

- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2006) *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*, Buenos Aires, Lugar Editorial.
- Gómez Delgado, M. & Rodríguez Espinosa, V.M. (2012) *Análisis de la Dinámica Urbana y Simulación de Escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid, Ra-Ma.
- Malczewski, J. (1999) *GIS and multicriteria decision analysis*, New York, John Wiley & Sons.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. & Bosque Sendra, J. (2009) Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova*. Universidad de Barcelona.
- Pontius, R.G., Shusas, E. & McEachern, M. (2004) Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101, 251-268.

Modelos de crecimiento urbano

Santiago Linares

Un aporte de la comunidad científica para solucionar y prevenir los problemas asociados al crecimiento urbano sin restricciones fue el desarrollo y aplicación de modelos que permitan medir cuantitativamente las interrelaciones intra e interurbanas de los factores asociados al crecimiento y conocer así la génesis y los posibles efectos futuros de su evolución.

Los modelos de crecimiento urbano son un tipo particular de modelado numérico que incluye variables económicas, geográficas, sociológicas y estadísticas para explorar los mecanismos de evolución urbana e interrelación dentro del sistema urbano (Li y Gong, 2016). En ellos se ponen en relación diferentes elementos tales como usos del suelo, viviendas, población, empleo, localización de comercios, industrias, servicios, redes, infraestructuras, movilidad y circulación (Wegener, 1994). Lejos de ser considerada un área del conocimiento estática, los modelos de crecimiento urbano han

evolucionado sustancialmente desde sus orígenes hasta la actualidad (Linares, 2016), las innovaciones introducidas durante su evolución podrían clasificarse en dos grandes dimensiones, una de ellas, podemos hallarla en la capacidad que han tenido para contemplar las interacciones locales y heterogeneidad a micro escala, tal como lo hacen los Modelos Basados en Agentes y los Modelos de Autómatas Celulares (Clarke, 2014), en contraposición a los clásicos Modelos de Transporte y Uso del Suelo (Wingo, 1961). La segunda innovación por destacar es la capacidad para simular procesos dinámicos no lineales en contraposición de las representaciones estáticas de antaño, recuperando los cambios que acontecen en cada unidad de tiempo durante el proceso de simulación. Estos dos aspectos confluyen en mejoras sustanciales para modelar las relaciones espaciales y temporales que ocurren durante el proceso de urbanización.

Los incipientes modelos urbanos, ponían sus esfuerzos en la descripción de las formas y distribuciones espaciales, como lo expresan los modelos de anillos concéntricos de Burgess (1925), el modelo de los sectores de Hoyt (1939) y el modelo de núcleos múltiples de Harris y Ullman (1945). Estos modelos se concentran más en describir genéricamente la morfología urbana y menos en analizar los procesos particulares inherentes a la expansión urbana. Posteriormente, los modelos denominados de interacción espacial recuperan las teorías gravitatorias o de maximización de la entropía para modelar la intensidad y resultado de las interacciones ente elementos constituyentes de una ciudad, como resultado de la propiedad de sus componentes y la distancia que existe entre ellos (Foot, 1981).

Los modelos de interacción espacial constituyen las bases de los modelos urbanos de Transporte y Usos del Suelo, como el modelo de Lowry (1964) y el modelo de la renta del suelo de Alonso (1964), los cuales explican la distribución (o patrón) de usos del suelo urbano a través de las relaciones entre localización de la población y el empleo, renta del suelo y vías de transporte. A partir de ello se pretendió, sobre todo, entender las regularidades y buscar equilibrios generales en el tiempo y el espacio.

La mayoría de los primeros modelos urbanos se basaron en la suposición de que las áreas de aplicación son espacialmente homogéneas. Sin embargo, los comportamientos (o elecciones) individuales para vivir, trabajar o consumir son difíciles de modelar con teorías de interacción espacial o macroeconómicas. Tanto las actividades sociales como las condiciones naturales dentro de una ciudad son heterogéneas. Por lo tanto, posteriormente se introdujeron conceptos de las teorías microeconómicas en los tradicionales modelos urbanos de Transporte y Usos del Suelo para explicar las diferencias entre los comportamientos individuales (o decisiones) y las variaciones regionales en las actividades socioeconómicas (Irwin y Geoghegan, 2001). El espacio homogéneo se trata entonces como zonas discretas diferenciadas, y cada zona está asociada a una serie de variables socioeconómicas, por ejemplo, población, empleo, industria, servicios y mercado del suelo. Estos nuevos modelos fueron implementados para investigar equilibrios y desequilibrios entre las demandas de las actividades sociales en una ciudad (o suelo urbano), usando zonas como unidades de modelado, entre las cuales existen flujos de entrada-salida de bienes, capital o población. Dentro de estos modelos podemos citar a TRANUS (De La Barra y Ricaby, 1982), MEPLAN (Echenique et al. 1990), CUF (Landis 1994), MUSSA (Martínez, 1996).

