

3. Análisis espacial con autómatas celulares, aplicado al crecimiento de ciudades

RICARDO ELIÚ LOZOYA-PONCE*

EDUARDO JIMÉNEZ-LÓPEZ**

ROMÁN SÁNCHEZ DÁVILA***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.279.03>

Resumen

En este trabajo se muestra la complejidad del crecimiento urbano y su modelización mediante el uso de Autómatas Celulares (AC). Se destaca la importancia de comprender la sostenibilidad urbana para planificadores y gobiernos, especialmente en ciudades de más de un millón de habitantes. Los autómatas celulares son una herramienta eficaz para simular y predecir la transformación urbana, permitiendo mejorar la comprensión de la dinámica espacio-temporal del crecimiento urbano, además se integran a sistemas de información geográficos (SIG), para facilitar su manejo. El modelo opera con reglas de transición deterministas, que son evaluadas en cuanto a su capacidad para representar fenómenos urbanos realistas y su potencial para describir la planificación urbana. También se destacan las limitaciones e incertidumbre inherentes a los modelos de AC deterministas, así como la necesidad de incorporar factores adicionales que proponen mejoras en la metodología y una mayor integración de los AC con otros modelos para avanzar en la planificación urbana y la inteligencia territorial.

* Doctor en Ciencias Aplicadas. Profesor-investigador del Tecnológico Nacional de México y el Instituto Tecnológico de Chihuahua, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-2011> ; correo: ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx; Scopus: 55625416500

** Doctor en Ciencias Aplicadas. Profesor-investigador de la Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1883-3890>:

*** Doctorando en Urbanismo. Profesor del Tecnológico Nacional de México-Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-4119>

Palabras clave: *Crecimiento urbano, Autómatas Celulares, reglas de transición, dinámica espacio temporal.*

Introducción

El crecimiento urbano ha derivado en cambios sociales, económicos y tecnológicos, particularmente en ciudades que tienen más de un millón de habitantes. Regularmente, conduce a un desarrollo lento en los servicios básicos que son destinados para la población y limita la capacidad de carga de las ciudades. Comúnmente en las periferias de las ciudades causa consecuencias negativas para en el dinamismo del desarrollo urbano y deteriora el medio ambiente a escalas inusuales (Burak *et al.*, 2017).

Las investigaciones sobre los mecanismos del crecimiento urbano son relevantes para los planificadores, gobiernos y tomadores de decisiones que tratan de mejorar la comprensión de la sostenibilidad urbana. Los Autómatas Celulares (AC) es una herramienta que ayuda a entender la complejidad de los sistemas urbanos. Es una técnica que potencializa las simulaciones para predecir y comprender la transformación urbana en el espacio y el tiempo (Musa *et al.*, 2017).

La técnica de AC es poco utilizada en México por las partes interesadas en pronosticar y evaluar el potencial sobre los beneficios sociales y resultados ambientales del desarrollo urbano antes de su implementación (Jiménez-López *et al.*, 2018). Esta técnica otorga información sobre la dinámica urbana y las complejas relaciones entre los cambios urbanos, el desarrollo socioeconómico y los sistemas sustentables (Li *et al.*, 2017).

Los AC son un modelo dinámico discreto con ventajas únicas para simular problemas complejos no lineales (Jiménez-López, 2022). Data de la década de 1940, cuando S. Ulan y J. von Neumann consideraron la posibilidad de una máquina autorreplicable. Wolfram, en 1984, demostró las capacidades que tiene el análisis de AC para modelar procesos naturales complejos y generar cambios a través de interacciones locales entre componentes vecinos.

La aplicación del modelo de AC genera espacios celulares; con esto, la investigación geográfica incorporó por primera vez a los sistemas de infor-

mación geográfica (SIG) que llevaron a la simulación de situaciones urbanas del mundo real. (White *et al.*, 2015).

La creciente popularidad de los AC en el modelado urbano podría atribuirse en gran medida a su simplicidad, flexibilidad, controlabilidad y capacidad para incorporar el espacio y el tiempo en los procesos de desarrollo urbano. Los AC puede simular sistemas urbanos no lineales por medio de reglas simples que pueden funcionar con datos de sensores remotos y SIG (Musa *et al.*, 2017). Se afirma entonces que la técnica de AC es más conveniente a utilizar en comparación con modelos basados en agentes, metodologías desarrolladas en las últimas décadas (Yin *et al.*, 2018).

La integración de AC con SIG proporciona una herramienta poderosa para realizar cálculos complicados basados en datos locales produciendo mejores resultados que las ecuaciones diferenciales (Musa *et al.*, 2017). Por otro lado, los AC en el modelado urbano no generan errores en la entrada de los datos espaciales, por ello crea certidumbre inherente en el manejo de la cantidad de datos (Liu *et al.*, 2021).

Los AC simulan la expansión urbana, se convierten en una técnica espaciotemporal que aborda diversos problemas. En este trabajo se hace una descripción general de los conceptos básicos y las modificaciones que al uso de AC para el modelado urbano. Por ende, el objetivo es proporcionar una visión general de la definición, modificación y aplicación de AC en la planificación urbana desde las perspectivas de celda, espacio celular, vecindad, paso de tiempo y regla de transición; tácitamente, se realiza la recopilación de los datos requeridos.

