red urbana latinoamericana



La *Figura 3* muestra el modelo multiagente desarrollado para los experimentos iniciales, mediante la configuración y la topología de la red urbana latinoamericana. Para este caso se pueden observar los cambios en los tamaños individuales de las ciudades pero, al mismo tiempo, analizar los centros de concentración de los nodos urbanos, de acuerdo a las condiciones de topología de la red. El modelo permite ver cómo las concentraciones responden, tanto a la población como a las conexiones existentes, y su comportamiento es similar al observado para el caso regional pero, adicionalmente, es posible detectar que algunos elementos responden a otras dinámicas no incluidas en este análisis. Por ejemplo, Santiago de Chile que ha mostrado un rol importante y creciente en los últimos años no aparece como un nodo importante en el modelo con el caso latinoamericano; esto se debe a la falta de inclusión de los vínculos de red con otras redes (Asia y Norteamérica) que en el caso de Santiago son explicativos de su desempeño contemporáneo. La expansión de la red latinoamericana a otras redes hará posible observar otras dinámicas que se salen del alcance de este estudio.

Para finalizar, es importante resaltar que este tipo de modelos que parte de la complejidad y asume al objeto de estudio desde la perspectiva teórica de los sistemas complejos, permite construir marcos de referencia para estudiar procesos a escalas geográficas amplias, incluida información geográfica específica. En este sentido, los modelos -tanto en lo teórico como en lo metodológico- no se convierten en determinantes mismos de los resultados, sino que permiten observar comportamientos a partir de supuestos de cambios en las decisiones descentralizadas de los agentes. Al final, ilustran sobre el comportamiento general al acercar el estudio no sólo a mejores respuestas sino a mejores preguntas, a partir del proceso de comprender las razones e impactos de los cambios en los mecanismos de interacción presentes en sistemas sociales complejos.

El mercado de suelo urbano y los procesos de informalidad en América Latina

Cambiando de escala, a continuación se presenta el marco general para la construcción de modelos de uso y ocupación del suelo en las periferias urbanas de América Latina. Este esfuerzo de investigación tiene más de dos años y es liderado por un grupo de académicos de la Universidad Industrial de Santander, la Universidad de Illinois en Chicago, el Colegio de San Luis Potosí en México y *Stanford University* en California⁶, con el objetivo de observar las dinámicas urbanas mediante modelos multiagentes y el referente teórico de los sistemas complejos, para comprender los procesos de crecimiento y uso del suelo periférico urbano en escenarios con distribución heterogénea de ingresos y con la presencia de procesos de informalidad. El trabajo ha sido presentado en varias conferencias internacionales⁷ y está en estos momentos en proceso de revisión para ser publicado en una edición especial de una revista internacional en el tema de sociedades artificiales.

El estudio de ocupación del suelo periférico en América Latina pretende analizar las principales características y dinámicas de la transformación de suelos rurales en suelos urbanos ante la gran expansión de las ciudades en la región. El crecimiento de la población ha llevado al aumento en la densificación de las ciudades y, al mismo tiempo, a la ocupación de tierras periféricas, fenómenos que son resultado -y a su vez, causa- de los aumentos de precio en los mercados de suelo, así como de las dinámicas de migración hacia las ciudades. Por un lado, se puede afirmar que el aumento del precio en los núcleos urbanos presiona para que las ciudades se densifiquen y, paralelamente, los procesos de ocupación de tierras periféricas (especialmente al cambiar el uso de los suelos) llevan a aumentos de los precios en los lugares donde la dinámica de urbanización tiene lugar, ya sea por fenómenos especulativos o simple ocupación informal de tierras. A diferencia de los procesos de suburbanización a gran escala como el caso de Estados Unidos, Canadá y Australia, las periferias latinoamericanas se transforman a causa de una mezcla de procesos urbanos donde juegan un papel importante las mejoras en las vías de comunicación y las preferencias de la población de ingresos altos y medios (que se asemejan a los vividos en países desarrollados) que interactúan con la configuración de mercados de tierra para grupos de población de ingresos moderados, que generan mercados de

