

# SIMULACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA A TRAVÉS DE MODELOS BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES

**Francisco Aguilera Benavente, Luis Miguel Valenzuela Montes**

Laboratorio de Planificación Ambiental (LABPLAM). Universidad de Granada

**Joaquín Bosque Sendra**

Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

## RESUMEN

El planteamiento de escenarios futuros alternativos de desarrollo metropolitano constituye una oportunidad de explorar las posibles tendencias futuras de las formas, patrones, e intensidades de crecimiento urbano que las áreas metropolitanas experimentan en la actualidad. En este sentido, los modelos de simulación son herramientas útiles para la espacialización de los escenarios futuros, y que, por tanto, pueden ayudar en la valoración espacial de las consecuencias de dichas tendencias. El presente artículo explora tres posibles escenarios de desarrollo metropolitano en la Aglomeración Urbana de Granada (AUG) a través de la construcción de un modelo de simulación del crecimiento urbano basado en Autómatas Celulares que mostrará las diferentes características espaciales de los escenarios y las capacidades del modelo para representar diferentes patrones o formas de crecimiento.

**Palabras clave:** Escenarios futuros, Aglomeración Urbana de Granada, Simulación, autómatas celulares.

---

Fecha de recepción: septiembre 2009.

Fecha de aceptación: octubre 2010.

## ABSTRACT

The planning and design of metropolitan growth scenarios establishes an opportunity to explore possible future urban growth trends and patterns. Simulation models constitute an useful tool to show the spatial characteristics of different scenarios and their subsequent evaluation and assessment. This paper explores three possible future scenarios for the Metropolitan Area of Granada, which have been simulated using a model based on cellular automata specifically developed for this task. The results will show the spatial characteristics of the three scenario set, as well as the aptitude of the model to simulate different urban growth trends and patterns.

**Key words:** Future scenario. Metropolitan Area of Granada, Urban simulation, cellular automata.

## I. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación de los cambios de usos del suelo han experimentado un desarrollo espectacular en los últimos años (Batty, 1997; Briassoulis, 2000; Benenson y Torrens, 2004, Paegelow y Camacho, 2008), siendo especialmente relevantes aquellos que se han ocupado de modelizar procesos dinámicos complejos, como son los sistemas urbanos (Verburg, et al., 2004), para los que se pueden encontrar múltiples referencias en la bibliografía (Cheng y Masser, 2003; Barredo, et al., 2004; Berling-Wolf y Wu, 2004a; Caruso, 2005; Aguilera, 2006; Li et al., 2008; Petrov et al., 2009, entre otros). De entre los diferentes modelos empleados, los basados en autómatas celulares (AC), han sido unos de los principales instrumentos aplicados a la simulación, presentando una amplia presencia en múltiples trabajos (Santé et al., 2010).

Este gran interés por la modelización de los fenómenos urbanos a través de modelos basados en AC, en buena parte encuentra su explicación en las importantes transformaciones urbanas y metropolitanas que han tenido lugar en el período reciente tanto en el ámbito europeo (Indovina, 2004; EEA, 2006a, Kasanko, et al., 2006) como en el español (Roca, 2003; OSE, 2006) con sus particularidades metropolitanas (Feria, 2004; De Miguel-González, 2008), y que han supuesto un proceso de afección de los paisajes de los entornos metropolitanos sin precedentes (EEA, 2006b). Estas alteraciones han tenido lugar sobre todo tipo de paisajes metropolitanos ya sean naturales (muchos de ellos con importantes valores ambientales y naturales), productivos (zonas agrícolas periurbanas) o culturales, etc., ocasionando su disminución en tamaño o su fragmentación y alteración (Forman, 1995; Dramstad, et al., 1997; Tarragona, 2003; Berling-Wolff y Wu, 2004b; Tress, et al., 2004).

Sin embargo, en este contexto, el interés internacional por la modelización de dinámicas complejas metropolitanas no ha tenido aún, sin embargo, una clara traslación o aplicación para el caso de las áreas urbanas españolas (Aguilera, 2006; Valenzuela, et al., 2008), con las diferentes peculiaridades que ellas presentan (Roca, 2003; Feria, 2004). Por ello es nuestra hipótesis que resulta posible y recomendable el desarrollo de modelos de simulación que permitan detectar y/o anticipar las posibles pautas, patrones y tendencias de los procesos de crecimiento que están aconteciendo en los últimos años en las áreas metropolitanas españolas.