Metodología y recopilación de datos

Los componentes básicos de AC son espacio celular, celda, vecindad, pasos de tiempo y reglas de transición, donde cada componente tiene implicaciones geográficas que se aprovechan para hacer la unión de dos disciplinas (Feng y Tong, 2020). El espacio celular representa el espacio geográfico bidimensional compuesto por celdas regulares. Los estados de las celdas se pueden decir que son las condiciones iniciales del sistema que representa a los diferentes usos de suelo. Una de las partes fundamentales del modelo de

AC son las reglas de transición, cada celda cambia constantemente de acuerdo con su estado y la regla de transición con el paso del tiempo discreto. (Jiménez-López *et al.*, 2018)

El espacio celular es una cuadrícula regular compuesta de celdas cuadradas y particularmente adecuadas para el procesamiento por computadora y compatible con datos de los mapas generados. El espacio celular puede ser tridimensional para representar el crecimiento vertical de las áreas urbanas (Jiménez-López y López-Rivera, 2023). Para aproximar los AC a procesos de simulación más reales se necesita modificar dos componentes como son el espacio de celda, que puede basarse en unidades espaciales irregulares; generalmente se representa como un polígono que refleja el uso de la tierra, el tamaño de la población y las condiciones económicas. Las celdas células, parcelas o bloques regulares proporcionan una buena representación de la realidad, pero conducen a definiciones complicadas de vecindad. El espacio de las celdas normalmente se propone homogéneo en el AC determinista, lo que indica celdas idénticas y exclusivas caracterizadas por su estado; sin embargo, la gran influencia de los atributos en los cambios de uso de la tierra, como como la accesibilidad al transporte o las condiciones físicas, varían la idoneidad de las diferentes celdas para determinados usos de suelo (Valdez, 2019)

El segundo componente es la vecindad, suele haber dos tipos de vínculo. En AC determinista, la vecindad es isotrópica y homogénea para cada celda y consta de un conjunto finito de celdas geoméricamente más cercanas (i. e. vecindad de Neuman y Moore). En aplicaciones urbanas, se adopta una vecindad extendida para considerar los efectos del vecindario en los efectos de las entidades geográficas (White *et al.*, 2012). El tamaño del vecindario puede extenderse a una distancia especificada y se suele introducir una ponderación según la distancia, para considerar el efecto de la disminución de la distancia. Si se basa en unidades irregulares, las unidades adyacentes dentro de una cierta distancia o grado de proximidad se utilizan para representar un vecindario (Xia *et al.*, 2018).

La modificación que se aplica es la vecindad no estacionaria, que define diferentes espacios de vecindad para células que son tomadas al azar en una forma discreta (Jiménez-López *et al.*, 2018). Como núcleo del modelo AC, las reglas de transición generalmente implican modificaciones sustanciales,

considerando las particularidades y complejidad de aplicaciones específicas. Las reglas de transición originales sólo dependen de los estados de una célula y sus vecinos cercanos. Dado que los procesos urbanos están influenciados por numerosos factores, se modifican las vecindades para considerar los efectos externos. Los AC tienen la característica de ser flexibles, las reglas de transición se pueden definir de diferentes maneras según las preferencias de cómo se modela la ciudad.

La aleatoriedad e incertidumbre del crecimiento urbano puede reflejarse en la estructura de la simulación. En AC determinista, las reglas de transición son estáticas y las mismas en cada paso del tiempo. Sin embargo, en un espacio lineal o unidimensional las células adyacentes sólo pueden ser tres, las que necesariamente comparten frontera y que generan ocho combinaciones posibles. El número de reglas de transición o de instrucciones posibles para la evolución de un AC determinista de tres bits en un espacio lineal generan en un factor de 2^n , con $n=8$ que otorga 256 reglas de transición posibles para simular la evolución de un modelo de AC de tres bits en el espacio lineal (Padilla *et al.*, 2015).

Los pasos de tiempo en una AC determinista son discretos, lo que supone que el crecimiento urbano ocurre al mismo tiempo. El estado futuro en la cuadrícula depende de las reglas de transición y de su estado en el período anterior. En este trabajo se propone no realizar la segregación de los datos en el primer renglón.

La clave es encontrar la regla de transición que mejor simule el proceso de expansión urbana para cada ciudad que participa en el experimento, de entre el conjunto de 256 reglas de transición posibles. Para lograrlo, se requieren por lo menos dos cosas: *i*) probar todas las reglas de transición (las 256); y *ii*) contar con indicadores de bondad de ajuste que valoren la similitud de los resultados del modelo de AC con la realidad observada, para medir la precisión de cada regla de transición. En este trabajo se estiman ambos parámetros.

Un AC determinista se puede expresar matemáticamente en la ecuación:

$$\gamma = (d, S, H, \delta)$$

donde d representa el espacio n — *dimensional*, S el conjunto de estados, H el espacio de vecindad y δ las reglas de transición. Los AC deterministas son fáciles de combinar con otros métodos, técnicas y modelos para mejorar las capacidades de simulación en aplicaciones específicas (Gounaridis *et al.*, 2019).

La naturaleza sencilla de AC determinista limita la capacidad de representar en el mundo real fenómenos geográficos. En la adaptación del modelo en aplicaciones urbanas, se deben incluir las particularidades de los procesos geográficos para representar heterogeneidad geográfica, que conduce a la relajación de los componentes originales de AC. Por ejemplo, las características geográficas del vecindario pueden ser incorporado en AC que simplifica las estructuras basadas en reglas. Al integrar las bases de datos SIG, vuelve más poderosa la simulación de la estructura urbana por la gran cantidad de datos que se manejan en una imagen de satélite de una ciudad, todo esto desarrollado para formular escenarios de planificación.