6 Diego Silva Ardila. Profesor Escuela de Economía y Administración. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia dsilva@uis.edu.co; Moira Zellner. College of Urban Planning and Policy, University of Illinois at Chicago, mzellner@uic.edu; Antonio Aguilera. El Colegio de San Luis, San Luis Potosí, México, aaguilerasl@gmail.com; y Luis E. Fernández. Carnegie Institution, Stanford, luisf@stanford.edu

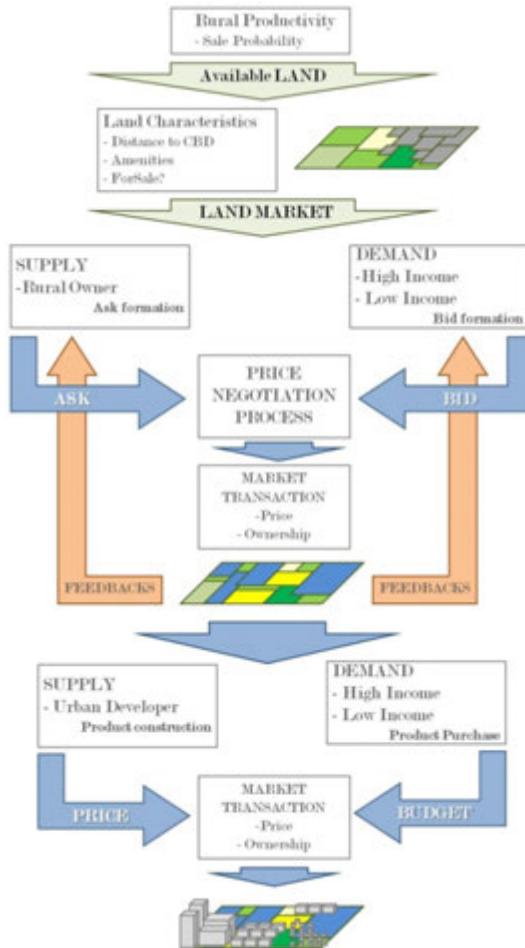
7 GLP, Global Land Project 2010 Open Science Meeting Tempe, Arizona October 17 de 2010. *Informal Land Markets in Urban Peripheries in Latin America*; ICA-ISPRS Joint Workshops on Geospatial Analysis and Modeling Simon Fraser University. Complex World: Representation, Analysis and Modeling Vancouver, Canada, August 11 de 2011. *Land Market Dynamics in Latin American Urban Peripheries*; y UAA Annual Conference Pittsburgh, April 20 de 2012. *Urban Land Markets and Informality in Latin American Urban Peripheries: An Agent Based Model Approach*

suelo segregados, en los que se utilizan mecanismos externos para acceder al bien urbano primario –el suelo– a través de la informalidad o la ocupación física (M Batty, 1997; R Ewing, 1997; Reid Ewing & Pendall, n.d.; Marshall, 2007).

Las periferias se han convertido en áreas relevantes para el análisis de procesos sociales y dinámicas económicas, particularmente de expansión y transformación urbana. La periferia se convierte en el espacio donde la esfera rural (normalmente de actividad agropecuaria o economías de subsistencia) se transforma para ubicar usos urbanos y en ella interviene un gran número de agentes, que busca satisfacer sus necesidades a partir de ciertas condiciones espaciales y, a la vez, de sus restricciones económicas. Así, los procesos presentes en dichos espacios se pueden analizar a la luz de las teorías de sistemas complejos y al mismo tiempo, utilizar modelos multiagentes para explorar los niveles agregados a partir del comportamiento micro de los agentes. Aún más, el caso latinoamericano presenta dos factores que hacen del estudio de las periferias urbanas aún más propicio para la inclusión de perspectivas de complejidad, (1) la gran brecha existente entre los ingresos altos y bajos hace que la competencia por acceso a la tierra se caracterice por relaciones intrincadas de poder y, adicionalmente, lleva a procesos de segregación espacial por grupos de ingreso, y (2) los mecanismos del mercado informal -tanto en el caso de sectores de ingresos altos como bajos- son particulares del caso latinoamericano, en la medida en que los gobiernos no son capaces de controlar de manera efectiva el grueso de las transacciones y dado que los agentes prefieren (por diversos motivos de riesgo, percepción e indiferencia) optar por mecanismos informales, a la hora de solucionar sus problemas de ubicación residencial.