Para probar dicha hipótesis, el presente trabajo tiene como objetivo mostrar cómo, mediante el diseño de un modelo de simulación basado en AC, es posible simular escenarios futuros de crecimiento urbano (Ravetz, 2000; Luca, 2007) con un horizonte temporal del año 2020, que presenten diferentes formas o patrones de ocupación del suelo en un área metropolitana española, concretamente la Aglomeración Urbana de Granada. El modelo simulado mostrará su capacidad para simular diferentes patrones de crecimiento urbano futuro, los cuales han sido identificados anteriormente para el ámbito de estudio, ahondando además en las relaciones que dichos patrones presentan con las infraestructuras viarias y sus nodos, la accesibilidad, o los diferentes usos urbanos existentes. De esta forma se mostrará a dicho modelo como un instrumento útil para la exploración de los procesos urbanos futuros, y por tanto para la planificación de ámbitos metropolitanos españoles.

El capítulo II presentará el ámbito de estudio y los datos generados para el desarrollo del trabajo. El capítulo III presentará la metodología elaborada para realizar la simulación de los escenarios futuros a través del modelo basado en AC. El capítulo IV mostrará los resultados obtenidos en las simulaciones, así como una comparación visual de los diferentes patrones y formas de crecimiento. Finalmente el capítulo V abordará la discusión y conclusiones más relevantes de este trabajo.

## **II. ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA**

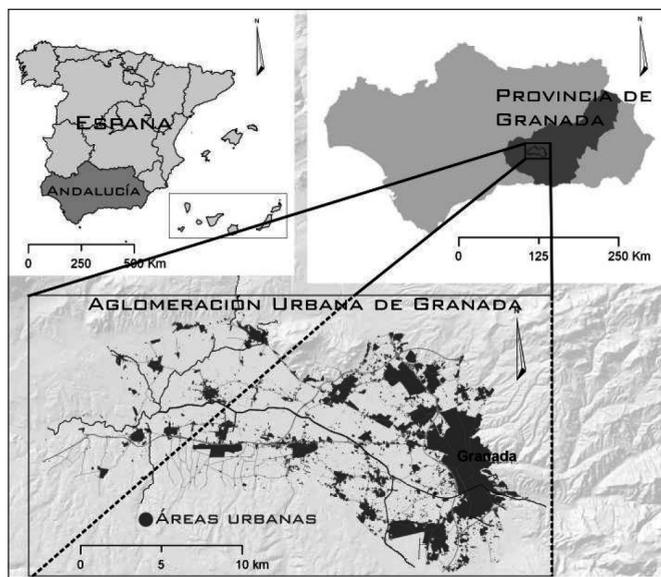
El ámbito de estudio en el que se desarrolla el presente trabajo es el Área de Metropolitana de Granada (Figura 1), tradicionalmente denominada comarca de la Vega de Granada, con una superficie de 859,34 km<sup>2</sup> y 32 municipios (Consejería de Obras Públicas, 1999), que ha experimentado en las últimas décadas una serie de transformaciones especialmente vinculadas a la ocupación de suelo con funciones urbanas (Aguilera 2008). Situada en la depresión del río Genil, en el sudeste de la península Ibérica, dicha región posee un importante valor agroproductivo (Menor, 2000), de tal forma que su organización territorial a lo largo de la historia ha reflejado la importancia económica de la explotación agraria, que sin embargo se encuentra en franca regresión (Consejería de Obras Públicas, 1999; Fernández, 2004), a la vez que presenta un elevado dinamismo urbano (Aguilera, 2008).

### **II.1. La Cartografía de ocupación urbana**

Para el ámbito de estudio se ha generado una cartografía de categorías de ocupación urbana de detalle a partir de un proceso de fotointerpretación de las ortofotografías aéreas disponibles a escala 1:10.000 para el año 2004, y publicadas por el instituto cartográfico de Andalucía. Este proceso de interpretación y posterior digitalización ha permitido generar una cartografía con 6 categorías de ocupación urbana (Figura 2), que será fundamental y servirá como base para la realización de las simulaciones futuras. Otras fuentes disponibles como la cartografía del proyecto CORINE Land Cover han sido descartadas debido a la búsqueda de una cartografía de mayor detalle que apoyase a la posterior identificación de patrones o formas de ocupación urbana (ver epígrafe III.1).

Al pretender simular únicamente el crecimiento de los usos urbanos, no se ha elaborado una cartografía con otros tipos de usos del suelo de carácter agrícola o natural, que no obs-

Figura 1  
EL ÁREA DE ESTUDIO DE LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA



Elaboración propia.

