

Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano

F. AGUILERA BENAVENTE (1) & M. GÓMEZ DELGADO (2)
& C. C. CANTERGIANI (2)

(1) Laboratorio de planificación ambiental, Universidad de Granada
(2) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá

RESUMEN: En este artículo se presentan los modelos de simulación del crecimiento urbano como un instrumento útil para el proceso de planificación a través de la generación de simulaciones prospectivas y de escenarios futuros. Para ello se presentará una visión amplia acerca de algunos de los instrumentos de modelación existentes y su aplicabilidad en el contexto de diversos escenarios futuros aplicables en el estudio de las dinámicas del crecimiento urbano. Con especial detalle se presentarán los modelos basados en autómatas celulares (AC) y en multiagentes, como instrumentos para explorar la evolución del crecimiento en diferentes escenarios *posibles*, así como las técnicas de evaluación multicriterio (EMC), adecuadas para la definición de escenarios normativos o *deseables* que inspiren y guíen el proceso planificador.

DESCRITORES: Modelos de simulación prospectivos. Crecimiento urbano. Autómatas celulares. Técnicas de evaluación multicriterio.

1. Introducción: los modelos de simulación en las cuestiones urbanas

Los modelos de simulación en el campo del estudio de procesos y dinámicas urbanas son un instrumento de aplicación relativamente reciente (WEGENER, 1994), aunque su surgimiento se pueda ubicar allá por los años cincuenta (BATTY, 2005). No obstante los fundamentos teóricos sobre los que se asientan los modelos de simulación urbana pueden situarse aún más atrás en el tiempo, en trabajos como la teoría de los lugares centrales de Christaller y las modificaciones de Lösch, que comenzarían a influir de forma di-

recta o indirecta en el estudio de los cambios en los usos del suelo, así como en la búsqueda de patrones o tendencias en los mismos (BRIASSOULIS, 2000).

A lo largo de este período y hasta nuestros días, el enfoque con el que los modelos de simulación se han empleado en el ámbito de la planificación y en el estudio de las cuestiones urbanas, no ha sido el mismo, como de hecho tampoco lo es en las diferentes aproximaciones y trabajos que se realizan hoy en día.

A modo de ejemplo, y como brevísimo recorrido histórico, se puede señalar que en los años sesenta se depositaron grandes esperanzas

Recibido: 07.09.2010; Revisado: 28.09.2010
e-mail: franab@ugr.es
Los autores agradecen a los evaluadores anónimos sus comentarios para la mejora del presente trabajo.
Trabajo realizado en el marco del proyecto de I+D+i:

SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante TIG del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (referencia SEJ2007-66608-C04-00/GE0G).

en el desarrollo de los denominados *modelos de gran escala* para la planificación de los usos del suelo y del transporte. De este período destacan algunos modelos como los modelos gravitacionales, que fueron los primeros de estructura espacial urbana empleados (REIF, 1973), y especialmente el de Lowry, uno de los modelos más destacados en el contexto de la planificación de los usos del suelo, aplicado a la ciudad de Pittsburg (Estados Unidos). En el contexto del planeamiento racionalista dominante en el mundo anglosajón, se esperaba por parte de estos modelos la respuesta a los grandes problemas urbanos del momento: ubicación de zonas de actividad industrial, localización de empleos y áreas residenciales empleando instrumentos de zonificación, como si de la solución a una ecuación se tratase.

No obstante, pocos años después, muchas de las esperanzas de solución de los problemas urbanos a través del empleo de los modelos, terminaron frustradas con la crisis de dichos modelos en los años setenta, tras el conocido “*Requiem*” otorgado por Lee en 1973, en el que entre otros aspectos se criticaba sus elevados costes, elevada complejidad (que los convertía en cajas negras que no ayudaban a entender mejor las dinámicas urbanas) o el ultrarracionalismo de sus premisas. A pesar de que ese documento fue contestado por otros investigadores, no sería hasta los años noventa, con el gran impulso experimentado por la informática (BATTY, 1994) y los SIG (BOSQUE SENDRA, 1997) y los extraordinarios desarrollos de las áreas urbanas (FONT, 2004; EEA, 2006) cuando se vuelve a poner el foco en la simulación de procesos urbanos, generando una “nueva ola” de la simulación urbana (BENENSON & TORRENS, 2004). Este nuevo período de la simulación urbana, en el que la producción científica ha sido extraordinariamente prolífica (BATTY, 2005), debe caracterizarse en cualquier caso por un enfoque diferente al empleado en los años sesenta y setenta, que tantas críticas había suscitado. En este sentido, la diferencia debe radicar en que en el contexto actual los modelos de simulación no se deben entender como los instrumentos *definitivos* que decidirán por los planificadores cómo solucionar los problemas urbanos (BLECIC & CECCHINI, 2007) ni tampoco como *bolas de cristal* para predecir el futuro. Por el contrario, se deben entender como instrumentos que pueden ayudar a explorar diferentes posibilidades o escenarios de evolución de las dinámicas urbanas (crecimiento urbano por ejemplo), de acuerdo con las tendencias actuales del *pensamiento prospectivo* (BERDOULAY, 2009).

Este nuevo enfoque de la simulación urbana, al que podemos denominar de manera genérica *simulación prospectiva*, tendría como objetivo la generación de imágenes futuras *posibles* y/o *deseable/no deseables* que constituyan una importante herramienta de soporte a la planificación de estos ámbitos, ayudando a mostrar posibles consecuencias de tendencias, metas deseables a alcanzar, cambios necesarios para alcanzar determinados objetivos, generando imágenes diversas que faciliten una planificación más participativa, etc.

2. La simulación prospectiva del crecimiento urbano: imaginando el futuro a través del empleo de escenarios

Los modelos de simulación en lo que se ha denominado como *simulación prospectiva*, suelen emplearse de forma conjunta con el diseño de *escenarios*, entendidos estos como “*imágenes hipotéticas del futuro, lógicas y plausibles, formuladas para mostrar posibles situaciones consecuencia de procesos causales o de toma de decisiones*” (SCHWARTZ, 1991; CARJENS, 2009). De acuerdo con diversos trabajos en el ámbito de los *Future Studies* (MARIEN, 2002; BORJERSON & al., 2006; CARJENS, 2009) los futuros representados o imaginados a través de escenarios suelen corresponderse generalmente con situaciones *probables, posibles o deseables*, que dan lugar a diversos modos de pensar el futuro. Así, se puede pensar el futuro tratando de dar respuesta a preguntas del tipo *¿qué pasará?*, a preguntas como *¿qué puede pasar?* o *¿qué debería pasar?* En relación con ellas, se pueden identificar tres formas o modos principales de pensamiento futuro:

- **El pensamiento predictivo del futuro** intenta mostrar *lo que pasará* en un futuro, generalmente de carácter cercano, a través de la indagación de las posibilidades de evolución *más probables*. Por tanto, pone el énfasis en mostrar unos resultados que se correspondan lo mejor posible a la realidad, y por tanto en su validez.
- **El pensamiento exploratorio** está caracterizado por tratar de mostrar situaciones posibles de evolución futura basadas en la ocurrencia/ausencia de determinados eventos o decisiones tomadas. Por ello pone el énfasis en mostrar diversos contextos futuros y en estar preparados para tomar las decisiones más adecuadas en cada uno de ellos.