A continuación se presentan las generalidades del modelo de uso y ocupación del suelo en las periferias urbanas de América Latina. En el mercado de suelo en las ciudades latinoamericanas y, tal vez, en la mayoría de los casos, es posible identificar tres mecanismos de transformación: en primer lugar, la cantidad de tierra disponible se determina a partir de variables como distancia al núcleo urbano, productividad rural y presencia de amenidades que incentiven la transformación de los suelos rurales en suelos urbanos. En este primer mecanismo de transformación están en constante tensión la cantidad de tierra disponible con los mecanismos rurales de producción agrícola (y productividad) y con los usos urbanos del suelo, que en las periferias que inician se relacionan con infraestructura básica, recreación y residencial-disperso para, posteriormente, incluir usos comerciales, industriales y residencial-denso.

Figura 4: Modelo de uso y ocupación del suelo en América Latina.



Fuente: Elaboración propia

Una vez la cantidad de tierra disponible se determina (y esto no es un momento particular, sino un proceso asincrónico), entran a la esfera agentes interesados en la tenencia de esos suelos, ya sea para usos residenciales o para futuros usos urbanos. En ese mecanismo aparecen, en el caso latinoamericano, dos grupos identificables de agentes: los grupos de ingresos altos y los de ingresos bajos. Además de las claras diferencias en la cantidad de ingreso disponible, los dos grupos pueden presentar diferencias en sus preferencias por proximidad a la ciudad o por amenidades rurales

que no se encuentran en los centros ya urbanizados, así como en las percepciones de riesgo y participación en los mercados informales. Las preferencias de los agentes determinan, en agregado, una demanda particular por tierra y, al modelar de manera iterativa la forma en que cada agente busca, encuentra, valora, ofrece y decide si hace transacción o no la hace, se puede observar la forma como el suelo periférico se transforma en usos urbanos. Finalmente, aparece un tercer mecanismo (también asincrónico con los demás) en el cual los suelos, ya convertidos en urbanos, se transforman en proyectos de densificación residenciales, comerciales o industriales. En este mecanismo, los precios se determinan fundamentalmente por el lado de la oferta y la ejecución dependerá de la capacidad de los habitantes por aceptar la “compra” de dichos proyectos, más que por la interacción de oferta-demanda del mecanismo anterior. Desde este punto de partida, se ha construido un modelo multiagente que permite observar las relaciones que se dan entre los agentes que participan en el mercado de tierra, que priorizan la observación de las dinámicas de ocupación, segregación y distribución de precios, de acuerdo a parámetros particulares para diferentes escenarios seleccionados.

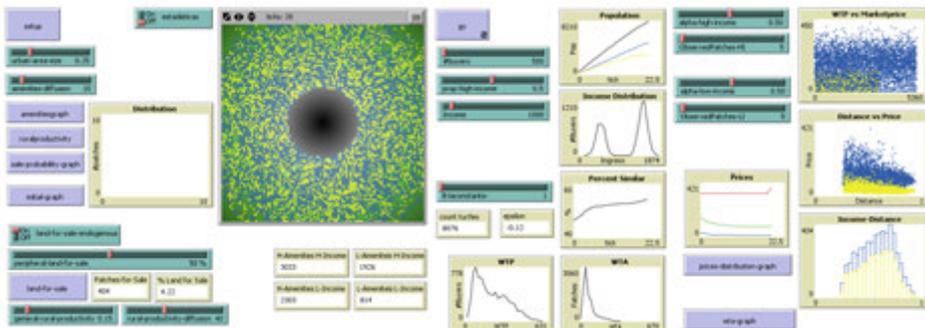
Con Netlogo se crea un espacio urbano constituido por un área de 5km x 5km y representado por una cuadrícula de lotes (*patches* o “parches” mediante el lenguaje de programación) disponibles para el uso rural o urbano. Cada “parche” tiene atributos específicos como la proximidad al centro o núcleo urbano, el valor relativo (entre cero y uno) de las amenidades presentes en el lote o la productividad agrícola detectada en ese lugar. Adicionalmente, el suelo se diferencia entre lotes urbanos y rurales y aquellos que están disponibles para la venta de los que no lo están. El tiempo transcurre por espacios de un año (que en términos de la programación en Netlogo se conoce como *ticks*) durante el cual llegan al mercado un número específico de agentes, quienes intentarán encontrar un lote disponible que satisfaga sus preferencias y que encuentre empate con el vendedor para hacer la transacción. Los agentes compradores que aparecen en cada ronda tienen un ingreso específico generado, con una distribución entre ingresos bajos y altos y con una media para cada grupo, donde la mayoría de los compradores son de ingresos ya sea altos o bajos, dejan muy pocos agentes con ingresos medios dada la especificidad del caso para América Latina.