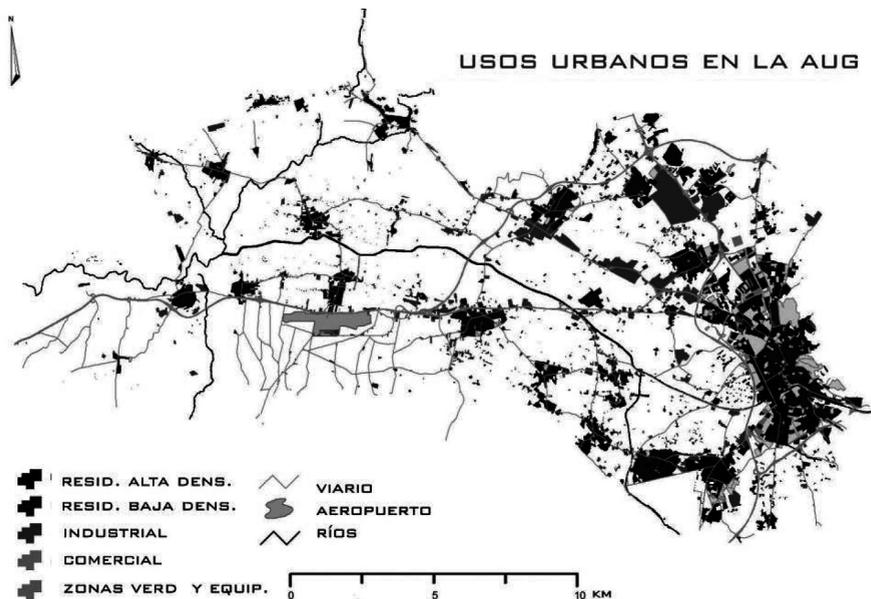
tante podría ser útil a la hora de valorar los posibles impactos derivados de los crecimientos simulados. De los diferentes usos urbanos existentes, la ortofotografía disponible ha permitido diferenciar tanto zonas residenciales de alta densidad (típicamente edificaciones residenciales en manzana abierta o cerrada) como de baja densidad (generalmente edificaciones adosadas o en hilera, tanto de carácter tradicional como de nueva construcción), así como áreas industriales y comerciales. Finalmente también se han podido identificar áreas verdes urbanas así como grandes áreas de equipamientos, como pueden ser los diferentes campus universitarios y equipamientos deportivos. Estas áreas de ocupación urbana (ver Tabla 1 para una descripción detallada de las mismas y figura 2 para su representación espacial) se han complementado con cartografía de la infraestructura viaria a escala 1:10.000 elaborada por la Excm. Diputación de Granada para el año 2004.

De esta forma, los 6 usos cartografiados incluyen aquellas áreas de mayor dinamismo en los últimos años (Menor, 2000; Aguilera, 2008) como son las áreas residenciales e industriales, y otros usos menos dinámicos como los espacios verdes y equipamientos. La adición de un mayor conjunto de categorías de ocupación urbana permitiría mostrar un mayor realismo en las simulaciones posteriores, pero por otra parte introduciría una mayor complejidad que sería necesario recoger en el modelo. Por ello, las categorías urbanas seleccionadas constituyen a nuestro juicio una solución equilibrada entre la representación realista de los procesos de crecimiento urbano y una complejidad excesiva en el modelo de simulación. A este respecto, muchos de los trabajos de simulación con modelos de este tipo, como los de White et al., (1997) o Barredo et al., (2004) emplean un número de usos urbanos similares.

Tabla 1  
CATEGORÍAS DE OCUPACIÓN URBANA

Ocupación Urbana	Descripción
<b>Residencial de alta densidad</b>	Incluyen aquellas zonas con viviendas en altura correspondientes con la ciudad tradicional. Su mayor presencia se encuentra en la capital de la AUG, aunque existen nuevos desarrollos de áreas de este tipo en los núcleos urbanos de la corona metropolitana. Densidad alrededor de 70 viviendas por ha.
<b>Residencial de baja densidad:</b>	Áreas de viviendas unifamiliares, bien por tratarse de núcleos urbanos tradicionales o por ser nuevos desarrollos de urbanizaciones y viviendas de este tipo. Densidad alrededor de 25 viviendas por ha.
<b>Industrial</b>	Incluye tanto áreas de carácter industrial como aquellas destinadas al almacenamiento y logística de productos.
<b>Comercial</b>	Áreas en las que se ubican grandes superficies comerciales, de ocio, etc., las cuales se localizan generalmente en las cercanías de los nodos de la red viaria metropolitana.
<b>Equipamientos</b>	Grandes campus universitarios, zonas hospitalarias, recintos feriales, colegios, etc.
<b>Zonas verdes</b>	Áreas verdes urbanas que configuran los parques de los distintos núcleos y ciudades.