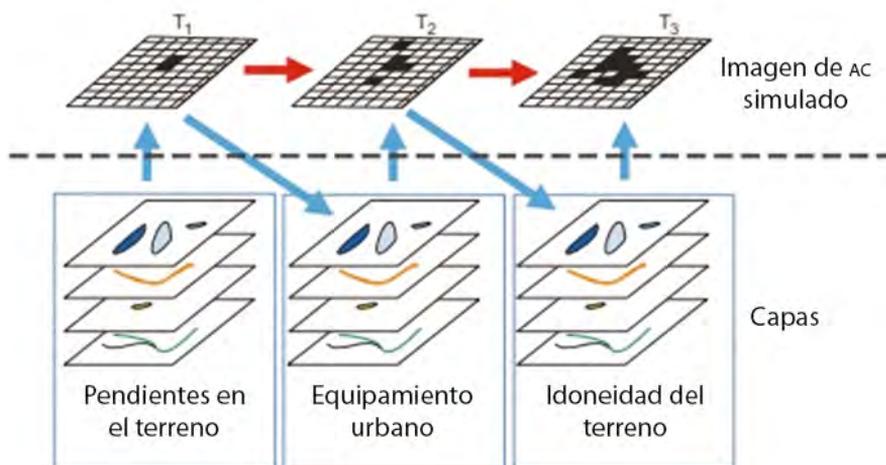
Se supone que la evolución de la ciudad se aproxima a la realidad, ciudades que están influenciadas por una serie de factores que son posibles de introducirse a la simulación, tales como pendientes del terreno, leyes de construcción (i. e. zonas donde no es posible construir), zonas restringidas para recargas acuíferas, zonas donde la elevación del terreno es mayor a 30 grados, probabilidad de transición, entre otros muchos factores. Se recomienda utilizar algunos factores o restricciones para regular la simulación y mejorar el rendimiento del modelado.

Figura 1. Partes fundamentales de AC en la regla de transición

Célula en la vecindad ($x-1, y-1$)	Célula central (x,y)	Célula en la vecindad ($x+1, y+1$)
---	-----------------------------	---

Fuente: elaboración propia.

Al juntar AC con el Sistema de Información Geográfica se desarrollan escenarios de planificación muy importantes y se otorga información valiosa. Dependiendo de la regla de transición, la evolución de la ciudad está influenciada por una serie de factores complicados que pueden definirse en niveles locales. Se debe hacer notar que deben utilizarse algunas restricciones para regular la simulación y mejorar el rendimiento del modelo pro-

Figura 2. Modelo de AC determinista e imagen base de ciudad en estudio

Fuente: elaboración propia.

puesto. Sin restricciones, la simulación urbana generará patrones habituales basados en tendencias históricas.

En las últimas décadas, este tipo de modelos AC unidos a SIG puede reflejar consideraciones ambientales y de desarrollo sostenible. Al modelo AC determinista se le pueden agregar factores importantes para la formación de patrones idealizados, donde se toma en cuenta no sólo la influencia de los estados vecinos, sino también una serie de factores económicos y medioambientales. Estas limitaciones pueden incluir la idoneidad ambiental, las formas urbanas y densidad de desarrollo (Jiménez-López *et al.*, 2018).

Evaluación crítica de metodologías en el contexto del crecimiento urbano

A pesar de este desarrollo, aún no se tiene un consenso en la comunidad científica respecto a los métodos a utilizar en el modelado del crecimiento urbano, ya que no existe una opinión generalizada de las normativas del desarrollo urbano. El comportamiento urbano es el resultado de procesos complejos y generalmente no lineales, donde cada urbe tiene un conjunto

de caracteres particulares, es decir, que son no estacionarios, que responden a un contexto específico, como dimensión espacial entre los procesos y a problemas multiescala (McGarigal *et al.*, 2018).

Lo anterior hace necesario el abordaje complejo del problema, lo cual se traduce en el análisis de distintas variables: económicas, sociales y políticas, que conviven en diferentes escalas temporales y que condicionan procesos como: el tamaño de la urbe, la forma de la ciudad y la satisfacción de necesidades para el desarrollo y, por consecuencia, el manejo de la aleatoriedad. El crecimiento urbano es también un proceso marcadamente espacial. Las normas políticas adoptadas por los gobiernos y las especulaciones privadas inmobiliarias provocan una gran heterogeneidad espacial. Diferentes zonas del área metropolitana tienen grados de atractivo distintos, lo que deja su impronta en forma de nudos de expansión, tejido abandonado, infraestructuras infrautilizadas o mala integración de este tipo de entornos (Garrocho *et al.*, 2020).

Los avances en modelos computacionales y en los métodos de análisis han permitido la demostración matemática de que modelos de este tipo están directamente relacionados con mecanismos similares de la ciudad real. Los AC tienen un carácter espacio-temporal que en cada instante de tiempo predeterminado se representa un estado espacio-temporal a partir del anterior. Destacamos que este último promueve un modelamiento flexible. La principal ventaja deriva de su paralelismo y se deduce del hecho de que, a través de una regla sencilla, el AC sea capaz de manejar razonablemente bien la divergente situación de las múltiples entidades locales aun cuando estas entidades interactúan de distintas formas y tiempos (Jiménez-López *et al.*, 2018).