El siguiente conjunto de modelos de crecimiento urbano tuvo que ver con la desagregación de las zonas o sectores en agentes urbanos, los cuales poseen diferentes propiedades que les otorgan a cada agente alternativas de movimientos y comportamientos (o decisiones), los cuales estarán influenciados también por el resto de los agentes competidores (Li y Liu, 2007, Sanders et al. 1997). Los Modelos Basados en Agentes son un tipo de modelos que imitan la complejidad en el sistema urbano mediante las interacciones locales entre diferentes agentes configurando un modelo emergente desde abajo (interacciones individuales) hacia arriba (patrón global). El dinamismo de las actividades socioeconómicas o cambios en el uso del suelo son un producto de una secuencia de tiempo de micro simulación de decisiones discretas (Aguilera Ontiveros, 2001). Existen una serie

de herramientas disponibles para su implementación, tales como Swarm, Repast, Mason, StrLogo y NetLogo (Chen et al. 2012).

Finalmente, los Modelos Basado en Automatas Celulares son sistemas dinámicos discretos tanto en el espacio como en el tiempo, estos parten de un espacio geográfico representado por una grilla de celdas, en donde cada celda representa una categoría de uso del suelo predeterminada (White, 1997). Permiten considerar tanto la heterogeneidad espacial de las condiciones biofísicas (por ejemplo, relieve) o socioeconómicas (por ejemplo, tráfico o indicadores urbanísticos), y cada cuadrícula interactúa localmente con su entorno (es decir, vecinos) a través reglas de transición espacialmente explícitas (Aguilera Ontiveros, 2002). Tienen la ventaja de poder incorporar fácilmente una gran cantidad de variables a modo de factores explicativos de la urbanización, como así también la inclusión de una amplia secuencia de reglas de transición. Tanto los ABM como CA tratan con relaciones y estructuras de crecimiento urbano no lineales y procesos iterativos. Diferenciándose sustancialmente de los tradicionales modelos de Transporte y Usos del Suelo. Tanto el estado del arte como la presentación técnica de una selección de herramientas puede ser consultada en Camacho Olmedo et al. (2018).

Bibliografía

- Aguilera Ontiveros, A. (2001) *Modelado multiagente de sistemas socioeconómicos: una introducción al uso de la inteligencia artificial en la investigación social*. Colección Investigaciones del Colegio de San Luis. San Luis de Potosí.
- Aguilera Ontiveros, A. (2002) *Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. Colección Investigaciones del Colegio de San Luis. San Luis de Potosí.
- Alonso, W. (1964) *Location and land use: towards a general theory of land rent*, Cambridge, Harvard University Press.
- Burgess, E. W. (1925) The growth of city: an introduction to a research project, en Park, R.E., Burgess, E.W. & McKenzie, R.D. (Eds.) *The city*, Chicago, The University of Chicago Press. pp. 47-62.

- Camacho Olmedo, M.T. Paegelow, M., Mas, J.P & Escobar, F. (Eds.) (2018). *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Springer.
- Chen, Y., Li, X., Wang, S. *et al.* (2012) Defining agents' behavior based on urban economic theory to simulate complex urban residential dynamics. *International Journal of Geographic Information Science*, 26, 1155-1172.
- Clarke, K. C. (2014) Cellular Automata and Agent-Based Models, en Fischer, M. & Nijkamp, P. (Eds.) *Handbooks of Regional Science*, Berlin, Springer, pp. 1217-1233.
- De la Barra, T. & Rickaby, P. (1982) Modelling regional energy use: a land use, transport and energy evaluation model. *Environment and Planning B*, 9, 429-443.
- Echenique, M.H., Flowerdew, A.D.J., Hunt, J.D. *et al.* (1990) The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund. *Transport Reviews*, 10, 309-322.
- Foot, D. (1981) *Operational urban models: an introduction*, London, Methuen.
- Harris, C.D. & Ullman, E.L. (1945) The nature of cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Sciences*, 242, 7-17.
- Hoyt, H. (1939) *The structure and growth of residential neighborhoods in American cities*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- Irwin, E.G. & Geoghegan, J. (2001) Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 85, 7-24.
- Landis, J.D. (1994) The California urban futures model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B*, 21, 399-420.
- Li, X. & Liu, X. (2007) Defining agents' behaviors to simulate complex residential development using multicriteria evaluation, *Journal of Environment Management*, 85, 1063-1075.
- Li, X. & Gong, P. (2016) Urban growth models: progress and perspective, *Science Bulletin*, 61, 21, 1637-165
- Linares, S. (2016) Evolución histórica sobre la modelización del espacio urbano en Geografía. *Sociedade e Território*, 28, 2, 23-41.

- Lowry, I.S. (1964) *A model of metropolis*, Santa Mónica, Rand Corporation.
- Martínez, F. (1996) MUSSA: land use model for Santiago city. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1552, 126-134.
- Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Guerin-Pace, F. & Bura, S. (1997) SIMPOP: A multiagent system for the study of urbanism, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 2. 287-305.
- Wegener, M. (1994) Operational urban models state of the art, *Journal of the American Planning Association*, 60, 17-29.
- White, R. (1997) Cities and Cellular Automata. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, 111-125.
- Wingo, L. (1961) *Transportation and urban land*, Baltimore, John Hopkins University Press.