Figura 2  
CARTOGRAFÍA DE CATEGORÍAS DE OCUPACIÓN URBANA EN LA AGLOMERACIÓN URBANA DE GRANADA



Elaboración propia.

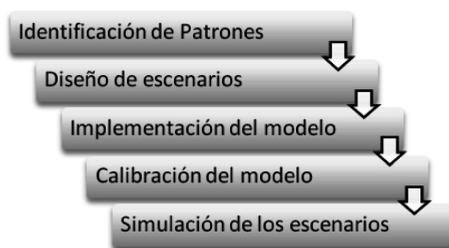
### III. METODOLOGÍA

A partir de la cartografía de ocupación urbana descrita anteriormente, se articula la metodología del presente trabajo (Figura 3). En ella, en primer lugar, se ha llevado a cabo una identificación de los diferentes patrones de ocupación urbana existentes en la AUG. Como resultado, se han identificado 4 patrones de ocupación urbana (epígrafe 3.1), con diferentes características espaciales, que han surgido como consecuencia de los procesos de crecimiento urbano que han tenido lugar en los últimos años.

A partir de los patrones identificados, y de acuerdo con los estudio diacrónicos del crecimiento urbano realizados en trabajos previos en los que se caracterizan los procesos de crecimiento urbano en el AUG (Aguilera, 2008), se han diseñado tres escenarios futuros (ver epígrafe 3.2), que intentan plasmar diferentes evoluciones posibles del crecimiento urbano en el ámbito de estudio. Se tratará de tres escenarios exploratorios, de acuerdo con la definición propuesta por Borjerson et al., (2006), en los que se intenta explorar posibles tendencias de evolución futura.

Una vez diseñados los escenarios, se ha implementado en IDRISI Kilimanjaro el modelo de simulación basado en AC (ver epígrafe 3.3), de acuerdo con la propuesta metodológica de White et al., 1997, y cuya estructura paramétrica ha sido ampliamente empleada con éxito en el trabajos de simulación del crecimiento urbano en ámbitos europeos, como son los de Barredo et al (2003); White et al., (2000) o Petrov et al., (2009). A continuación, y tras un calibrado del modelo para la simulación de dinámicas pasadas (1984-1999), se han modificado los diferentes parámetros del modelo para simular los escenarios tres escenarios futuros (epígrafe 3.4). Los siguientes apartados mostrarán una descripción detallada de cada uno de los aspectos comentados.

Figura 3  
ESQUEMA METODOLÓGICO DEL TRABAJO DESARROLLADO



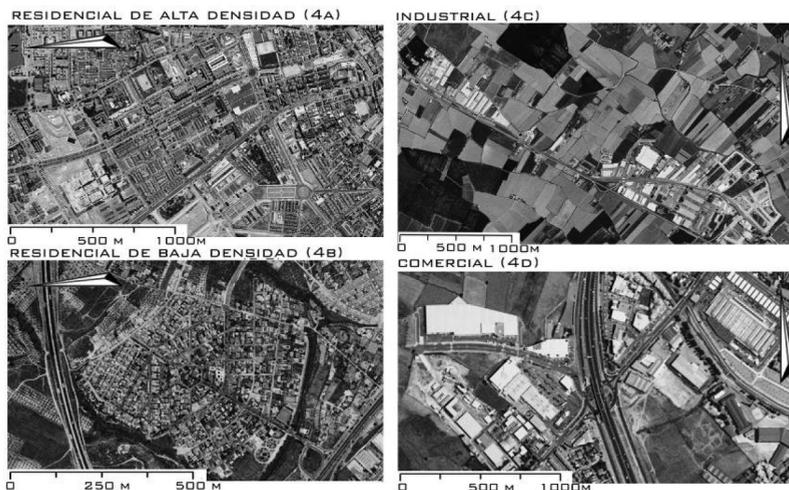
Elaboración propia.

