

Dossier: Análisis espacial e investigación cuantitativa con Tecnologías de la Información Geográfica

Modelización prospectiva del crecimiento urbano en Luján (Buenos Aires, Argentina)

Noelia Principi

Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Luján

E-mail: nprincipi@unlu.edu.ar

Recibido: 15/06/2022; Aceptado: 16/07/2022; Publicado: 31/07/2022

Resumen

El trabajo presenta la aplicación de un modelo de crecimiento urbano basado en una red neuronal artificial y autómatas celulares, en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) para simular la expansión urbana al 2030 y de esta forma conocer las tendencias de crecimiento. El desarrollo metodológico se realiza en Sistemas de información Geográfica (SIG) a partir de la automatización de los procedimientos para el análisis de cambios en el uso de suelo disponible en la herramienta MOLUSCE (*Methods Of Land Use Change Evaluation*) del SIG libre QGIS. Los resultados indican que entre el 2010 y 2020 la superficie urbana creció 5,24 km², lo que equivale a un 18% de superficie total. Según el resultado del modelado al 2030, el crecimiento sería de 6,72 km², es decir, un 20% de la superficie total. Los valores de expansión urbana de las últimas dos décadas, y su proyección al 2030, son altos y se corresponden con el gran dinamismo que tienen las aglomeraciones de tamaño intermedio en el país.

Palabras clave: modelo de crecimiento urbano, red neuronal artificial, autómatas celulares, Sistemas de Información Geográfica, ciudad de Luján.

Prospective modeling of urban growth in Luján (Buenos Aires, Argentina)

Abstract

This work presents the application of an urban growth model based on an artificial neural network and cellular automata, in the city of Luján (Buenos Aires, Argentina) to simulate urban expansion by 2030 and thus know the growth trends. The methodological development is carried out in Geographic Information Systems (GIS) from the automation of the procedures for the analysis of changes in land use available in the MOLUSCE tool (*Methods Of Land Use Change Evaluation*) of the free GIS QGIS.

The results indicate that between 2010 and 2020 the urban area grew by 5.24 km², which is equivalent to 18% of the total area. According to the modeling result, by 2030, the growth would be 6.72 km², that is, 20% of the total area. The urban expansion values of the last two decades, and their projection to 2030, are high and correspond to the great dynamism of medium-sized agglomerations in the country.

Keywords: urban growth model, artificial neural network, cellular automata, Geographic Information Systems, city of Luján.

1. Introducción

La expansión urbana es un tema relevante en los estudios territoriales actuales. Según las consideraciones de Hábitat III¹ se estima que para el 2030 un 60% de la población mundial vivirá en ciudades y el 95% de esa expansión se producirá en los países en desarrollo (Naciones Unidas-Hábitat, 2016). Es una temática presente en las medidas adoptadas por la “Agenda 2030” de la Organización de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2016), donde se plantearon 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) entre los que se encuentra el de lograr “Ciudades y comunidades sostenibles”, resaltando la importancia de abordar la problemática del crecimiento urbano incontrolado, especialmente en los países en desarrollo, en áreas con infraestructuras y servicios inadecuados y/o sobrecargados.

Diversos autores (Belley Llop, 2004; Bolay y Rabinovich, 2004; Cifuentes y Llop, 2015) plantean que históricamente los estudios y la planificación urbana en los países en desarrollo se ha centrado más en las grandes áreas metropolitanas que en las ciudades intermedias, a pesar de su importancia demográfica y su potencialidad como intermediaria entre las grandes aglomeraciones y los espacios rurales circundantes. El crecimiento acelerado de las ciudades intermedias latinoamericanas en las últimas décadas estuvo acompañado de patrones de urbanización insostenibles y poco controlados, vinculados a un crecimiento extensivo (horizontal), de urbanización dispersa o periurbanización, evidenciando procesos de segregación socioespacial, con el surgimiento de asentamientos informales y urbanizaciones privadas, agudizando la ausencia de servicios básicos como agua potable, electricidad y/o gas natural, etc. La falta de planificación propició un avance muy rápido sobre otros usos del suelo, aumentando de forma excesiva la cantidad de superficie para el desarrollo urbano (Cifuentes y Llop, 2015).