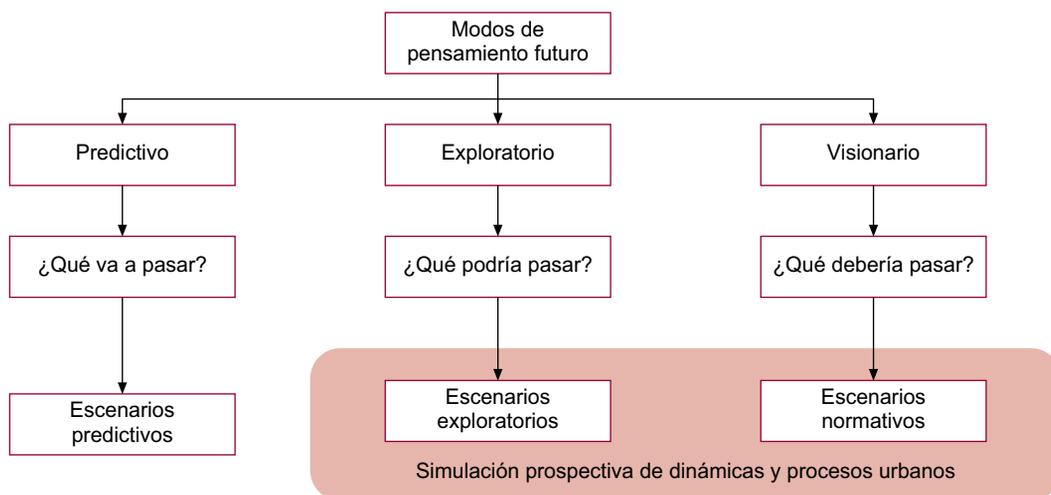


Fig. 1/ Tipos de escenarios según Borjerson, y modos de pensamiento futuro

Fuente: BORJERSON & al., 2006

- **El pensamiento normativo** trata por su parte de imaginar futuros “deseables” de acuerdo con un conjunto de diversos criterios. En este sentido, el énfasis reside en el establecimiento de parámetros deseables y en la forma de alcanzarlos.

Estos modos de pensamiento futuro, pueden constituir la base para el establecimiento de una clasificación de los diferentes escenarios, como la propuesta por BORJERSON & al., (2006) (Fig. 1), en la que destacan los siguientes tipos:

- **Los escenarios predictivos**, que se mueven en el campo del pensamiento futuro de lo probable, tienen como objetivo predecir lo que es probable que suceda en un plazo de tiempo generalmente corto. Aunque estos escenarios se han empleado con profusión en disciplinas como las ciencias naturales, la economía o la demografía, en el contexto del crecimiento urbano su aplicación es hoy en día discutible (SCHWARTZ, 1991; BERDOULAY, 2009), dada la dificultad (o incluso imposibilidad) de predecir fenómenos de carácter tan complejo como los procesos urbanos (BLECIC & CECCHINI, 2007). Por ello, se entiende que estos escenarios no sean los más adecuados para su aplicación en el ámbito de la simulación prospectiva del crecimiento urbano. Por el contrario, los otros dos tipos de escenarios sí tienen un encaje más adecuado en el pensamiento prospectivo, tratando de reflejar tanto futuros posibles (*escenarios exploratorios*) como deseables (*escenarios normativos*) de los crecimientos urbanos.

- **Los escenarios exploratorios**, en este ámbito, muestran *diversas* evoluciones *posibles* de los crecimientos, generalmente en una escala temporal del medio plazo, en función del comportamiento futuro de un conjunto de factores. A través de este tipo de escenarios, la *simulación prospectiva* puede explorar tanto las consecuencias de posibles decisiones tomadas en el proceso planificador, como de diferentes contextos socioeconómicos, facilitando el proceso de toma de decisiones y fomentando la discusión con los agentes implicados en el proceso planificador (BERDOULAY, 2009).
- **Los escenarios normativos** por su parte, permiten discutir e imaginar las metas deseables para el crecimiento urbano, así como de los instrumentos y criterios necesarios para poder alcanzarlas. A través del empleo de estos escenarios la simulación prospectiva también podría indagar sobre las formas, patrones e intensidades óptimos del crecimiento urbano, así como sobre los cambios necesarios para poder alcanzar dichas metas deseables.

3. Modelos para la simulación prospectiva del crecimiento urbano

Además de los escenarios, el instrumento fundamental de la simulación prospectiva está constituido por los modelos de simulación. La cantidad de instrumentos de modelización desarrollados a lo largo de todo el período de

simulación urbana es extraordinaria, empleando además metodologías de lo más diverso. Es por ello que para abordar el estudio de los modelos de simulación se han generado múltiples clasificaciones de los instrumentos existentes, atendiendo a criterios dispares. Así, para BRIASSOULIS (2000) algunos de estos criterios pueden ser la escala, el nivel de desagregación espacial, los tipos de categorías de ocupación urbana empleados, etc. Otros autores como PAEGELOW & CAMACHO (2008) apuestan por clasificaciones atendiendo a criterios metodológicos, distinguiendo fundamentalmente entre las técnicas de modelización, como pueden ser los modelos estocásticos, de inteligencia artificial, de lógica borrosa, etc.

No obstante, de acuerdo con los modos del pensamiento exploratorio y normativo de los que se sirve la *simulación prospectiva*, y sin pretender ni mucho menos realizar una clasificación exhaustiva, algunos de los principales modelos de simulación del crecimiento urbano se pueden presentar agrupados en dos grupos principales: aquellos de una mayor aplicabilidad para la simulación de *escenarios exploratorios* como pueden ser los modelos basados en autómatas celulares o basados en agentes; y aquellos de mayor aplicabilidad en la simulación de *escenarios normativos*, como son la EMC y la lógica borrosa. No obstante, esta división no supone que los diferentes modelos presentados tengan utilidad exclusiva para la simulación de escenarios de un único tipo, sino que es posible emplearlos en la simula-

ción de ambos, aunque sus principales características (flexibilidad, tipo de medio real o virtual, etc.) sí que los harán más idóneos para la simulación de uno u otro tipo (FIG. 2).

De todos los modelos presentados, a continuación se analizarán con mayor detalle aquellos de mayor aplicación y desarrollo en los últimos años en el ámbito de la simulación del crecimiento urbano (BENENSON & TORRENS, 2004; BATTY, 2005). Se trata de los modelos basados en autómatas celulares (AC), Modelos basados en agentes (ABM) y técnicas de EMC.

3.1. Modelos para la simulación de escenarios exploratorios de crecimiento urbano (I): los autómatas celulares

Los modelos basados en AC, han sido ampliamente discutidos en los últimos años como un instrumento adecuado para la representación y simulación espacial de crecimientos urbanos (WHITE & *al.*, 1997; WHITE & ENGELEN, 2000; BARREDO & *al.*, 2003; AGUILERA, 2008; LI & *al.*, 2008; PETROV & *al.*, 2009), aunque no se trata de una herramienta nueva. En concreto, los AC como herramienta matemática vieron la luz en los años cuarenta, de la mano de los matemáticos John von Neuman y Stanislaw Ulam, aunque la idea de AC pertenece a Alan Turing y su máquina universal (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000). Se pueden definir como un sis-

FIG. 2/ Diferentes modelos para la simulación prospectiva del crecimiento urbano

Escenarios	Modelo	Características principales
Escenarios exploratorios	Autómatas celulares	Definidos generalmente en una malla raster, los modelos basados en AC permiten simular el crecimiento urbano en los diferentes píxeles a partir del efecto de atracción/repulsión ejercido por los píxeles en su vecindad. Son capaces de generar estructuras complejas y representar dinámicas urbanas.
	Modelos basados en agentes	Consideran el comportamiento de los agentes involucrados en los procesos de crecimiento urbano (a partir de un estado inicial dado), además de las relaciones entre los agentes, y entre ellos y su medio. La configuración espacial cambia de acuerdo a las interacciones entre los elementos del sistema de manera continua. Sostiene que el comportamiento a nivel individual genera un patrón espacial a nivel agregado, cuya suposición es válida para análisis de dinámica urbana.
Escenarios normativos	Evaluación multicriterio	Utilizados habitualmente para determinar la capacidad de acogida del territorio para nuevos desarrollos urbanos. Permite combinar la aptitud o vocación del territorio para ese uso, así como el impacto que sobre éste pudiese ocasionar. Su implementación en un SIG es sencilla y flexible, permitiendo utilizar criterios de sostenibilidad dada la facilidad para combinar variables de tipo biofísico y socioeconómico.