Además del ingreso, cada agente tiene unas preferencias por proximidad a la ciudad o amenidades rurales, que evalúa en una función de utilidad para valorar cada lote observado y proceder a determinar el precio que ofrece. Una vez los compradores ofrecen, los vendedores analizan la oferta y deciden, de acuerdo a unos niveles de tolerancia, si hacen transacción o no la hacen. Para las transacciones efectivas, el agente se mueve al parche que compra y para los casos en los que no se hacen transacciones el agente desaparece del mercado (que puede interpretarse como que abandona la ciudad o decide ubicarse en el área central de la ciudad que no hace parte del foco de análisis de la periferia). Es importante mencionar que cada

grupo de agentes tiene una cantidad de “parches” que puede observar y que utiliza como mecanismo de accesibilidad a información de mercado. En este sentido, los agentes de ingresos bajos pueden observar veinticinco lotes antes de formar sus precios de oferta, mientras los de ingresos bajos solo pueden observar cinco lotes. Al finalizar las rondas de transacción, los vendedores actualizan sus precios de reserva de acuerdo a los nuevos valores de lotes transados en el mercado, esto se convierte en el mecanismo a través del cual se incluyen procesos de vecindad en el modelo.

Una vez construido el modelo se crean escenarios para diversas configuraciones de parámetros. La Figura 5 muestra la interface del modelo, donde se pueden observar los resultados de ocupación y distribución del suelo, además de otra cantidad de monitores necesarios para observar los resultados de cada escenario. En el costado izquierdo se pueden observar los controles para ajustar los parámetros iniciales como tamaño del núcleo urbano, concentración de la variable amenidades, cantidad de suelo disponible en el mercado así como cantidad de compradores, proporción de ingresos altos y bajos y mediana del ingreso. Una vez se corren los modelos, se puede observar la ocupación del suelo en la imagen central y en el histograma inferior izquierdo, la distribución espacial por grupo de ingreso. Adicionalmente, existen monitores para el total de la población, histograma de población por ingresos, indicadores de segregación y distribución espacial de los precios. Los resultados se exportan a tablas que permiten medir las relaciones y los indicadores globales paso a paso y observar el comportamiento micro de los agentes.

Figura 5: Modelo, resultados y monitores



Fuente: Elaboración propia

Los escenarios diseñados se enfocan en explorar los diversos resultados de ocupación del suelo periférico y la distribución de precios para los casos de preferencias competitivas y complementarias. Los primeros hacen referencia a los casos en los cuales, tanto los agentes de ingresos altos como los de ingresos bajos, prefieren los mismos atributos en un lote: α alto (de la función de utilidad) implica preferencia por amenidades rurales por encima de proximidad, mientras que α bajo implica que ambos grupos prefieren los lotes cercanos al núcleo urbano.

Los escenarios complementarios son aquellos donde cada uno de los dos grupos prefiere una característica opuesta al otro, es decir, se hacen experimentos para escenarios en los que los sectores de ingresos altos prefieren amenidades y los de ingresos bajos proximidad, o el caso contrario. Los resultados son interesantes en la medida en que permiten identificar las condiciones en las cuales se crean distribuciones particulares de precio, situaciones en la que los agentes de ingresos altos pueden excluir a los de ingresos bajos del mercado de suelo, o en las cuales los indicadores de segregación son mayores⁸.