En Argentina, según la clasificación realizada por Vapñarsky y Gorojovsky (1990), se consideran Aglomeraciones de Tamaño Intermedio (ATIs) a aquellas que tienen entre 50.000 y 999.999 habitantes. A su vez esa categoría se subdivide en ATIs mayores (de 400.000 hasta 999.999 habitantes) y ATIs menores (de 50.000 hasta 399.999 habitantes). Esta última subcategoría, en la que se encuentra la ciudad de Luján, presenta un crecimiento y dinamismo muy importante en los últimos períodos intercensales. Entre 1980-2010 las ATIs menores han tenido un crecimiento poblacional del 90%. Según datos del Censo 2010, 7,5 millones de personas residen en estas aglomeraciones, lo que representa un 18,7 % de la población total del país (Linares, Di Nucci y Velázquez, 2016).

El trabajo se enmarca en la Geografía Aplicada (Phlipponneau, 2001) lo que implica que los conocimientos generados pueden ser útiles a la sociedad; como manifestó Bunge (1960), la ciencia pertenece a la vida social en tanto se la aplica con el objetivo de mejorar las condiciones de vida de la población.

A continuación, se presenta la aplicación de un modelo de crecimiento urbano basado en autómatas celulares e inteligencia artificial, en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina) para modelizar la expansión urbana al 2030 y de esta forma conocer las tendencias de crecimiento. El desarrollo metodológico se realiza en Sistemas de Información Geográfica (SIG) a partir de la automatización de los procedimientos para el análisis de cambios en el uso de suelo disponible en la herramienta MOLUSCE (*Methods Of Land Use Change Evaluation*) del SIG libre QGIS.

¹ Habitat III fue la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible desarrollada Quito, Ecuador, del 17 al 20 de octubre del 2016.

2. Modelado de expansión urbana

El tema de modelado de expansión urbana basado en Autómatas Celulares (AC) es explicado detalladamente por Aguilera Benavente (2006). Comienza en la década de 1940 con John Von Neumann (1945) que intentaba modelar máquinas trabajando de forma autónoma (autómatas) y que tuvieran la posibilidad de auto-reproducirse. Luego, con los aportes de Stanislaw Ulam quien trabajó para poder enmarcar el trabajo en un ambiente de células, considerando una red infinita como malla cuadrículada con una base espacial discreta (células). La combinación de estos desarrollos dio lugar a la aparición del primer modelo de Autómata Celular de Von Neumann, que es un modelo matemático para un sistema dinámico, que está compuesto por un conjunto de celdas (o células) que adquieren distintos estados o valores, que son alterados de un instante a otro en unidades de tiempo discreto. De esta manera, las celdas logran una evolución, según una determinada expresión matemática, que es sensible a los estados de las células vecinas a través de una regla de transición local. Existen diferentes tipos de análisis de vecindad, una posibilidad metodológica es utilizar la vecindad de Moore considera a todas las celdas que rodean a la celda central, con diferentes proximidades desde esa celda y que mostró utilidad en la aplicaciones realizadas por Aguilera Ontiveros (2002) para el análisis de cambios de usos del suelo.

Por su parte, el modelo basado en Redes Neuronales Artificiales (RNA), en el marco de la inteligencia artificial, empieza también a desarrollarse en la década de 1940 e inicios de la década de 1950 con aportes de varios investigadores entre los que se destacan McCulloch y Pitts, Householder y Landahl, Kleene, Von Neumann y Culbertson, quienes elaboraron los primeros modelos matemáticos de neuronas y redes neuronales. En la década del '50, se combinaron los resultados obtenidos por los matemáticos, biólogos y los psicólogos y se desarrollaron modelos de simulación de neuronas y redes neuronales en computadora, dando lugar a la forma más generalizada de trabajar con estos sistemas en la actualidad, a partir de la simulación en el ámbito computacional (Lara, 2011).