Fuente: Elaboración propia

tema dinámico formado por un conjunto de elementos sencillos idénticos entre sí, pero que en conjunto son capaces de demostrar comportamientos complejos y que por ello son muy adecuados para la simulación de procesos urbanos (FRANKHAUSER, 1998). Este sistema dinámico estaría compuesto, desde un punto de vista formal, de los siguientes elementos (WHITE & ENGELN, 2000):

1. **El espacio en el que existe el autómatas.** En caso de que se trabaje en dos dimensiones (como sucede en la mayor parte de las ocasiones que se modeliza el crecimiento urbano, y al integrar los AC en un SIG) este espacio estará constituido por un plano bidimensional dividido en un número de subespacios homogéneos, conocidos en el modelo de datos raster como celdas o píxeles (BOSQUE SENDRA, 1997). Cada celda o píxel contiene un autómatas, que se encontrará rodeado de otros autómatas.
2. Un **conjunto finito de estados** en los que cada autómatas (o lo que es lo mismo, cada píxel) se puede encontrar. Este conjunto de estados podría ser el conjunto de categorías de ocupación urbana que se distinguen, como por ejemplo residencial, industrial, equipamientos, viario, etc.
3. Una **definición de vecindad**, es decir, el conjunto de celdas que se establece que influirán el estado de cada autómatas.
4. Un **conjunto de reglas de transición** que determinan los cambios de estado de cada autómatas en función de su estado inicial y del estado de los autómatas vecinos. Las reglas de transición definen el estado del autómatas en el tiempo $t + 1$ como una función del estado del autómatas en el tiempo t y de un input también en el tiempo t , que se derivará de los estados de los autómatas incluidos en su vecindad.
5. Una **secuencia discreta de tiempos** o iteraciones, en las que se aplican las reglas de evolución para cada autómatas, y su estado cambia o se mantiene.

Es posible explicar de una forma más sencilla el funcionamiento de los AC mediante su ejemplo más académico y conocido (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000), el *Game of Life*, de John Conway, en el que se modelizaba, a través de reglas muy simples, el nacimiento, la muerte y la supervivencia de una colonia de células. Los resultados obtenidos por Conway fueron asombrosos: a partir de un conjunto de reglas sencillas y de una situación inicial de partida, el modelo era capaz de generar patrones de elevada complejidad que eran realmente insospechables a partir de la configuración inicial de

células vivas. Este hecho provocó que los AC emergieran como una herramienta para la representación de sistemas complejos y la investigación de sus dinámicas (BENENSON & TORRENS, 2004).

Los autómatas celulares saltaban así del campo teórico a la escena de la modelización geográfica, siendo uno de los pioneros en su aplicación Aldo Tobler, con su *Cellular Geography*. Desde entonces, mucho se ha escrito acerca de la aplicabilidad de los AC a la modelización de procesos urbanos (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000; BENENSON & TORRENS, 2004), así como sobre su aplicación para la simulación del crecimiento urbano (BARREDO & al., 2003, 2004; PETROV & al., 2009...), pudiendo establecerse que se trata de un instrumento adecuado para la simulación de escenarios exploratorios.

No obstante conviene destacar que los modelos empleados para la simulación de las dinámicas de la ocupación del suelo no están constituidos por un autómatas celular estricto, como el descrito en el *Game of Life*, de Conway. Por el contrario, buena parte de estos modelos (SANTÉ & al., 2010) determinan un *potencial de transición* de los diversos usos urbanos (o posibles estados de los AC) en función de diversos factores (FIG. 3) como son la accesibilidad, la aptitud del territorio para los crecimientos urbanos, un factor estocástico, así como un factor denominado de *vecindad* que estaría basado en los autómatas celulares propiamente dichos. Este factor de vecindad consistiría en un potencial de cambio calculado en función del efecto de atracción/repulsión que ejercerían los usos de los autómatas de la vecindad sobre cada autómatas en cuestión.

Esta estructura ha sido popularizada por los trabajos que han empleado el modelo desarrollado en el proyecto MOLAND (BARREDO & al., 2003; BARREDO & al., 2004; GÓMEZ & BARREDO, 2008; PETROV & al., 2009), aunque también ha inspirado los modelos desarrollados en otros estudios (AGUILERA, 2008; VALENZUELA & al., 2008). La FIG. 4 recoge algunos de los trabajos más relevantes en esta materia, así como una descripción del ámbito de estudio y escala en el que se aplican.

En todos ellos, a través del proceso de calibración, especialmente del parámetro de vecindad, se ha conseguido representar de forma realista los crecimientos urbanos. Esta calibración se consigue mediante la modificación de los efectos de atracción y repulsión de los usos vecinos, permitiendo incluso modificar los pa-

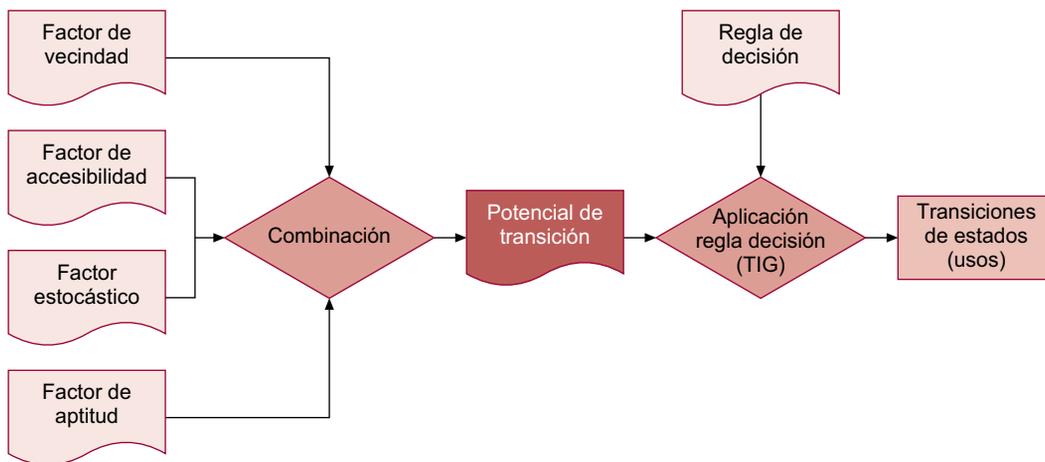


FIG. 3/ Esquema del funcionamiento de un modelo de simulación

Fuente: AGUILERA, 2008

FIG. 4/ Selección de trabajos relevantes de simulación del crecimiento urbano con modelos basados en AC en los últimos años

Autores	Ámbito/escala	Descripción
WHITE & ENGELEN (1997)	Ciudad de Cincinnati (Estados Unidos)	Simulación <i>expost</i> del crecimiento urbano para la ciudad de Cincinnati de 1840 a 1960.
WHITE & ENGELEN (2000)	Ámbito estatal. Países Bajos	Simulación prospectiva de un escenario exploratorio tendencial de los usos del suelo para el año 2009 en los Países Bajos.
BARREDO & al. (2003)	Ciudad de Dublín (Irlanda)	Simulación <i>expost</i> del crecimiento urbano para el período 1968-1998 en la ciudad de Dublín.
BARREDO & al. (2004)	Ámbito Urbano. Lagos (Nigeria)	Simulación prospectiva del crecimiento urbano en un escenario exploratorio tendencial para el año 2020 en la ciudad de Lagos.
AGUILERA (2008)	Área metropolitana de Granada (España)	Simulación de tres escenarios del crecimiento urbano para el año 2020 en el Área Metropolitana de Granada.
GÓMEZ & BARREDO (2008)	Región Urbana de Madrid (España)	Simulación de tres escenarios exploratorios, basados en los escenarios IPCC de cambio climático, para el año 2020.
LI & al. (2008)	Delta del Río Perl (República Popular China)	Simulaciones <i>expost</i> de 1988 a 2003 empleando diversos patrones de ocupación urbana que supongan crecimientos más compactos.
VALENZUELA & al. (2008)	Área Metropolitana de Granada (España)	Simulación de 4 escenarios exploratorios basados en diferentes patrones de ocupación urbana.
HAN & al. (2009)	Shangai (República Popular China)	Simulación de un escenario exploratorio de tendencia apoyada en modelos basados en Dinámica de Sistemas.
PETROV & al. (2009)	Región del Algarve (Portugal)	Simulación prospectiva de tres escenarios exploratorios de crecimiento urbano en la región del Algarve.