Por último, vale la pena anotar que los modelos incluyen una propuesta -desarrollada a partir de hipótesis preliminares sobre la informalidad- donde los agentes, de acuerdo a un nivel percibido de riesgo y un nivel particular de aversión al riesgo, deciden si quieren hacer transacciones formales o informales. Esta hipótesis ha permitido observar un fenómeno que no es necesariamente correlacionado con los ingresos y afinar algunas preguntas que pueden alimentar futuros esfuerzos para analizar la forma en la que la informalidad afecta, no sólo la distribución espacial, sino también los precios del suelo urbano. En términos generales, los modelos multiagentes permiten simular escenarios que, parten de condiciones iniciales que simplifican los atributos de los agentes que intervienen en el complejo escenario real, pero que no determinan ni generalizan el comportamiento de esos agentes, que posibilitan la observación de los resultados de acuerdo a diferentes parámetros, con el fin de resaltar las posibles implicaciones en términos de políticas públicas urbanas o ambientales para el caso de las periferias urbanas.

El reto de los modelos multiagentes para el estudio de la economía urbana

La investigación en temas económicos, y especialmente en economía urbana, se ha preocupado en las últimas décadas por proponer modelos en los que los agentes que interactúan toman decisiones descentralizadas, es decir, por fuera de la injerencia de fuerzas exógenas y ordenadoras, y en los que, además, tanto las

⁸ Los resultados específicos de estos modelos no se incluyen en este documento, dado el alcance y objetivo del mismo que se centra en mostrar las posibilidades de utilización de esta perspectiva renovadora en estudios concretos y en razón a que los autores del proyecto se encuentran en vía de hacer una publicación internacional sobre el tema.

decisiones como las preferencias se caracterizan por adaptarse a las condiciones del entorno o a las decisiones de otros agentes involucrados en los procesos estudiados. En este sentido, Axelrod y Cohen (2001) afirman que, cuando un sistema contiene agentes y poblaciones que buscan adaptarse, podemos clasificarlos como complejos. Las decisiones que toman los agentes no siempre -y quizás se pueda afirmar que nunca- son totalmente informadas, acertadas o maximizadoras. Miller y Page (2007) plantean que las decisiones son consideradas por cada uno de los agentes y no por un agente multiplicado o representativo. Así, los modelos tradicionales que asumen comportamientos maximizadores o estrategias óptimas carecen de la capacidad de observación que emerge cuando se analizan los procesos sociales a la luz de los criterios de la complejidad.

En este documento se presentaron dos estudios en los que, la utilización de modelos multiagentes y la delimitación de los objetos de estudio como sistemas complejos, permiten modelar, mediante el poder de la computación como parte integral del modelo y no simplemente como herramienta de solución de complicados sistemas de ecuaciones. En este sentido, se parte del supuesto que los sistemas sociales no tienen respuestas que deben ser encontradas, sino que se construyen por la interacción de múltiples agentes, por lo que la inclusión de la computación en los procesos teóricos y metodológicos permite partir de supuestos minimizadores que no afectan la construcción teórica sino que simplifican el objeto de estudio, hasta un nivel donde se puede afirmar que los supuestos no afectan las características determinantes de los agentes estudiados, como sucedía en los modelos convencionales.

En este sentido, los modelos multiagentes son una posibilidad para observar y analizar los fenómenos de interés para las ciencias sociales de una manera cercana a como se creen que funcionan y dejan a un lado la búsqueda de generalizaciones o leyes tan propias de otras épocas. Resnick (1997) afirma que la tendencia de descentralización es evidente en la forma como los individuos organizan estados y corporaciones, así como en los mecanismos utilizados para el diseño de nuevas tecnologías. Pero, aún más importante, esa perspectiva se puede constatar en la forma como los individuos piensan o conciben el mundo. Así, la inclusión de sistemas complejos y el modelaje multiagente, no solamente permite observar de manera relevante el fenómeno, sino que pone en línea la forma como los humanos construyen su mundo con la forma como los académicos pueden pensar en el mundo que analizan. Este interés por estudiar mecanismos descentralizados se incrementa, quizás, por la desmesurada importancia que los estudios que le preceden le han dado a las formas centralizadas en los procesos de toma de decisiones.