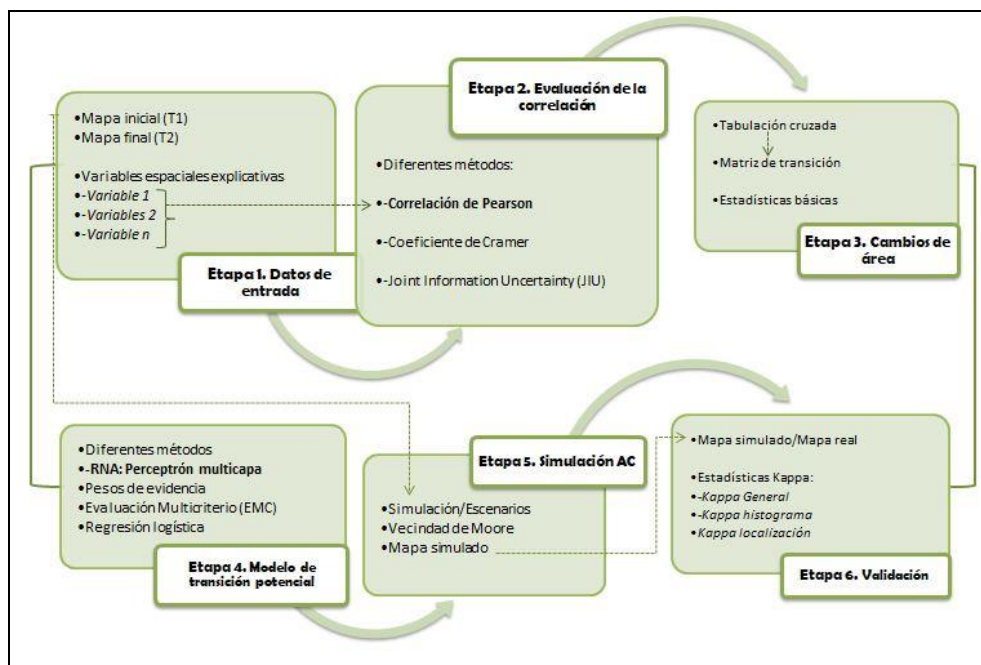
Como antecedentes de aplicación concreta de modelado de crecimiento urbano desde la Geografía, existen diferentes trabajos a nivel Iberoamericano, dentro de los cuales cabe mencionar Gómez et al. (2014) con *“Simulación prospectiva del crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid a partir de modelos basados en autómatas celulares y modelos basados en EMC.”*, Linares y Picone (2018) *“Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina”*, asimismo Gómez (2020) avanza con la *“Simulación de escenarios futuros de cambios de usos del suelo usando Redes Neuronales Artificiales. Aplicación en la ciudad de Curuzú Cuatiá, Corrientes, Argentina.”*

3. Aplicación a la ciudad de Luján

La ciudad de Luján, es una ATI de la provincia de Buenos Aires de 78.346 habitantes, según los datos del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2010. Se encuentra a 68 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) pero si consideramos su mancha urbana, es decir, la ciudad desde un punto de vista físico, se encuentra separada por sólo dos kilómetros del Aglomerado Gran Buenos Aires (AGBA). Es importante destacar, que en Buzai y Montes Galbán, (2020) se mostraron evidencias que indicarían que Luján forma parte de la Megaciudad Buenos Aires, teniendo en cuenta la infraestructura gris al considerar conjuntamente el espacio adaptado y el sistema de flujos. Estas características posicionan a Luján como una ciudad intermedia de gran importancia respecto a su posición geográfica en términos absolutos y relativos.