Fuente: Elaboración propia

trones o formas de crecimiento urbano reproducidas en las simulaciones (AGUILERA, 2008; LI & al., 2008; VALENZUELA & al., 2008). Así, en un escenario en el que primase el crecimiento en patrones agregados, el factor de vecindad se calcularía de forma diferente a otro escenario caracterizado por crecimientos más dispersos, lo que se conseguiría a través de la modificación de los valores de atracción/repulsión de los usos vecinos.

Un ejemplo a este respecto lo constituyen los trabajos de AGUILERA (2008) para el Área Metropolitana de Granada, en el que tres escenarios exploratorios futuros para el año 2020 son simulados con un modelo basado en AC, previamente empleado en simulaciones *expost* para el mismo ámbito (AGUILERA, 2008), con resultados satisfactorios.

La simulación de los tres escenarios se llevó a cabo mediante la realización de cambios en los diferentes parámetros del modelo (FIG. 5), mostrando así su flexibilidad para la estimación de diferentes escenarios exploratorios futuros. Especialmente interesantes son aquellos cambios referentes al parámetro de vecindad (o de AC), que a través de la modificación de los valores de atracción de unos usos con respecto a otros en la vecindad establecida, permiten potenciar ciertos comportamientos de los crecimientos, tales como crecimientos más dispersos, más agregados, de carácter más lineal, etc.

Los resultados obtenidos en las simulaciones (FIG. 6) plasman de manera espacial los tres escenarios exploratorios establecidos. De esta forma, se observa cómo la integración de escenarios exploratorios con un modelo basado en

Fig. 5/ Implementación de los escenarios exploratorios mediante cambios en los parámetros del modelo de AC

	Descripción de los escenarios exploratorios	Implementación en el esquema anteriormente descrito para un modelo basado en AC (1)
Escenario de intensificación de la ocupación residencial	<p>Aceleración del crecimiento urbano, especialmente el destinado a uso residencial de baja densidad, e intensificación de los procesos de dispersión urbana.</p>	<p>Accesibilidad. Se obtiene como la distancia a las vías de transporte de alta capacidad. En su estimación se incluyen algunas nuevas vías de alta capacidad en proyecto.</p> <p>Vecindad. Se disminuye el efecto de atracción de los usos residenciales sobre sí mismos, que a partir de cierta distancia se convierte en repulsión, para favorecer la dispersión urbana.</p> <p>Parámetro estocástico. Se incrementa el peso del factor de aleatoriedad para los usos residenciales, para reflejar los nuevos crecimientos dispersos que surgen en áreas alejadas de las zonas urbanas existentes.</p>
Escenario Tecnológico	<p>Intensidades de ocupación del suelo similares a los últimos años, pero con mayor proporción de zonas industriales y comerciales, ubicados en el entorno de las vías de mayor capacidad.</p>	<p>Accesibilidad. Se obtiene como la distancia a las vías de transporte de alta capacidad. En su estimación se incluyen algunas nuevas vías de alta capacidad en proyecto. Su peso se incrementa para los usos industriales y tecnológicos.</p> <p>Vecindad. Se incrementa la atracción que las vías ejercen sobre los usos comerciales e industriales, y los efectos de atracción de los usos residenciales sobre ellos mismos, para favorecer la agregación.</p> <p>Parámetro estocástico. El parámetro estocástico se mantiene similar que en las simulaciones <i>expost</i> realizadas.</p>
Escenario de contención de la ocupación urbana	<p>Disminución de las tasas de crecimiento así como de la dispersión residencial. Los usos industriales y comerciales tenderán a crecer en los entornos de algunos de los nodos de la red viaria.</p>	<p>Accesibilidad. Medida como la distancia a los nodos de las infraestructuras viarias en lugar de a la propia red. No incorpora nuevas infraestructuras de alta capacidad.</p> <p>Vecindad. Se incrementa la atracción de los usos residenciales sobre sí mismos, favoreciendo la agregación. Por su parte el efecto de atracción de los nodos se incrementa sobre los usos industriales y comerciales.</p> <p>Parámetro estocástico. El parámetro estocástico se reduce para tratar de mostrar un crecimiento menos disperso, especialmente en los usos residenciales.</p>

(1) El parámetro de aptitud se ha mantenido constante en los diferentes escenarios.

Fuente: Elaboración propia

AC permite realizar simulaciones prospectivas del crecimiento urbano en un ámbito metropolitano, en este caso del contexto español.

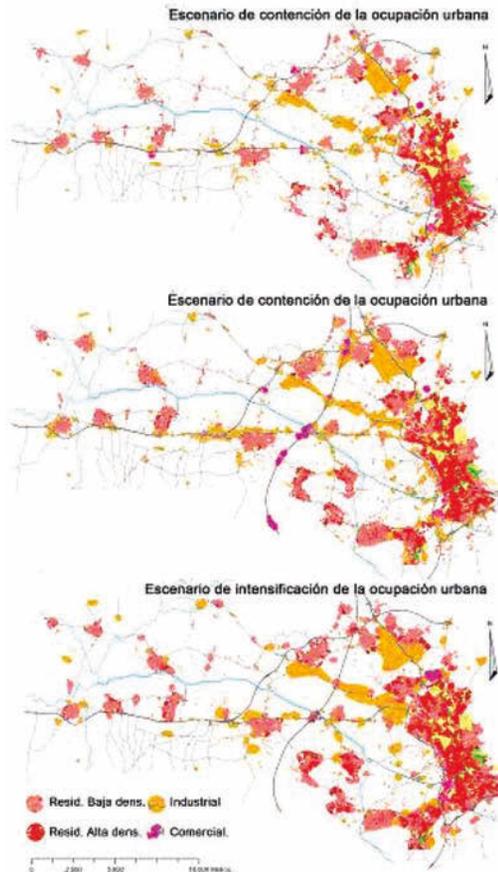


FIG. 6/ Simulación prospectiva de tres escenarios exploratorios de crecimiento urbano para el Área Metropolitana de Granada (año 2020)

Fuente: AGUILERA, 2008

3.2. Modelos para la simulación de escenarios exploratorios de crecimiento urbano (II): los Modelos Basados en Agentes (ABM)

De forma general, los Modelos Basados en Agentes (*Agent Based Models*, o ABM) están integrados por un conjunto de agentes o entidades parcial o totalmente autónomas que actúan de manera racional o reactiva de acuerdo con sus percepciones del exterior y el estado de su conocimiento, con el objetivo de alcanzar sus propios intereses (AGUILERA ONTIVEROS, 2000), relacionándose entre sí y con su

medio para alcanzar un objetivo concreto (llegar a un determinado lugar, alcanzar un beneficio, tener la mayor influencia posible...). Algunos investigadores insisten en que un agente debe presentar un comportamiento adaptativo, limitando el concepto de agente a aquellos que pueden, de alguna forma, aprender de su medio y cambiar su comportamiento en conformidad a ello (CASTLE, 2006). FERBER (1999) sin embargo, agrupa los agentes según la complejidad de su comportamiento en *reactivos* (responden y envían mensajes según objetivos que no pueden modificar), *intencionales* (establecen prioridades y jerarquizan planes según sus metas) o *sociales* (razonan sobre metas y estrategias de los demás agentes).

En los ABM los diferentes agentes coexisten y ponen en juego una serie de procesos (construir, moverse, gestionar la ciudad, proveer servicios urbanos, comprar, vender, etc.) para alcanzar sus objetivos, dando lugar a relaciones entre ellos, con el medio, y repercutiendo también en la relación entre su medio y el sistema. Estos procesos pueden darse de forma sincronizada o no, dependiendo de si los agentes actúan en cada unidad definida de tiempo, de acuerdo a la acción de otro agente, o en un momento específico, aunque siempre se realizarán buscando alcanzar sus metas. Es por ello que tanto las características de los agentes, sus objetivos, así como el medio en el que existen, tienen un papel fundamental a la hora de definir el enfoque del sistema multiagente (SMITH & al., 2009), que puede ser considerado un laboratorio en miniatura. En él, los diferentes componentes puede ser modificados para observar las repercusiones ocasionadas en la organización (por ejemplo, espacial) de los diferentes agentes y su medio, que pueden conducir a la identificación de fenómenos emergentes, como patrones espaciales (SANDERS, 2006) (a través de mecanismos *bottom-up*, en contraposición al *top-down*). Este aspecto le otorga, al igual que a los AC, un enfoque generalmente exploratorio.