Las fortalezas de los AC en el modelado del crecimiento urbano se cumplen en diferentes aspectos: *a)* pueden modelar convenientemente la necesidad de disposición espacial de los agentes, en nuestro caso, píxeles de la imagen: esta necesidad lleva implícitamente a la existencia de un crecimiento por unidades de nuevo uso, incluso también a la regeneración de zonas con mayores posibilidades de accesibilidad (por ejemplo, habría ciertas posiciones de la malla con mayores posibilidades de ser zonas inundables de la mancha urbana, con ello valores inmobiliarios diferentes, llegando a ser un fenómeno especulativo) (Garrocho *et al.*, 2021). *b)* la simpleza general

del modelo, junto a la existencia de un número reducido de parámetros conduce a que los nuevos espacios vacíos se crean a continuación de los ya ocupados, de forma isotrópica. Si consideramos que la célula por medio de una intervención aleatoria dispone de una serie de direcciones posibles, precisa verificar si hay espacio libre en las celdas/células vecinas que respondan a sus criterios; si no es así permanecerá en la actual un determinado tiempo antes de disponerse a intentar buscar otro espacio más factible. A escala urbana, la rezonificación y los planes de construcción suelen inducir los cambios espaciales de los que puede depender gran parte del crecimiento. El proceso urbanístico presenta una complejidad imposible de ser tratada con las herramientas del análisis econométrico que demande una información concreta (Jiménez-López y Cadena, 2024).

Las debilidades de los Autómatas Celulares en el modelado del crecimiento urbano, se identifica como aquellos relacionados con la definición de falta en la concepción de algunas reglas de comportamiento. Otra debilidad es la identificación de problemas y limitaciones derivados del empleo de algunos factores seleccionados. Por último, algunas proyecciones que insinúan reformulaciones del modelo, así como la posibilidad de establecer relaciones con otros modelos de crecimiento urbano (Jiménez-López, 2018).

Las metodologías alternativas al modelado con AC se centran en enfoques que responden a la falta de información y modelado de procesos dentro de las comunidades locales donde la información es limitada. Esto se encuentra en la modelación econométrica o estadística del crecimiento, demanda de suelo, cambio de uso del suelo; el modelado de relaciones o modelos espaciales, que consideran interacciones espaciales explícitas, generalmente con la ayuda de SIG. Por otro lado, están los enfoques hedónicos que usan información zonal o de vecindad con respecto al entorno que los rodea, información de vecindad o barrio específico, influencia del momento de ciertas actividades. El tercer acercamiento es el modelado basado en agentes. Este resulta ser una forma de modelación fuertemente fundamentada en los aspectos teóricos. Provee al análisis la introducción de sistemas complejos encontrados en la realidad y ofrece la posibilidad de derivar procesos explicativos y no sólo descriptivos del desarrollo urbano. Los sistemas multi-agente permiten al investigador explicitar las localizaciones, atributos

especiales y reglas de decisión, las cuales cobran interacciones entre agentes y el entorno (Jiménez-López y Cadena 2024).

Recopilación de datos y calibración del modelo

Los AC deterministas normalmente requieren una gran cantidad de datos. Los datos de teledetección se utilizan a menudo para monitorear, medir las alteraciones y características de los cambios de uso del suelo. Las imágenes son obtenidas mediante teledetección de mapas de uso de la tierra. Con diferentes tiempos de la misma área se puede utilizar para la calibrar, validar y realizar simulaciones del modelo. Además, se le pueden agregar factores con las redes de tráfico, los atributos naturales (i.e. pendientes en el terreno) y otros

Los factores físicos se utilizan comúnmente para evaluar la idoneidad de la tierra para el desarrollo. Los planes de uso de la tierra pueden proporcionar información sobre el desarrollo de la tierra. Muchos estudios han utilizado datos socioeconómicos, como la densidad de población, para producir resultados de simulación más realistas.

La calidad de los datos de estas fuentes de entrada es una preocupación en las aplicaciones de AC determinista (Aburas *et al.* 2016). Se adopta la clasificación semi-supervisada para clasificar las imágenes en diferentes tipos de uso del suelo, es decir urbano y no urbano. En el software SIG se utilizan herramientas para visualizar mapas con diferentes resoluciones espaciales para análisis comparativos.

En este trabajo se utilizan cuatro etapas enfocadas a la generación del mapa sobre el área de estudio. El primero paso es obtener la imagen, que es la ubicación de la imagen en formato raster (i.e. imagen en píxeles), determinando sus características, así como los repositorios donde se puede descargar. El segundo paso es el preprocesamiento, que realiza correcciones sobre las imágenes: radiométricas, geométricas y atmosféricas, lo que elimina los errores producidos en el momento de la captura. El tercer paso es la combinación de bandas espectrales, que es la parte fundamental de una imagen de satélite, destacando la zona de interés, área urbana. La combinación de las bandas se realiza mediante una herramienta codificada en el lenguaje de programación Python con el método Brovey que realiza opera-

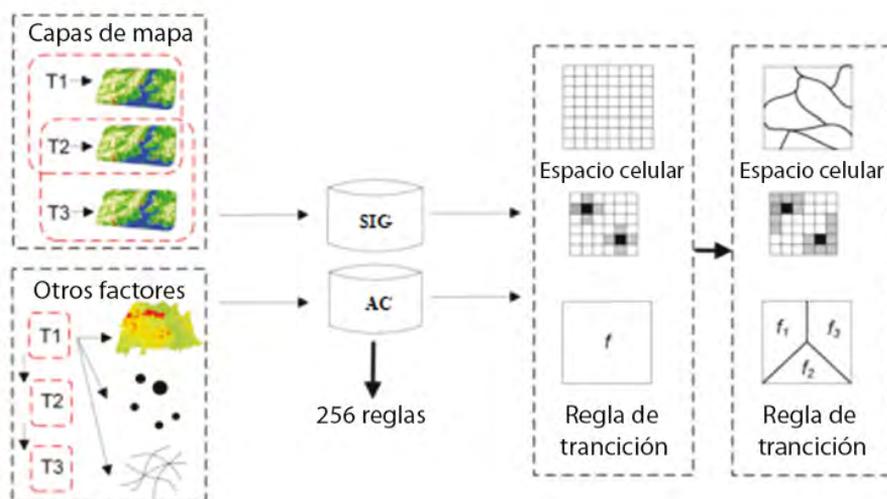
ciones entre las diferentes bandas de baja resolución. El resultado se produce multiplicando las bandas pancromáticas previamente normalizadas como se muestra en la ecuación:

$$B_i = \frac{B_i}{B_1 + B_2 + \dots + B_n} (PANC)$$

Donde $i=1,2,\dots,n$ representa el número de bandas espectrales que se combinan pueden ser $i=1,2,\dots,n$ y $PANC$ son las bandas pancromáticas. La cuarta etapa es la clasificación, donde se realiza una separación de clases según los diferentes tipos de áreas presentes en la imagen satelital: área urbana, vegetación, agua, entre otras. Esta etapa genera imágenes binarias que son entradas para la AC.

La utilización de AC determinista puede proporcionar resultados significativos, especialmente para la planificación urbana, debido a errores inherentes e incertidumbre. En general, considerando los dos aspectos anteriores, el modelo se puede describir con el diagrama de flujo que se muestra en la Figura (3).

Figura 3. Pasos de modelo de AC determinista



Fuente: elaboración propia.

Aplicación de determinista en la planificación urbana

El desarrollo de AC para aplicaciones urbana y regional está considerablemente influenciado por el uso previsto y la funcionalidad del modelo. Se trata de aplicar el modelo de AC determinista para explorar la complejidad espacial, probar teorías e ideas urbanas y como herramienta de planificación de soporte (ver figura 4).

Para explorar la complejidad espacial, el modelo de AC determinista se utiliza para avanzar en la comprensión de la ciudad de Toluca-México, que se observa como un sistema complejo, adaptativo y dinámico. Como todo modelo es perceptible a limitaciones en el formalismo AC, que se requiere para el modelo aplicado en la exploración de los principios que rigen el desarrollo urbano espacial. AC es la combinación de una estructura espacial, un conjunto de estados y reglas de transición donde se propone la idea principal de este trabajo.

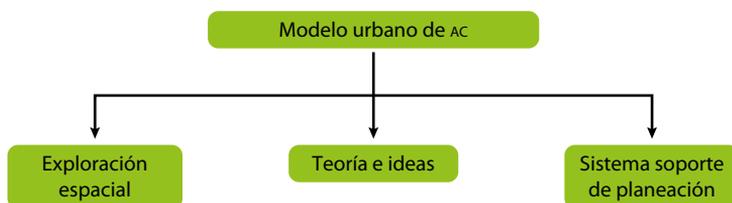
La aportación que se realiza tiene una idea detrás de AC que es encontrar elementos simples como la complejidad en la ciudad y comparar estos elementos con modelos generados en el mismo sistema, realizar la simulación de las 256 reglas de transición, estas reglas se pueden generar con tres bits (i.e. los bits vecinos a sus lados) y obtener que regla simula mejor a la ciudad.

Los AC se tomaron como una herramienta bien conocida por sus elementos para mostrar cómo se puede producir el desarrollo espacial a partir de reglas simples. En varios trabajos que se han realizado la ciudad de Toluca ha mostrado su gran valía para explorar la complejidad espacial, se ha tratado de ajustar las investigaciones al desarrollaron con la teoría fractal, caos, no linealidad, gráficos por computadora y complejidad (Jiménez-López *et al.*, 2018).

AC se puede utilizar para probar teorías e ideas de desarrollo urbano, examinando los roles de la complejidad en la dinámica impulsora de los procesos urbanos, como la expansión urbana, la difusión, el policentrismo, entre otras. Encontrar la mejor regla de transición que describa el crecimiento urbano, esto significa encontrar la mejor relación de vecinos cercanos que describa el crecimiento de la ciudad. Es la clave para desarrollar vínculos estrechos y directos entre las zonas dentro de la ciudad.

Las reglas de transición derivadas de las teorías urbanas pueden ayudar a explorar varias ideas hipotéticas sobre las ciudades. Las relaciones complejas entre los procesos físicos, socioeconómicos y los entornos urbanos se han explorado como la ecología, el diseño y la sociología urbanas (Batty 1998; Barredo *et al.*, 2003). Sin embargo, los modelos AC en la teoría urbana a menudo se preocupan con detalles sobre cómo construir el modelo, pero no explican las teorías que pretendían desarrollar y no llegan a un avance significativo (Torrens y O'Sullivan, 2001). El uso de modelos de AC urbana como sistemas de apoyo a la planificación requiere modificaciones como se expresa en la figura 4.

Figura 4. Aplicaciones potenciales del modelo AC determinista



Fuente: elaboración propia.

Dos aplicaciones mostradas en la figura 4 están encaminadas a producir resultados más realistas y relevantes con la ayuda del modelo de AC en la planificación, gestión y políticas urbanas. Estos modelos de AC sirven como herramientas de apoyo en la inteligencia territorial que pueden ayudar a los gobiernos, planificadores y partes interesadas a evaluar los beneficios sociales y las consecuencias ambientales y ecológicas de los diferentes objetivos, opciones y políticas de planificación.