#### III.1. Los patrones de ocupación urbana

A partir de la cartografía de ocupación del suelo urbano, y a través del proceso de foto-interpretación unido a un análisis diacrónico del crecimiento urbano en la AUG (Aguilera, 2008), se han identificado igualmente, diferentes patrones o formas de crecimiento en el

ámbito de estudio (Aguilera, 2008; Valenzuela *et al.*, 2008) (Figura 4), entendidos estos como diferentes morfologías de crecimiento caracterizados tanto por su forma como por el tipo de ocupación presente (Galster *et al.*, 2001; Song y Knaap, 2004). Estos patrones han emergido a lo largo del proceso de crecimiento urbano de la AUG en los últimos años, mostrando diferentes características espaciales de ocupación del territorio (figura 4). Son los siguientes:

Figura 4  
PATRONES DE OCUPACIÓN URBANA IDENTIFICADOS EN LA AUG

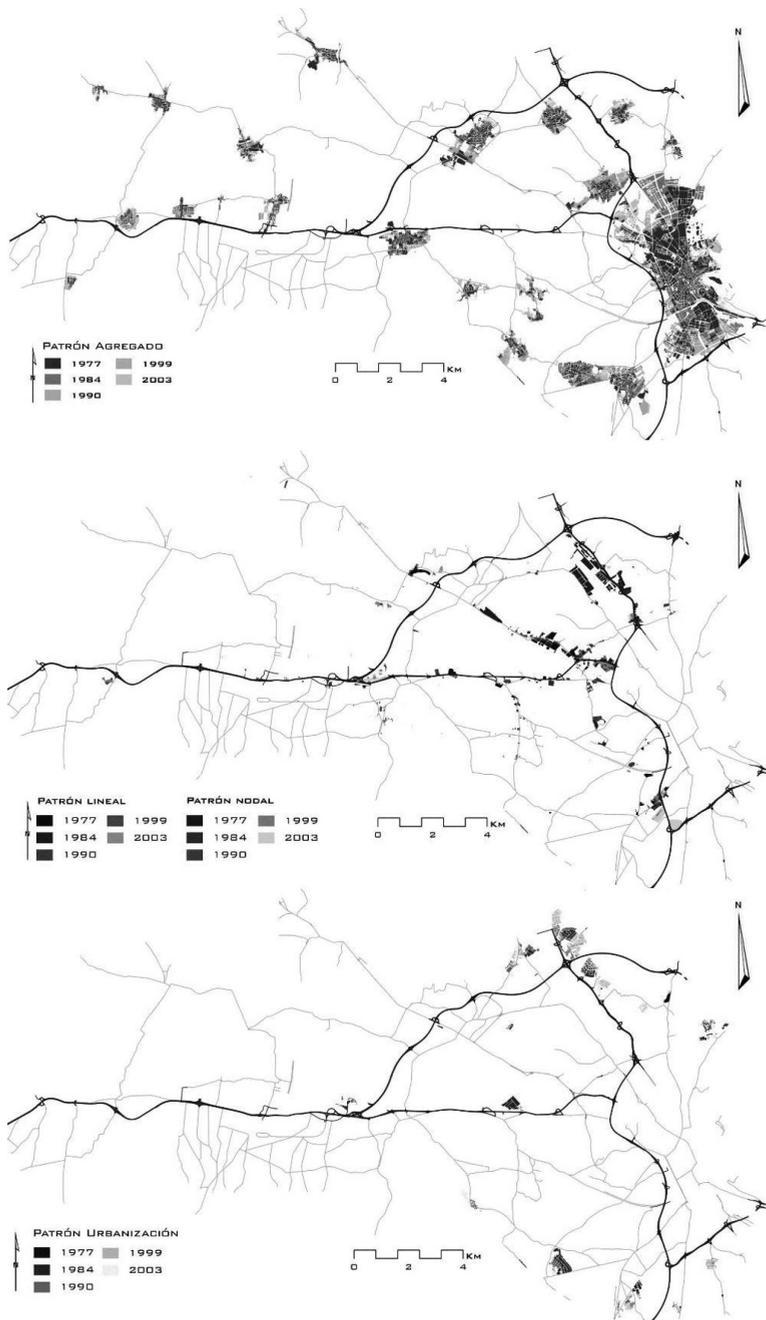


Elaboración propia.

**Agregado:** Se corresponde con las formas de crecimiento urbano tradicional de la ciudad mediterránea mediante crecimientos adyacentes al municipio consolidado (Monclús, 1998, Rueda, 1997). Dicho crecimiento es característico de un modelo de ciudad compacto, favoreciendo flujos de intercambio social, cultural, y a su vez, aumentando la eficiencia ambiental de la urbanización. Suele estar integrado mayoritariamente por zonas residenciales compactas que se mezclan con espacios libres y equipamientos. Este patrón de crecimiento se puede apreciar por ejemplo en la evolución del suelo urbano de la zona norte de la ciudad de Granada entre 1977 y 1984 (figura 4a).