Un ejemplo ya clásico de ABM lo constituyen los trabajos de Schelling (1971, 1978) en los que se desarrolla un modelo basado en agentes (que representaban 2 grupos de personas) para explorar un proceso de segregación espacial. En ellos se demostró la emergencia de patrones de segregación como consecuencia de movimientos migratorios entre dos tipos de vivienda diferentes, culturalmente condicionados por el nivel de tolerancia existente por parte de cada uno de los agentes hacia otro. En la misma línea se puede citar el modelo *Sugarscape*, de EPSTEIN & AXTELL (1996), en el

que se simulaba el comportamiento de agentes representando individuos en una sociedad nómada que se mueven buscando comida en un entorno o medio ambiente bidimensional, representado por diferentes celdas o píxeles. Incluso se podían añadir elementos más complejos, como la inclusión de descendencia, metabolismo, generación de residuos, y aún más si se consideran factores como contaminación, recursos, mercado o enfermedades.

Estos trabajos han demostrado que los ABM son herramientas poderosas y eficientes en la simulación de fenómenos estudiados por diferentes disciplinas como la economía, las ciencias políticas, la sociología, la ecología, etc. (BENENSON & *al.*, 2004), lo que ha facilitado la aparición de múltiples plataformas sobre las cuales es posible programar estos modelos. A este respecto, en el trabajo de SMITH & *al.* (2009) es posible encontrar una revisión de las principales plataformas existentes para el desarrollo de ABM.

En lo que respecta al estudio de las dinámicas urbanas, su campo de aplicación todavía presenta la limitación de desarrollarse principalmente a una escala local intraurbana, como el movimiento de peatones, estudios de tráfico, segregación espacial o evacuaciones de emergencia. Apenas se encuentran en la actualidad modelos aplicados a nivel regional, especialmente aquellos creados con el objetivo de estudiar fenómenos como el crecimiento urbano, que quedan recogidos en la revisión que elabora MATTHEWS (2007).

La mayor parte de estos modelos son también modelos celulares, ya que emplean una forma híbrida de simulación, y es que, además de modelar los comportamientos de los agentes y sus relaciones entre ellos y con el medio (obteniendo, por ejemplo, gráficos de evolución de ocupación de suelo por parte de los diferentes agentes), también se apoyan en el empleo de elementos celulares, propios de los AC, para representar espacialmente los procesos de expansión de la ocupación de suelo de cada agente, por ejemplo a través de una teselación homogénea. De esta forma, se podría manifestar un comportamiento mucho más complejo y rico que el del mero cambio de estado como sucedía para los AC.

Un buen ejemplo a este respecto lo constituye el modelo HI-LIFE (FONTAINE, 2008), cuyo objetivo principal es modelar la demanda residencial en la región policéntrica de East Anglia, Reino Unido. Este modelo simula patrones urbanos de usos del suelo en una escala regio-

nal, integrando el conocimiento cualitativo de las preferencias de localización residencial de diferentes agentes, con los análisis cuantitativos de las dinámicas de crecimiento urbano, para un período de 25 años. La preferencia de los agentes se define principalmente por la etapa de su ciclo de vida (infancia, familias con y sin hijos, vejez) y sus cambios, identificado como el factor predominante de decisiones de localización residencial, superando incluso motivos económicos. Los resultados muestran que un ABM puede simular dónde, cuándo y de quién puede derivar la demanda de nuevos desarrollos residenciales.

No obstante, a pesar de las muchas potencialidades de los ABM, y la rápida evolución de su aplicación a fenómenos urbanos, su aplicación todavía presenta algunas limitaciones, como las formas de validación y calibración de los modelos y la sensibilidad a las condiciones iniciales (SMITH, 2009). Sin embargo, y de acuerdo con SANDERS (2007), la emergencia de patrones espaciales que se puede obtener a través de la aplicación de los ABM, pueden proporcionar avances futuros significativos en la modelación urbana.

3.3. Modelos para la simulación de escenarios normativos: las técnicas de evaluación multicriterio

La evaluación multicriterio (y multiobjetivo) es un conjunto de técnicas utilizadas en la toma de decisiones multidimensional para evaluar una serie de alternativas que satisfacen uno o varios objetivos, en función de una serie de criterios predefinidos y que permitirán conducir a la toma de una decisión final (MALCZEWESKI, 1999; GÓMEZ DELGADO & BARREDO, 2005).

Estas técnicas se difundieron ampliamente desde el campo de la economía a finales del siglo XIX y será a partir de 1960 cuando la decisión multicriterio se individualice con su propia terminología. Desde entonces su uso ha proliferado en distintos campos y disciplinas. En el campo de la geografía y la ordenación del territorio, podemos decir que su auge ha venido ligado al desarrollo de los SIG y a la necesidad de subsanar algunas de las carencias analíticas que éstos presentaban. Así, ya en los años ochenta, una de las primeras y más fructíferas acciones en este sentido fue la integración de las técnicas de evaluación multicriterio (CARVER, 1991). Inmediatamente, y gracias a la posibilidad de manejar gran canti-

dad de información territorial en el SIG, se descubren las importantes posibilidades que esta combinación ofrecía para la toma de decisiones relacionada con el territorio y la planificación del mismo, especialmente para la asignación óptima de usos del suelo (urbano-residenciales, industriales, agrarios, etc.).

En este proceso es determinante el establecimiento de la capacidad de acogida de cada punto del territorio para recibir una actividad (GÓMEZ OREA, 1994), lo que nos permitirá seleccionar, posteriormente, aquellas localizaciones que presenten la máxima capacidad para albergar la actividad en cuestión². El uso combinado de técnicas de EMC y SIG resuelve satisfactoriamente este procedimiento como lo demuestra el número elevado de trabajos que se han elaborado en este sentido (THILL, 1999), ya sea relacionado con la evaluación de desarrollos forestales, agrícolas, industriales, creación de corredores naturales, selección de zonas a ser preservadas, etc. (DAI & *al.*, 2001; JOERIN & *al.*, 2001; PÉREZ & *al.*, 2002; PHUA & MINOWA, 2005; BAJA & *al.*, 2007; CARMO GIOR-DANO & SETTI RIEDEL, 2008; REZAEI-MOGHADDAM & KARAMI, 2008; VÍA GARCÍA & MUÑOZ MUNICIO, 2008), con la localización de distintos tipos de equipamientos e instalaciones (SIDDIQUI & *al.*, 1996; BOSQUE SENDRA & *al.*, 1999; MALCZEWSKI & JACKSON, 2000; CHANG & *al.*, 2008; HOS-SAIN & *al.*, 2009), con la gestión de cuencas hidrográficas (MARTÍN & *al.*, 1999; DEGIOANNI & *al.*, 2000), pero también con otros aspectos importantes relacionados con la planificación como la evaluación de distintas alternativas relacionadas con grandes infraestructuras (COLORNI & *al.*, 1999; MORIN, 1999).

En el campo que nos ocupa, la asignación óptima de suelo urbano ha sido una de las aplicaciones más prolíficas. En la FIG. 7 podemos encontrar de forma resumida algunos de los trabajos más recientes y representativos.

Se ha de destacar que, a diferencia de las otras técnicas mencionadas en este artículo, la EMC no ha sido habitualmente utilizada de manera estrictamente prospectiva para simular distintos escenarios de futuro crecimiento urbano. Sin embargo, y como podemos ver en el listado adjunto, la tendencia ha cambiado en los últimos años y se han realizado algunos ensayos en este sentido. No obstante en algunos casos tan sólo se realiza una proyección de población en la que basar la futura deman-

da de suelo urbano y en otros no se menciona con suficiente detalle cómo se ejecuta esa simulación a futuro y en qué está basada.