Estos tipos de modelos de AC determinista, incluyendo los límites del crecimiento urbano, la evaluación de opciones de planificación urbana y la prevención del desarrollo ilegal en las periferias (Xia *et al.*, 2020) utilizan los siguientes conceptos que son utilizados en la investigación; 1) construir una línea base simulación y predicción del crecimiento; 2) evaluar el desarrollo existente en comparación con desarrollo óptimo; 3) simular alternativas de

desarrollo, de acuerdo con diferentes objetivos de planificación para ayudar al proceso de planificación urbana.

La planificación urbana y la inteligencia territorial van de la mano, se han convertido en una parte importante de la planificación territorial para delimitar el crecimiento de la ciudad. El objetivo es garantizar un crecimiento urbano inteligente, que pueda aumentar la densidad de servicios urbanos y proteger los ecosistemas naturales circundantes. Se ha tratado de introducir elementos importantes en el diseño de planes de uso de suelo en ciudades mexicanas.

Las ciudades en México necesitan frenar su caótica expansión urbana mediante la delimitación de dónde puede crecer y dónde no, para sostener las reservas de tierras agrícolas que cada vez son menores. La inteligencia territorial debe comprender el mecanismo de la dinámica urbana y considerar varios factores geográficos. Estos modelos pueden ayudar a los planificadores a delimitar la futura expansión urbana desde una perspectiva de optimización espacial. Tradicionalmente, los modelos de evaluación de la idoneidad del uso de la tierra proporcionan una forma sencilla de delimitar el crecimiento de la ciudad (Chettry y Surawar, 2021).

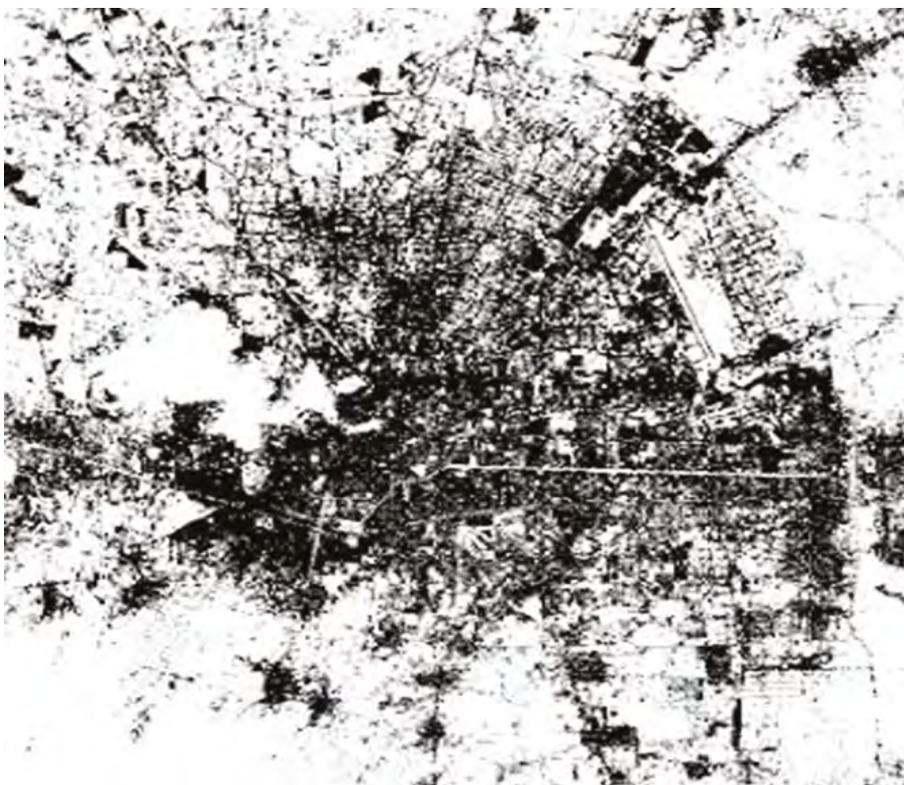
Un problema importante de las ciudades que cambian mucho en el tiempo es que son influenciadas por actividades antropogénicas y procesos naturales. Los métodos basados en la idoneidad ignoran las características del paisaje durante la delineación de planes de decrecimiento (Santé-Riveira *et al.*, 2008). Este enfoque requiere técnicas eficientes y factibles para establecer los límites. Los AC puede satisfacer múltiples objetivos en la delimitación de la ciudad, incluida la máxima idoneidad urbana y la preservación de tierras agrícolas de alta calidad, zonas de recarga de agua, equipamientos urbanos como calles y parques en la ciudad (Ma *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2018).

En este trabajo utilizamos *python* y *ArcGIS*, como herramienta eficaz para realizar la simulación de AC urbana y delimitar el crecimiento al agregar capas que afectan o limitan el crecimiento de la ciudad lo cual implica varios procedimientos. Primero, recuperamos las variables espaciales y datos de uso de la tierra, elevaciones-uso para estimar la probabilidad de transición de cada tipo de uso de la tierra. En segundo lugar, se realizan las simulaciones entrenando al sistema. Este entrenamiento consiste en introducir escenarios de línea base, desarrollo de zonificación económica y es-

cenarios de crecimiento urbano excesivo. Tercero, realizamos la simulación de la mejor regla encontrada de AC determinista y con ello podemos hacer una comparación del crecimiento con otra imagen de la ciudad en otro instante para encontrar un error inherente a la simulación.