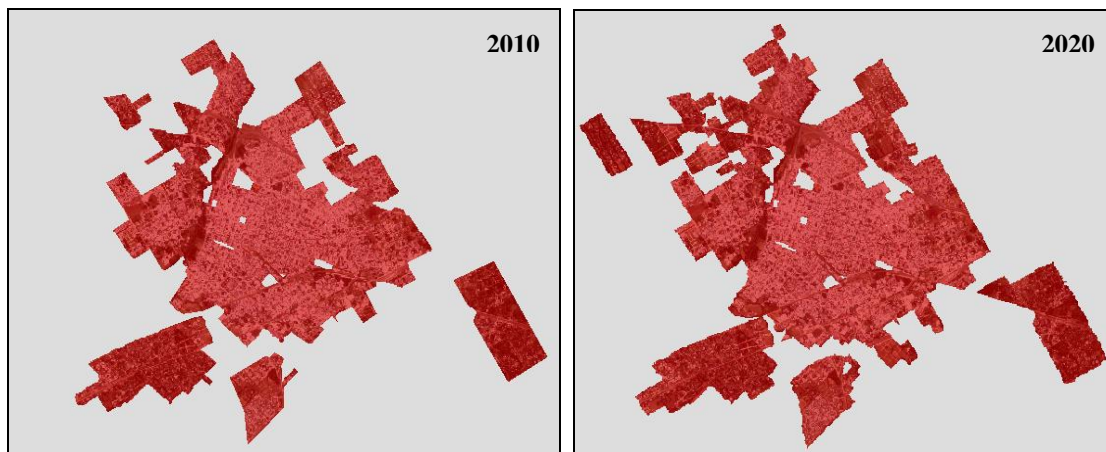
La aplicación del modelado basado en AC y RNA en Luján, se realiza en el SIG libre QGIS con la herramienta MOLUSCE (*Modules for Land Use Change Evaluation*) que fue diseñada especialmente para analizar, evaluar, modelizar y simular cambios y escenarios futuros de uso del suelo. Los métodos y algoritmos utilizados, que fueron detallados por Asia Air Survey y NextGIS (2014) se presentan en Principi (2021). La Figura 1 muestra la síntesis de los procedimientos metodológicos de la herramienta:

Figura 1. Esquema metodológico de MOLUSCE



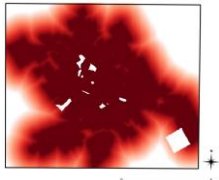
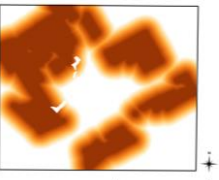
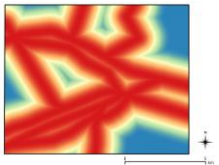
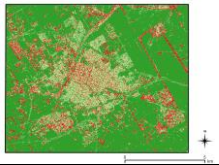


El modelado en MOLUSCE inicia la etapa 1, con datos de entrada correspondiente al área urbana en la ciudad de Luján, en el 2010 y 2020 respectivamente (Figura 2). La cobertura urbana del 2010 fue obtenida por Humacata (2017) a partir de una clasificación digital y visual de imágenes satelitales Landsat 5 (sensor TM), con fecha 8/12/2010. La cobertura del 2020 se obtuvo a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales de Sentinel 2, con fecha 4/3/20.

Figura 2. Datos de entrada en MOLUSCE: suelo urbano de Luján en 2010 y 2020



Luego, se definen e ingresan los criterios espaciales impulsores, o limitantes, de cambio que se consideran en el análisis (Tabla 1).

Tabla 1. Criterios espaciales considerados

Criterios espaciales	Descripción
<p><i>Distancia al área urbana actual (2020)</i></p> 	<p>Impulsor de cambio. Considerando que la expansión urbana de tipo compacta se da como forma de mancha de aceite en zonas contiguas al área urbana consolidada.</p>
<p><i>Distancia a las áreas complementarias</i></p> 	<p>Impulsor de cambio. Consideradas en el Código de Ordenamiento Urbano (COU) del partido de Luján (2019:16) con el código AC-RE1 (Áreas complementarias Residenciales Extraurbanas 1) y AC-RE2 (Áreas complementarias Residenciales Extraurbanas 1), como áreas de posible expansión urbano-residencial.</p>
<p><i>Distancia a las principales vías de comunicación</i></p> 	<p>Impulsor de cambio. Las vías de comunicación se consideran como factores de cambio importantes, respecto a la movilidad que tiene la ciudad vinculada principalmente a su posición en el extremo oeste de la Región Metropolitana de Buenos Aires (RMBA) y vínculo con la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA).</p>
<p><i>Pendiente del terreno</i></p> 	<p>Impulsor de cambio. Obtenida a partir de un Modelo de Elevación Digital aerofotogramétrico de acceso libre obtenido del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, del año 2013 con 5 metros de grilla. Se consideran las áreas con menor pendiente como las mayores posibilidades de expansión urbana.</p>
<p><i>Distribución de las áreas protegidas y de recreación</i></p> 	<p>Limitante de cambio. Las áreas protegidas por su condición no podrían convertirse en uso urbano y las áreas de recreación. Como los espacios verdes urbanos, son usos consolidados de difícil reversibilidad.</p>
<p><i>Distribución del uso urbano disperso</i></p> 	<p>Limitante de cambio. Este criterio considera áreas de urbanizaciones privadas como barrios cerrados, clubes de campo y <i>countries</i> que se localizan en el área periurbana, o zonas de interfase urbano-rural, restringiendo la expansión urbana hacia esos lugares que ya están consolidados con esa variante de uso urbano.</p>