PLATA ROCHA & *al.* (2010) realizan una proyección a mediano plazo (año 2020) de nuevas localizaciones óptimas de uso urbano en la Comunidad de Madrid. Este trabajo se ha visto completado con la elaboración de hasta tres escenarios diferentes de crecimiento urbano con el mismo límite temporal: de tendencia, de crisis y de innovación y sostenibilidad (FIG. 8). Si bien podría entenderse que estas herramientas serían aptas para simular únicamente el tercer escenario, los resultados han sido satisfactorios también para los otros dos, demostrándose que la utilización de estas técnicas no tiene que ceñirse exclusivamente al ámbito de lo deseable óptimo, sino también al de lo exploratorio.

Los resultados obtenidos fueron generados partiendo de un amplio conjunto de factores ambientales, sociales y económicos. Para el escenario tendencial se utilizaron una serie de factores que habían resultado estar relacionados con la aparición de nuevas zonas urbanas en la Comunidad de Madrid entre 1990 y el año 2000 (PLATA ROCHA & *al.*, 2009). Para el de innovación y sostenibilidad se partía de unos criterios de optimización perfectamente compatibles con la filosofía de la asignación óptima de usos del suelo, mientras que en el escenario de crisis se reduce la demanda de suelo residencial y productivo, intentando plantear patrones y localizaciones de nuevas zonas urbanas basados en políticas que minimicen el gasto económico, utilizando las infraestructuras y servicios urbanos disponibles hasta la fecha.

4. Discusión y conclusiones

La simulación prospectiva del crecimiento urbano, probablemente con poco recorrido en el ámbito español, presenta hoy en día una efervescencia en la bibliografía internacional (SANTÉ & *al.*, 2010, para el caso de los AC, por ejemplo), con el desarrollo de múltiples instrumentos para la generación de imágenes de futuro que permitan ayudar al proceso de planificación, especialmente en aquellos ámbitos urbanos donde los cambios son más dinámicos.

El presente trabajo trata de mostrar de forma sintética algunos de los instrumentos con ma-

² Es posible encontrar abundante y detallada información de la utilización de estas técnicas en un entorno SIG en cualquiera de los manuales existentes sobre estos temas

(MALCZEWSKI, 1999; GÓMEZ DELGADO & BARREDO, 2005, entre otros).

Fig. 7/ Selección de trabajos relevantes de simulación del crecimiento urbano con modelos basados en EMC en los últimos años

Autores	Ámbito/escala	Técnica EMC	Descripción
MALCZEWSKI (2002 y 2006)	Regional. Región de Villa Unión, Sinaloa, (México)	Sumatoria lineal ponderada, superposición booleana, OWA	Localización de nuevos desarrollos industriales (2002) y residenciales (2006). Se trata de ejemplos para ilustrar la aplicación de una EMC borrosa en un entorno SIG y del método OWA.
SVORAY & al. (2005)	Local. Ciudad de Ma'ale Adumim y alrededores (Israel)	Sumatoria lineal ponderada	Localización óptima de nuevas zonas residenciales, industriales, reservas naturales y bosques.
LIU & al. (2007)	Región lacustre Hanyang (China central)	Método de las jerarquías analíticas	Simulación de desarrollo residencial, industrial y de conservación de pastizales para el año 2020. Obtención de la demanda de superficie para cada uso y asignación en 16 subregiones obtenidas según sus valores de capacidad de acogida.
MOLERO MELGAREJO & al. (2007)	Regional. Cuenca hidrográfica del río Guadalfeo, (Granada, España)	Método de las jerarquías analíticas	Simulación de localización de nuevas zonas urbanas para 2010, 2025 y 2050 en función de la aparición de dos nuevos tramos de autovía.
GALACHO & ARREBOLA (2008)	Municipal. Algarrobo Málaga, (España)	Análisis de punto ideal	Obtención de la capacidad de acogida del territorio (desde el punto de vista físico) para ser urbanizado y comparación con los sectores propuestos en el PGOU del municipio.
GENELETTI & VAN DUREN (2008)	Parque Natural Paneveggio-Pale di S. Martino (Italia)	MOLA (Multi-Objective Land Allocation)	Rezonificación de un parque natural en áreas protegidas y áreas susceptibles de ser utilizadas con fines turísticos y recreativos.
LIGMANN-ZIELINSKA & al. (2008)	Local. Chelan City (estado de Washington, EEUU)	Sumatoria lineal ponderada y una variante propia de MOLA (SMOLA)	Localización suelo residencial, comercial, industrial, restringido y no desarrollado. Enfocado al desarrollo de una nueva metodología que minimice la incompatibilidad de usos adyacentes y asegure cierta compatibilidad y contigüidad de las parcelas resultantes.
LAMELAS (2009)	Local. Entorno de Zaragoza, (España)	Combinación método Jerarquías Analíticas y análisis de concordancia (PROMETHEE-2)	Localización de suelo industrial mediante una metodología que combina una evaluación de tierras y un análisis de la capacidad de acogida del territorio propiamente dicha.
PLATA ROCHA & al. (2010 y en revisión)	Regional. Comunidad de Madrid, (España)	Sumatoria lineal ponderada y método conjuntivo/disuntivo	Localización de suelo residencial y productivo (industrial y comercial) en el año 2020, simulando hasta tres escenarios de futuro diferentes: de tendencia, de crisis y de innovación y sostenibilidad.

Fuente: Elaboración propia

por relevancia en la esfera internacional, como son los modelos basados en agentes y en autómatas celulares, así como aquellos que emplean técnicas de evaluación multicriterio. Para ello, se han recopilado algunos de los trabajos de mayor relevancia y actualidad representativos del estado de la cuestión en cada caso, facilitando el acceso a referencias concretas y prácticas que permitan la puesta en marcha de trabajos similares en este materia. Igualmente, y para el caso de los AC y de las técnicas de

EMC, se presentan resultados de trabajos realizados por los autores, en los que se aplican estas técnicas en ámbitos metropolitanos españoles (concretamente Madrid y Granada), junto con el diseño de escenarios, que a juicio de los autores, constituyen la otra herramienta fundamental que completa los instrumentos de la simulación prospectiva. Es por ello que se ha incorporado también en el presente artículo una breve discusión sobre el diseño de escenarios y sus tipos.