El modelo propuesto en este trabajo puede encontrar restricciones de probabilidad y escenarios múltiples, así como otros factores de restricción. En este trabajo se propone un periodo de simulación que comprende de 2020-2030, en la figura 5 se muestra la ciudad de Toluca generada por el modelo para 2020.

Figura 5. Ciudad de Toluca para 2020



Fuente: elaboración propia.

En la figura 6 se muestra un ejemplo del uso de AC determinista, el área de estudio es la ciudad de Toluca que tiene una característica importante y

muy desarrollada en muchas urbes en el mundo, que está integrada por seis municipios, que es una de las aglomeraciones urbanas de más rápido desarrollo en México proyectadas para 2030. Se utiliza para guiar futuros planes maestros urbanos que pueden evitar el desperdicio de recursos de tierra.

Figura 6. Simulación de AC determinista en el área de estudio de Toluca 2030



Fuente: elaboración propia.

Conclusión

El modelo de AC determinista tiene fortalezas y debilidades. La simulación del rápido desarrollo urbano con modelos de AC se debe principalmente a su sencillez. Sin embargo, la simplicidad del modelo limita la AC que tiene la capacidad de representar fenómenos urbanos realistas, lo que lleva a modificaciones extensas e introducción de complejidad en el modelo. Aparece un cuestionamiento sobre si estos modelos constituyen simulaciones muy

cercanas a la realidad y si son demasiadas las modificaciones a AC que lo constituyen en otro sistema de simulación.

Un punto fuerte de AC determinista es la flexibilidad, que permite su acoplamiento en diferentes aplicaciones. La flexibilidad puede causar confusión y dificultades para los usuarios si no existe una definición estándar de reglas de transición o cuál se aplica. Encontrar el equilibrio entre sencillez y realismo es una característica de los modelos descriptivos, así tenemos un modelo flexible y estandarizado.

El modelo de AC es descriptivo, es decir, que tiene la capacidad para examinar ideas hipotéticas relacionadas con las ciudades. Las imágenes capturadas por satélite, se convierten en nuestros datos de comparación, que pueden variar mucho entre lapsos de minutos, horas, días, por diferentes razones de captura. En este trabajo se propone un método para realizar una buena aproximación de estas imágenes utilizadas por el modelo de AC determinista. Esta aplicación reduce tiempo en el mejoramiento de la imagen obtenida y así no modificar o rediseñar la simulación.

Además, AC determinista está diseñado para operar en *ArcGIS* (un complemento de *software* que se ejecuta en *ArcGIS Desktop*) se ha desarrollado para proporcionar las funciones completas de simulación, predicción, optimización y visualización de una variedad de patrones geográficos y procesos dinámicos, como cambios en el uso de la tierra, evolución urbana, zonificación de áreas naturales para su protección e instalaciones. Como el único *software* que integra la simulación espacial y la capacidad de optimización, AC determinista para *ArcGIS* comprende un simulador y optimizador geográfico, acoplando sus resultados para resolver problemas complejos de simulación y optimización espacial.

El problema que ha surgido en AC determinista es que a los gobiernos o a los planificadores no les interesan estas herramientas de simulación para así tomar mejores decisiones. Muchos usuarios tienen dificultades para obtener detalles de los datos de entrada, especialmente las fechas en las que se obtuvieron. Un ejemplo de esto es el equipamiento urbano que existe en la ciudad, que se construyó después del período simulado y que fue utilizado en la simulación, lo que hace que la simulación sea algo cuestionable.

Se evalúan los resultados de su simulación comparando el mapa simulado con el mapa de referencia de toda el área de estudio, pero no pudo

comparar el porcentaje de errores con el porcentaje de áreas convertidas. Utilizaron métricas erróneas para evaluar el desempeño del modelo, por lo que se proponen nuevas métricas en otros trabajos realizados por este equipo. Unas soluciones pertinentes son separar la información de calibración, desde información de validación a través del espacio (seleccionando píxeles aleatoriamente), en lugar de a través del tiempo (utilizando un mapa urbano de otro año).

Se necesitan más estudios para proporcionar nuevos conocimientos sobre los usos de AC en teorías geográficas y urbanas. La integración de modelos de AC determinista y otros modelos puede superar las debilidades de la AC, como ocurre con los modelos económicos, mejorando así el rendimiento del modelo. Se trabaja en hacer más esfuerzos para mejorar AC mediante la incorporación de interacciones a nivel micro y procesos múltiples. Se propone estudiar las bifurcaciones espaciales, que se refieren al hecho de que, en una pequeña superficie lisa, el cambio en los valores de los parámetros puede causar un cambio repentino en el comportamiento del modelo.

Los modelos de AC determinista no deben usarse para proporcionar predicciones exactas de los sistemas urbanos, pero sí para simular interactivamente diferentes escenarios hipotéticos para la implementación de políticas mediante la modificación de la norma. Una aportación que puede ser destacada es la de incorporar factores del cambio climático en la inteligencia territorial y la planificación urbana, como los efectos de las islas de calor, cambios en la producción agrícola, cambios hidrológicos y cambios en los patrones de uso de la tierra. Esta integración puede facilitar la simulación de cambios futuros en las coberturas terrestres globales y regionales. La simulación de la evolución urbana con categorías de suelo urbano más finas deber a ser atractivas para la práctica de planificación real con la incorporación de *big data* o datos de redes sociales.