A continuación, en las etapas 2 y 3, se realiza el análisis de cambios entre usos del suelo a través de estadísticas básicas, se mide la correlación entre variables y se genera la matriz de transición de cambio de “no urbano” a “urbano”. Se obtiene el valor de variación de superficie de área urbana entre el 2010 y el 2020, con un aumento de 5,24 km² que porcentualmente corresponde al 4,96% del

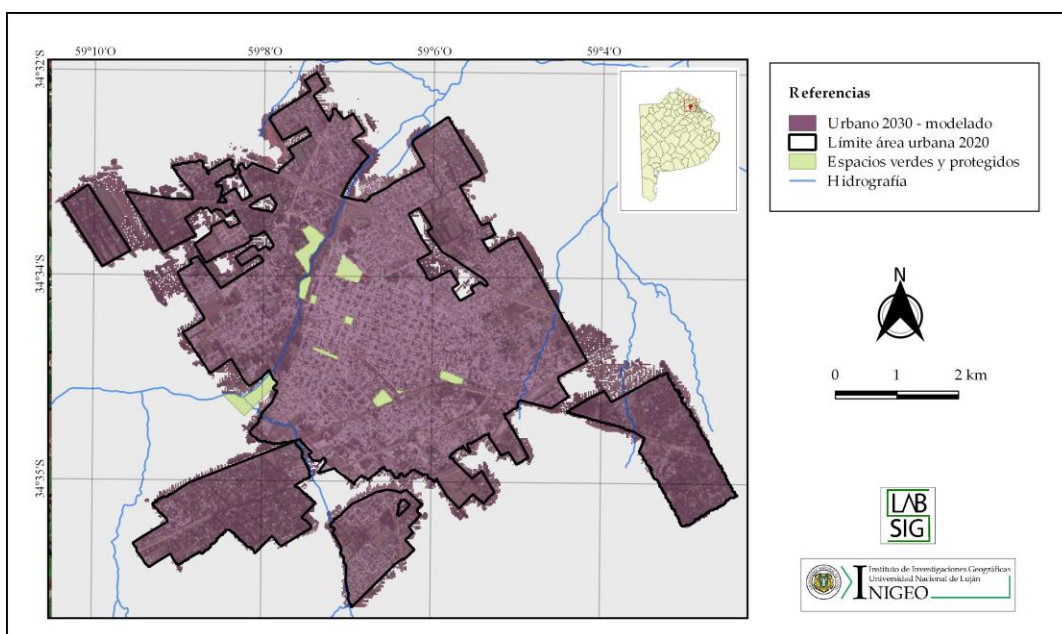
suelo. Esta información acerca de la tendencia en el cambio de cobertura es importante al momento de realizar la proyección futura.

Luego, ya en la etapa 4, se aplica el modelo de transición utiliza la RNA perceptrón multicapa. El resultado del entrenamiento de la red neuronal arrojó un error global menor a 5% (0,05) y un índice Kappa general de 0,89. El último procedimiento, en la etapa 5, consiste en aplicar el modelo de autómatas celulares para obtener el mapa de uso del suelo urbano al año 2030, que se presenta en el apartado siguiente. La herramienta presenta una etapa siguiente de validación, como se muestra en la figura 1, que es posible aplicar si se tienen datos reales de la fecha de simulación. En Principi (2021) se presentó una validación en Luján con el mapa de uso del suelo urbano real del 2020, donde se obtuvo una correspondencia entre el mapa simulado y el mapa real de 94,59% y un índice Kappa de 0.87 lo que indicó un muy buen resultado y permitió considerar que este modelo resulta óptimo para realizar la simulación al 2030 que se presenta en este trabajo.