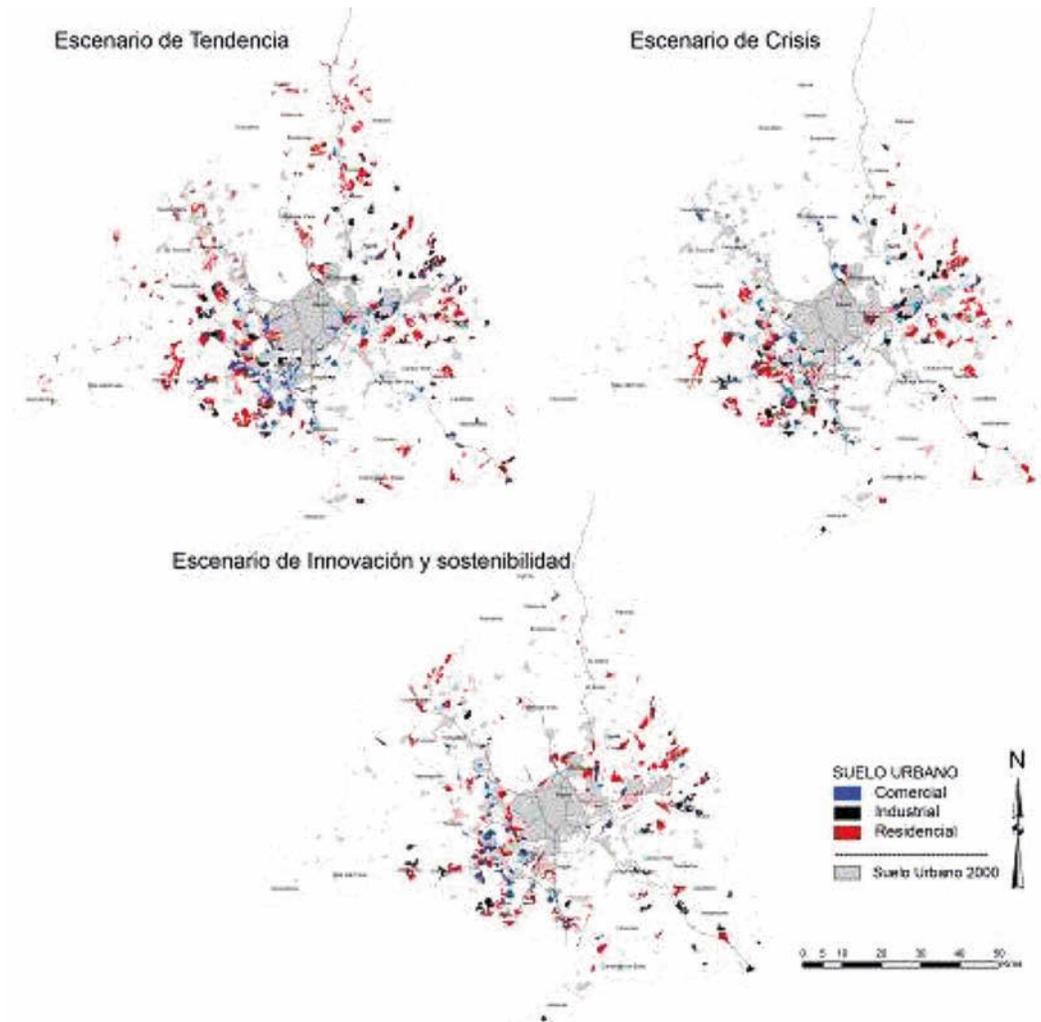


FIG. 8/ Resultados de asignación de suelo residencial y productivo (industrial y comercial) para el año 2020 en la Comunidad de Madrid, en tres escenarios de crecimiento urbano

Fuente: PLATA ROCHA, 2010 y PLATA ROCHA & al., 2010

En cualquier caso, la cantidad de instrumentos y técnicas para la simulación de procesos y aspectos relacionados con los entornos urbanos (especialmente los relacionados con el crecimiento de la ciudad) es enorme, habiendo quedado fuera de la intencionalidad del presente trabajo presentar una clasificación exhaustiva de los diversos tipos de modelos, así como desechar los que aquí no se presentan, tales como modelos basados en redes neuronales, de regresión logística, etc.

Por otra parte, resulta fundamental hacer una llamada de atención acerca de la perspectiva de aproximación a estos instrumentos, en el contexto de fenómenos y procesos tan com-

plejos como los urbanos. Y es que, como se ha señalado en diversas ocasiones, no se trata de acercarse a los modelos como instrumentos que nos permitirán predecir el futuro, como si de una predicción meteorológica se tratase, sino que, con ayuda de los escenarios, se utilicen los resultados de estos modelos para explorar futuros posibles, deseables, a evitar, etc. Este aspecto atesora un gran interés con vistas al proceso de planificación de estos ámbitos, pudiendo facilitar la incorporación de instrumentos de simulación a dicho proceso. Así, por ejemplo, se podría disponer de una mayor capacidad de discusión de imágenes futuras con los agentes implicados en los procesos de planeamiento, o bien facilitar

el diseño de estrategias que vengan a contrarrestar aquellos posibles escenarios indeseables o que, por el contrario, conduzcan los sistemas urbanos hacia escenarios deseables.

Este último aspecto, finalmente, abriría un campo para la integración del diseño y simulación de escenarios con los procesos de planeamiento a diversas escalas, que condujese a la elaboración de planes más adaptables a futuros inciertos y cambiantes, la adopción de estrate-

gias adecuadas para diferentes tipos de contextos futuros, la generación de planes por etapas o fases condicionadas por la materialización de unos u otros escenarios futuros, etc.

Por todo ello, resulta de interés seguir realizando esfuerzos tanto en la elaboración de modelos que permitan plasmar imágenes de diversos escenarios futuros en ámbitos urbanos y metropolitanos, como en su integración en los procesos de planificación con vistas a la mejora del proceso de toma de decisiones.

5. Bibliografía

- AGUILERA, F. (2008): *Análisis espacial para la ordenación ecopaisajística de la Aglomeración Urbana de Granada*, tesis doctoral, Universidad de Granada.
- AGUILERA ONTIVEROS, A. (2000): "Simulaciones multiagente de ambientes urbanos", *Vetas, revista de El Colegio de San Luis*, Año 2, 5, mayo-agosto de 2000: 205-224.
- BAJA, S. & D. M. CHAPMAN & D. DRAGOVICH (2007): "Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning", *Environmental Modeling & Assessment*, 12: 171-184.
- BARREDO, J. I. & M. KASANKO & N. Y. MCCORMICK & C. LAVALLE (2003): "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata", *Landscape and Urban Planning*, 64: 145-160.
- BARREDO, J. I. & L. DEMICHELI & C. LAVALLE & M. KASANKO & N. MCCORMICK (2004): "Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32: 65-84.
- BATTY, M. (2005): *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*, The MIT Press.
- BENENSON, I. & P. M. TORRENS (2004): *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena*, John Wiley & Sons, Ltd.
- BERDOULAY, V. (2009): "La historia de la geografía en el desafío de la prospectiva", *Boletín de la A.G.E.*, 51: 9-23.
- BLECIC, I. & A. CECCHINI (2008): "Design beyond complexity: Possible futures-Prediction or design? (and techniques and tools to make it possible)", *Futures*, vol. 40: 537-551.
- BORJERSON, L. & M. HOJER & K. H. DREBORG & T. EKVALL & G. FINNVENDEN (2006): "Scenario types and techniques: Towards a user's guide", *Futures*, vol. 38: 723-739.
- BOSQUE SENDRA, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*, Ed. Rialp. Madrid.
- & M. A. DIAZ MUÑOZ & M. GÓMEZ DELGADO & V. M. RODRÍGUEZ ESPINOSA & A. E. RODRÍGUEZ DURÁN & A. VELA GAYO (1999): "Un procedimiento, basado en un SIG, para localizar centros de tratamiento de residuos", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19: 295-323.
- BRIASSOULIS, H. (2000): "Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches", en: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> [mayo, 2007].
- CARMO GIORDANO, L. & P. SETTI RIEDEL (2008): "Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: a case study of the city of Rio Claro, Sao Paulo, Brazil", *Landscape and urban planning*, 84: 301-311.
- CARSJENS, G. J. (2009): *Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes*, tesis doctoral, Universidad de Wageningen.
- CARVER, S. (1991): "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, 5 (3): 321-339.
- CASTLE, C. J. E. (2006): "Developing a Prototype Agent-Based Pedestrian Evacuation Model to Explore the Evacuation of King's Cross St. Pancras Underground Station", *CASA Working Paper Series*, 108.
- & A. T. CROOKS (2006): "Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations", *UCL Working Papers Series*.
- COLORNI, A. & E. LANIADO & S. MURATORI (1999): "Decision support systems for environmental impact assessment of transport infrastructures", *Transportation Research Part D4*, 1-11.
- CHANG, N. & G. PARVATHINATHAN & J. B. BREEDEN (2008): "Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region", *Journal of Environmental Management*, 8: 139-153.
- DAI, F. C. & C. F. LEE & X. H. ZHANG (2001): "GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study", *Engineering Geology*, 6: 257-271.
- DEGIOANNI, A. & A. CAMARASA BELMONTE & F. MORENO SANZ (2000): "Bases metodológicas para la evaluación, uso y gestión sostenible de los recursos agrarios. Aplicación a la cuenca de Santa Catalina, Argentina", en AGUADO & GÓMEZ DELGADO (eds.): *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*, Actas del IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección de la AGE: 290-311.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2006): "Urban Sprawl in Europe", *EEA Report*, 10/2006.