Según Tesfatsion y Judd (2006), se puede afirmar que las ciencias sociales pretenden comprender, no solamente cómo se comportan los individuos, sino también cómo la interacción entre muchos individuos lleva a resultados en mayor escala. Así las cosas, comprender un sistema económico o político supone algo más que entender los individuos que lo componen; requiere comprender la forma en que

esos individuos interactúan entre ellos y asimilar que los resultados pueden ser más que la suma de las partes. A manera de colofón quisiera resaltar que, la aproximación a sistemas complejos y a modelos multiagentes facilita, no sólo alcanzar novedosos resultados, sino acercar la disciplina económica a las nuevas formas de percibir el quehacer científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral y Ottino (2004). *Complex networks: Augmenting the framework for the study of complex systems*. The European Physical Journal B. 38, 147–162
- Axelrod, R., & Cohen, M. D. (2001). *Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier [Paperback]* (p. 208). Basic Books.
- Axtell, R. L., Epstein, J. M., Dean, J. S., Gumerman, G. J., Swedlund, A. C., Harburger, J., Chakravarty, S., et al. (2002). Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3(1), 7275-9. doi:10.1073/pnas.092080799
- Batty, M. (1997). Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*.
- Batty, Michael. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science (New York, N.Y.)*, 319(5864), 769-71. doi:10.1126/science.1151419
- Beavertock, J. , Smith, R. , Taylor, P. , Walker, D. R. , & Lorimer, H. (2000). Globalization and world cities: some measurement methodologies. *Applied Geography*, 20(1), 43-63. doi:10.1016/S0143-6228(99)00016-8
- Beckmann, M. (1958). City hierarchies and the distribution of city size. *Economic Development and Cultural Change*, 6(3), 243-248. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/10.2307/1151689>
- Clifton, K., Ewing, R., Knaap, G., & Song, Y. (2008). Quantitative analysis of urban form: a multidisciplinary review. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 1(1), 17-45.
- Coelho, D., & Ruth, M. (2006). Seeking a unified urban systems theory. *The Sustainable City IV: Urban Regeneration and Sustainability*, 1, 179-188. Southampton, UK: WIT Press.
- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association*.

- Ewing, Reid, & Pendall, R. (n.d.). Measuring sprawl and its impact. 2002. Smart Growth America.
- Gastner, M. T., & Newman, M. E. J. (2006). Shape and efficiency in spatial distribution networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(January),
- Kogut, B. (2001). The small world of Germany and the durability of national networks. *American Sociological Review*, 66(3), 317-335.
- Marshall, J. D. (2007). Urban Land Area and Population Growth: A New Scaling Relationship for Metropolitan Expansion. *Urban Studies*, 44(10), 1889-1904.
- McDonald, J. F. (1989). Econometric studies of urban population density: a survey. *Journal of urban economics*, 26, 361-85.
- McDonald, J. F. (1989). Econometric studies of urban population density: a survey. *Journal of urban economics*, 26, 361-85.
- Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life* (p. 284). Princeton University Press.
- Resnick, M. (1997). *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds* (p. 183). A Bradford Book.
- Sassen, S. (2002). Locating cities on global circuits. *Environment and urbanization*, (2002), 1-18. Retrieved from <http://eau.sagepub.com/content/14/1/13.short>
- Taylor, P J, Catalano, G., & Walker, D. R. F. (2002). Measurement of the World City Network. *Urban Studies*, 39(13), 2367-2376.
- Taylor, Peter J. (1997). Hierarchical tendencies amongst world cities: a global research proposal. *Cities*, 14(6), 323-332.
- Tesfatsion, L. (Editor), & Judd, K. L. (Editor). (2006). *Handbook of Computational Economics, Volume 2: Agent-Based Computational Economics* (p. 904). North Holland; 1 edition.
- Wu, F. (2007). Book Review: Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. *Progress in Human Geography*, 31(1), 113-115.
- Zellner, M. (2012) Planificación urbana y complejidad. El potencial de los modelos multiagentes. Borrador en proceso de publicación.