4. Resultados

La figura 3 presenta el resultado de la simulación de expansión urbana para el año 2030 en Luján, además se incorpora el límite de la mancha urbana del 2020 para evidenciar la tendencia de crecimiento, las áreas verdes y protegidas de la ciudad que se consideraron como limitantes de cambio y los cursos de agua, que corresponden al río Luján y sus afluentes.

Figura 3. Modelado de expansión urbana al 2030 en Luján



En la tabla 2, se presentan los resultados básicos de evolución de expansión urbana caracterizados por superficie y porcentaje.

Tabla 2. Datos de expansión urbana en la ciudad de Luján

Año	Superficie en km ²	Aumento en km ²	Aumento en %
2010	27,82	-	-
2020	33,06	5,24	18
2030 (simulación)	39,78	6,72	20

El resultado cartográfico permite observar una tendencia de crecimiento principalmente en el sector noroeste y sureste de la ciudad. Es importante analizar particularmente estas áreas, para evaluar si estas tendencias son o no propicias para un desarrollo urbano sostenible, considerando que la ciudad de Luján sufre históricamente de inundaciones vinculadas al desborde del río homónimo y de algunos de sus afluentes principales que atraviesan la trama urbana.

Los valores de crecimiento de la superficie urbana entre 2010 y 2020, y su proyección a partir del modelo de simulación para el 2030, son altos y se corresponden con el gran dinamismo que tienen las aglomeraciones de tamaño intermedio en el sistema urbano argentino, y sobre todo una ciudad como Luján que integra a la Región Metropolitana de Buenos Aires, la más extensa y densamente poblada del país. Los resultados indican que entre el 2010 y 2020 la superficie urbana creció 5,24 km², lo que equivale a un 18% de superficie total y el resultado del modelado de expansión urbana al 2030 indica que el crecimiento sería de 6,72 km², es decir, un 20% de la superficie total, manteniendo la tendencia a expandirse sobre las áreas contiguas, según los criterios espaciales considerados para el modelado.

4. Conclusiones

La Geografía como ciencia aplicada, permite realizar aportes a la práctica de ordenamiento territorial en la instancia de planificación, especialmente en la etapa de diagnóstico donde es posible estudiar y analizar el espacio geográfico actual, evidenciando sus problemáticas, y modelizando sus tendencias futuras. Además, es posible realizar aportes en la etapa propositiva del ordenamiento, donde lo que prima es la búsqueda de alternativas o escenarios posibles que permitan intervenir y modificar las configuraciones espaciales, presentes y futuras, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de población.

En este sentido, la implementación del modelo de simulación de crecimiento urbano basado en la RNA y los AC que se presentó en este trabajo, permitió generar un escenario al 2030, en la ciudad de Luján, como herramienta de apoyo a las decisiones espaciales. Contar con este tipo de información resulta de especial interés para que los decisores puedan analizar el espacio geográfico con una mirada prospectiva, teniendo una aproximación a la tendencia del crecimiento urbano si no se realizara ninguna intervención. De esta forma, es posible impulsar cambios con el objetivo de favorecer la expansión urbana en áreas que presenten características favorables para el desarrollo de ese uso del suelo.

Por supuesto, el modelo, como abstracción de una realidad compleja, puede mejorarse a partir de la incorporación de nuevos criterios impulsores o limitantes de cambios; o incluso es posible pensar en la generación de potenciales escenarios alternativos de crecimiento urbano a partir de la incorporación de nuevos criterios que se enmarquen dentro de una política de desarrollo territorial

concreta, para poder simular diferentes tendencias en función de las propuestas de intervención posibles como la ampliación de servicios básicos, extensión de red vial, etc.