Para concluir, las diferentes metodologías se han categorizado según su aplicación entre los diversos estudios, por tanto, para trabajos futuros se destacan y desarrollan los AC con información espacial a nivel local y a escala regional, siendo complicado deslindar el proceso de crecimiento de otros posibles factores que operan con influencias de escalas menores, para lo que se necesitaría idealmente contar con información para todo el periodo de análisis o en su defecto, a través de la generación de escenarios

adecuados que formen parte de otros muchos trabajos, posiblemente como resultado del largo y costoso proceso de recopilación de la información para los múltiples factores que inciden en el crecimiento.

Referencias

- Aburas, M; Ho, Y; Ramli, M; Asháari, Z. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380-389.
- Barredo, J; Kasanko, M; McCormick, N; Lavalle, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and urban planning*, 64(3), 145-160. <https://goo.su/7kRT36>
- Batty, M. (1998). Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. *Environment and planning A*, 30(11), 1943-1967. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/a301943>
- Burak, G; Zhou, Y; Üрге-Voorsatz, U; Gupta, M; Yu, S; Patel, P; Fragkias, M; Li, X; Seto, K. (2017). Global scenarios of urban density and its impacts on building energy use through 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8945-8950. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1606035114>
- Chetry, V; Surawar, M. (2021). Delineating urban growth boundary using remote sensing, ANN-MLP and CA model: a case study of Thiruvananthapuram urban agglomeration, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(10), 2437-2450. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-021-01401-x>
- Feng, Y; Tong, X. (2020). A new cellular automata framework of urban growth modeling by incorporating statistical and heuristic methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(1), 74-97. <https://onx.la/f349a>
- Garrocho, C; Jiménez-López, E; Chávez-Soto, T. (2020). Expansión de la ciudad: un instrumento de simulación de escenarios para los sectores público y privado. *La situación demográfica de México 2020*, 2(2).
- Garrocho, C; Chávez-Soto, T; Jiménez-López, E. (2021). Autómata Celular Metro-NASZ: laboratorio experimental de expansión urbana. *CONAPO, La situación demográfica de México*, 149-175.
- Gounaridis, D; Choriantopoulos, I; Symeonakis, E; Koukoulas, S. (2019). A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales. *Science of the Total Environment*, 464, 320--335. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718328006>
- Jiménez-López, E; Chávez-Soto, T; Garrocho, C. (2018). Modelando la expansión urbana con autómatas celulares: aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial (Christaller). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica, Geosig*, 12, 1-26. <https://onx.la/97efe>

- Jiménez-López, E. (2022, June). Inverse Filter in the Growth of Urban Sprawl with Cellular Automata Model. In *Complex Systems and Their Applications: Second International Conference (EDIESCA 2021)* (pp. 231-247). Cham: Springer International Publishing. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-02472-6_12
- Jiménez-López, E; López-Rivera, L. (2023). Artificial neural networks in the application of the growth of the urban sprawl. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(21), 109-119. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/10565>
- Jiménez-López, E. y Cadena Vargas, E. (2024). Probabilidad de Crecimiento de la Mancha Urbana de Toluca con Autómatas Celulares. *CIENCIA ergo-sum*, 32.
- Li, X; Chen, Y; Liu, X; Xu, X; Chen, G. (2017). Experiences and issues of using cellular automata for assisting urban and regional planning in China. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(8), 1606-1629.
- Liang, X; Liu, X; Li, X; Chen, Y; Tian, H; Yao, Y. (2018). Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and urban planning*, 177, 47-63.
- Liu, Y; Batty, M; Wang, S; Corcoran, J. (2021). Modelling urban change with cellular automata: Contemporary issues and future research directions. *Progress in Human Geography*, 45(1), 3-24.
- Ma, S; Li, X; Cai, Y. (2017). Delimiting the urban growth boundaries with a modified ant colony optimization model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 62, 146-155.
- McGarigal, K; Plunkett, E; Willey, L; Compton, B; DeLuca, W; Grand, J. (2018). Modeling non-stationary urban growth: The SPRAWL model and the ecological impacts of development. *Landscape and urban planning*, 177, 178-190.
- Musa, S; Hashim, M; Reba, M. (2017). A review of geospatial-based urban growth models and modelling initiatives. *Geocarto International*, 32(8), 813-833. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2016.1213891>
- Padilla, O; Pérez, P; Cruz, M; Huilcamaigua, S; Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 310-326.
- Santé-Riveira, I; Crecente-Maseda, R; Miranda-Barrós, D. (2008). GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and electronics in agriculture*, 63(2), 257-273.
- Torrens, P; O'Sullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?. *Environment and planning B: planning and design*, 28(2), 163-168.
- Valdez, R. (2019). Spatial diffusion of economic growth and externalities in Mexico. *Investigaciones Regionales-Journal of Regional Research*, (45), 139-160.
- White, R; Engelen, G; Uljee, I. (2015). *Modeling cities and regions as complex systems: From theory to planning applications*. MIT Press.
- White, R; Uljee, I; Engelen, G. (2012). Integrated modelling of population, employment and land-use change with a multiple activity-based variable grid cellular automaton. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(7), 1251-1280.

- Xia, C; Wang, H; Zhang, A; Zhang, W. (2018). A high-performance cellular automata model for urban simulation based on vectorization and parallel computing technology. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(2), 399-424.
- Xia, C; Zhang, A; Wang, H; Liu, J. (2020). Delineating early warning zones in rapidly growing metropolitan areas by integrating a multiscale urban growth model with biogeography-based optimization. *Land Use Policy*, 90, 104332.
- Yin, H; Kong, F; Yang, X; James, P; Dronova, I. (2018). Exploring zoning scenario impacts upon urban growth simulations using a dynamic spatial model. *Cities*, 81, 214-229.