- EPSTEIN, J. M. & R. AXTELL (eds.) (1996): *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, Washington DC.
- FERBER, J. (1999): *Multiagent systems: An introduction to distributed artificial intelligence*, Addison-Wesley, Nueva York.
- FONT, A. (2004): *L'explosió De La Ciutat*, COAC i Fòrum Universal de les Cultures de Barcelona, Barcelona.
- FONTAINE, C. M. & M. D. ROUNSEVELL (2009): "An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape", *Landscape Ecology*, 24: 1237-1254.
- FRANKHAUSER, P. (1998): "Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2: 127-145.
- GALACHO JIMÉNEZ, F. B. & J. A. ARREBOLA CASTAÑO (2008): "Aplicación del modelo de evaluación de la capacidad de acogida para la valoración de la aptitud física del territorio respecto a sectores de planeamiento urbanístico", en L. HERNÁNDEZ & J. M. PARREÑO (eds.): *Tecnologías de la Información Geográfica para el desarrollo territorial*, Servicio de publicaciones y difusión científica de la ULPGC, Las Palmas de Gran Canaria: 43-55.
- GENELETTI, D. & I. VAN DUREN (2008): "Protected area zoning for conservation and use: a combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation", *Landscape and urban planning*, 85 (2): 97-110.
- GIMBLETT, H. R. (2002): "Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Technologies for Modeling and Simulating Social and Ecological Phenomena", en H. R. GIMBLETT (ed.): *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*, Institute Studies on the Sciences of Complexity Santa Fe: 1-20.
- GÓMEZ DELGADO, M. & J. I. BARREDO CANO (2005): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, Editorial RA-MA, Paracuellos de Jarama.
- (2008): "Towards a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region", en M. PAEGELOW & M. T. CAMACHO (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*, Springer-Verlag, Berlín.
- GÓMEZ OREA, D. (1994): *Ordenación del territorio. Una aproximación desde el Medio Físico*, Editorial Agrícola Española, Madrid.
- HAN, J. & Y. HAYASHIA & X. CAO & H. IMURAA (2009): "Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China", *Landscape and Urban Planning*, 91: 133-141.
- HOSSAIN, M. S. & S. R. CHOWDHURY & N. G. DAS, (2009): "Integration of GIS and multicriteria decision analysis for urban aquaculture development in Bangladesh", *Landscape and urban planning*, 90 (3-4): 119-133.
- JOERIN, F. & M. THÉRIAULT & A. MUSY (2001): "Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment", *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (2): 153-174.
- LAMELAS GRACIA, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus*, 9: 28-66.
- LIGMANN-ZIELINSKA, A. & R. L. CHURCH & P. JANKOWSKI (2008): "Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation", *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (6): 601-622.
- LI, X. & Q. YANG & X. LIU (2008): "Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata", *Landscape and Urban Planning*, 86: 17-186.
- LIU, Y. & X. LV & X. QIN & H. GUO & Y. YU & J. WANG & G. MAO (2007): "An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe", *Landscape and Urban Planning*, 82: 233-246.
- MALCZEWSKI, J. (1999): *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons Inc., Nueva York.
- (2002): "Fuzzy screening for land suitability analysis", *Geographical & Environmental Modelling*, 6 (1): 27-39.
- (2006): "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8: 270-277.
- & M. JACKSON (2000): "Multicriteria spatial allocation of educational resources: an overview", *Socio-economic planning sciences*, 34: 219-235.
- MARIEN, M. (2002): "Future Studies in the 21st Century: a reality based view", *Futures*, 34: 261-281.
- MARTIN, N. & B. ST-ONGE & J. P. WAAUB (1999): "Geographic tools for decision making in watershed management", en J. C. THILL (ed.): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information sciences approach*, 309-334, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot.
- MATTHEWS, R. B. & N. G. GILBERT & A. ROACH & G. POLHILL & N. M. GOTTS (2007): "Agent-based land-use models: a review of applications", *Landscape Ecology*, 22: 1447-1459.
- MOLERO MELGAREJO, E. & A. L. GRINDLAY MORENO & J. J. ASENSIO RODRÍGUEZ (2007): "Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio", *GeoFocus*, 7: 120-147.
- MORIN, D. M. (1999): "GDSS in highway planning: their use and adoption", en J. C. THILL (ed.): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information sciences approach*, 149-174, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot.
- O'SULLIVAN, D. & P. TORRENS (2000): "Cellular Models of Urban Systems", *CASA Working Paper Series*, 22.
- PHUA, M. & M. MINOWA (2005): "A GIS-based multicriteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia", *Landscape and Urban Planning*, 71: 207-222.
- PLATA ROCHA, W. (2010): *Descripción, análisis y simulación del crecimiento urbano mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El caso de la Comunidad de Madrid*. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá.

- & M. GÓMEZ DELGADO & J. BOSQUE SENDRA (2009): "Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG", *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, 4. [http://www.planeamientoyurbanismo.com/articulos/21/analisis-de-factores-explicativos-del-crecimiento-urbano-en-la-comunidad-de-madrid-a-traves-de-metodos-estadisticos-\(rlo-y-mla\)-y-sig](http://www.planeamientoyurbanismo.com/articulos/21/analisis-de-factores-explicativos-del-crecimiento-urbano-en-la-comunidad-de-madrid-a-traves-de-metodos-estadisticos-(rlo-y-mla)-y-sig)
- (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica", *Geofocus*, 10: 103-134.
- PAEGELOW, M. & M. T. CAMACHO (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*, Springer-Verlag, Berlín.
- PETROV, L. & C. LAVALLE & M. KASANKO (2009): "Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal", *Landscape and Urban Planning*, 92 (1): 10-23.
- PORTUGALI, J. (2000): *Self-Organization and the City*, Springer-Verlag, Berlín.
- REIF, B. (1973): *Models In Urban And Regional Planning*, Leonard Hills Books.
- REZAEI-MOGHADDAM, K. & E. KARAMI (2008): "A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP", *Environment, Development and Sustainability*, 10: 407-426.
- SANDERS, L. (2006): "Les Modèles agent en géographie urbaine (Agent models in urban geography)", en F. AMBLARD & D. PHAN (eds.): *Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 151-168, Hermès-Lavoisier.
- SANTÉ, I. & A. M. GARCÍA & D. MIRANDA & R. CRESCENTE (2010): "Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis", *Landscape and Urban Planning*, 96: 108-122.
- SCHWARTZ, P. (1991): *The art of the long view: Planning for the future in an uncertain World*, Doubleday, Nueva York.
- SHELLING, T. (1971): "Dynamic Models of Segregation", *Journal of Mathematical Sociology*, 1: 143-189.
- SIDDIQUI, M. Z. & J. W. EVERETT & B. E. VIEUX (1996): "Landfill siting using Geographic Information Systems: a demonstration", *Journal of Environmental Engineering*, 122: 515-523.
- SMITH, M. J. D. & M. F. GOODCHILD & P. A. LONGLEY (eds.) (2009): *Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, 3.^a ed., Matador, Leicester, Reino Unido.
- SVORAY, T. & P. BAR & T. BANNET (2005): "Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: habitat heterogeneity model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism", *Landscape and Urban Planning*, 72: 337-351.
- THILL, J. C. (1999): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information sciences approach*, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot.
- VALENZUELA, L. M. & F. AGUILERA & J. A. SORIA & E. MOLERO (2008): "Designing and assessing of development scenarios for metropolitan patterns", en PAEGELOW, M. & M. T. CAMACHO (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*, Springer-Verlag, Berlín.
- VÍA GARCÍA, M. & C. MUÑOZ MUNICIO (2008): "Propuesta de nuevos espacios protegidos en la Comunidad de Madrid a partir de metodologías multicriterio flexibles", en L. HERNÁNDEZ & J. M. PARREÑO (eds.): *Tecnologías de la Información Geográfica para el desarrollo territorial*, 791-805. Servicio de publicaciones y difusión científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria.
- WEGENER, M. (1994): "Operational Urban Models: State of the Art", *Journal of the American Planning Association*, 60 (1): 35-40.
- WHITE, R. & G. ENGELEN (2000): "High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems", *Computers, Environment and Urban Systems*, 24: 383-400.
- & I. ULJEE (1997): "The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24: 323-343.