Referencias bibliográficas

- Aguilera Benavente, F (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante SIG y modelos basados en AC. *Geofocus*, 6, 81-112.
- Aguilera Ontiveros, A. (2002). *Ciudades como tableros de ajedrez: introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Asia Air Survey y NextGIS (2014). *Molusce. Modules for Land Use Change Evaluation*. Recuperado de: [https://wiki.gis-lab.info/w/Landscape_change_analysis_with MOLUSCE - methods and algorithms](https://wiki.gis-lab.info/w/Landscape_change_analysis_with_MOLUSCE_-_methods_and_algorithms)
- Avalos Jiménez, A., Gómez Delgado, M., Aguilera Benavente, F. y Flores Vilchez, F. (2019). Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80 (287), e021. Recuperado de: <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Bellet, C. y Llop, J. M. (2004). Miradas a otros espacios urbanos: las ciudades intermedias. *Revista Electrônica de Geografia y Ciencias Sociales*, VII(165), 26. <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-165.htm>.
- Bolay, J. C. y Rabinovich, A. (2004). Intermediate cities in Latin America risk and opportunities of coherent urban development. *Cities*, 21(5), 407-421.
- Bunge, M. (1960). *La ciencia: Su método y su filosofía*. Buenos Aires: Siglo Veinte.
- Buzai, G. D. y Montes Galbán, E. (2020). Megaciudad Buenos Aires: Cartografía de su última expansión y conurbación mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales nocturnas. *Revista Cartográfica*, 100, 215-238.
- Cifuentes, P. y Llop, J. (2015). Repensando la ciudad: estrategias de desarrollo urbano sostenible de las ciudades intermedias de America Latina. *Revista Nodo*, 9(19), pp. 73-83.
- Gómez D. M., Aguilera B. F., Barreira G. P., Bosque S. J., y Rodríguez E. V. M. (2014). Simulación prospectiva del crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid a partir de modelos basados en autómatas celulares y modelos basados en EMC. En Zaragoza, B.; Ramón, A. (Eds.): *Tecnologías de la información para nuevas formas de ver el territorio: XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica*, 27-37.
- Gómez, L.F. (2020). Simulación de escenarios futuros de cambios de usos del suelo usando Redes Neuronales Artificiales. Aplicación en la ciudad de Curuzú Cuatiá, Corrientes, Argentina. *Estudios Socioterritoriales*. (28), 054. DOI: <https://doi.org/10.37838/unicen/est.28-054>

- Humacata, L. (2017). *Análisis espacial de los cambios de usos del suelo en partidos de interfase urbano-rural de la Región Metropolitana de Buenos Aires, en el periodo 2000-2010, mediante la aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul. Recuperada de <https://www.researchgate.net/publication/326169509>
- Lara, F. (2011). *Fundamentos de redes neuronales artificiales*. México: Laboratorio de Cibernética Aplicada-Centro de Instrumentos-Universidad Autónoma de México.
- Linares, S. y Picone, N. (2018). Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Automatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina. *Revista Estudios Ambientales*. 6(1), 5-25.
- Linares, S.; Di Nucci, J.; Velázquez, G. (2016). Cambios en el Sistemas Urbano. En Velázquez, G. (Dir.) *Geografía y calidad de vida en Argentina. Análisis regional y departamental* (págs. 68-82). Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Mas, J. F. (comp).(2017). *Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio*. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental - Universidad Nacional Autónoma de México.
- Naciones Unidas – Hábitat. (2016). *Urbanization and Development: Emerging Issues. World Cities Report 2016*. Nairobi. Recuperado de: <https://unhabitat.org/world-cities-report>
- Naciones Unidas. (2016). *Objetivos del desarrollo sostenible 17 objetivos para transformar el mundo*. Recuperado de: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Phlipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*. Barcelona: Ariel.
- Principi (2021). Validación de un modelo de simulación de crecimiento urbano 2010-2020. Aplicación a la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina). En Linares, S.; Entraigas,I.; Picone, N.; La Macchia, L.; Rosso, I.; Gandini, M.; y Tisnés, A. (coomp). *Libro de Resúmenes del V Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica y III Congreso Internacional de Tecnologías de Información Geográfica: Modelización y TIG aplicados a procesos espaciales urbanos y regionales*. Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. 73-81.
- Vapñarsky, C. A. y Gorojovsky, N. (1990). *El crecimiento urbano en la Argentina*. Buenos Aires: Grupo Editor Latinoamericano.
- Von Neumann, J. (1945). First draft of a report on the EDVAC. Republicado en *The Origins of Digital Computers: Selected Papers*. Randall, B (ed). Berlín: Springer.1982.



Esta obra se encuentra bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0. Internacional. Reconocimiento - Permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas siempre y cuando reconozca y cite al autor original. No Comercial – Esta obra no puede ser utilizada con fines comerciales, a menos que se obtenga el permiso.