**Urbanizaciones:** Explica la aparición de formas urbanas con una función preferentemente residencial, con predominio de las tipologías residenciales dispersas en las que la vivienda unifamiliar y la baja densidad urbana son características (Camagni *et al.*, 2002) (ver figura 4b). Estos patrones revelan crecimientos con una fuerte dependencia del vehículo privado ya que en muchos casos los nuevos crecimientos se encuentran alejados de núcleos urbanos consolidados, dificultando a su vez la puesta en marcha de un servicio de transporte público más eficiente. Algunas urbanizaciones al norte del ámbito de estudio son un claro ejemplo del patrón de crecimiento.

Figura 5  
DISTRIBUCIÓN DE LOS PATRONES DE OCUPACIÓN EN EL AUG Y FECHA DE CRECIMIENTO



Elaboración propia.

**Crecimiento lineal:** Identifica formas de crecimiento urbano que tienden de manera preferente a ocupar los espacios circundantes a las vías de comunicación (figura 4c). Las tipologías predominantes en estos patrones de crecimiento son los suelos industriales o de actividades mixtas (Font, 2004), dada las ventajas logísticas de ocupar dichas vías. Este patrón lineal de crecimiento se puede apreciar en el área de estudio a lo largo de algunas de las infraestructuras de comunicaciones más importantes.

**Crecimiento nodal:** Explica los crecimientos urbanos existentes junto a los principales nudos de comunicación – cruces de carreteras, nudos de infraestructuras lineales, etc. (figura 4d). En el área de estudio este patrón de crecimiento se caracteriza tanto por tipologías comerciales como industriales, pero en las que la tipología comercial es la principal representante. Algunos ejemplos en la comarca de la vega de Granada se pueden apreciar en la zona Sur.

A partir de estos patrones descritos, se han cartografiado los distintos patrones de ocupación urbana para la AUG, mediante un proceso previo de interpretación de la ortofografía aérea (Figura 5).

### III.2. Diseño de los escenarios futuros

A partir de los datos de ocupación del suelo en la AUG en el año 2004 (figura 2), los patrones de ocupación urbana para el ámbito de estudio (epígrafe 3.1), y de acuerdo con trabajos previos de análisis del crecimiento urbano en la AUG para el período 1977-2004 (Aguilera, 2008) se han diseñado tres escenarios exploratorios (Dreborg, 2004; Borjerson et al., 2006) para el año 2020. En estos escenarios, los usos urbanos adoptarán diferentes patrones de ocupación, y crecerán con intensidades variables, de acuerdo con dos principales fuerzas motrices o *drivers* del crecimiento: el contexto económico en el que tienen lugar los desarrollos, y la capacidad del planeamiento futuro para regular dichos crecimientos. De esta forma, cada uno de los escenarios pondrá énfasis en alguna de las tendencias de crecimiento más importantes identificadas para esta área de estudio en los años previos: crecimientos residenciales en urbanizaciones, crecimientos agregados de la ciudad tradicional, desarrollos industriales y comerciales, etc. Por tanto, no deben ser considerados como predicciones más o menos precisas del futuro (Berdoulay, 2009) sino como diferentes posibilidades de evolución metropolitana. Además, también muestran diferentes intensidades de crecimiento, comparadas con la tasa de los últimos años (1984-1999, de 80 ha/año), incluyendo desde tasas menores (escenario S3) hasta tasas de crecimiento mayores (escenario S1), pasando por tasas de crecimiento iguales a las de los citados años (escenario S2). Cabe destacar que no se ha incluido entre ellos un escenario tendencial puesto que los principales objetivos del trabajo son mostrar la capacidad del modelo para simular diferentes patrones y formas de ocupación metropolitana, así como mostrar alternativas de crecimiento claramente diferenciadas. Los tres escenarios son:

#### III.2.1. Escenario de incremento de la ocupación residencial (escenario S1)

Este escenario explora la posibilidad de una intensificación del crecimiento urbano, provocada por un incremento de la actividad económica, que se traducirá especialmente en el

desarrollo de nuevas zonas residenciales, y la existencia de un plan con poca capacidad de regulación de los crecimientos, que por tanto tenderán a ser más dispersos y menos regulados. Se ha establecido un incremento del 30% de la tasa de crecimiento sobre la media anual registrada en el período 1984-1999, con el objetivo de representar un incremento en las tendencias en el crecimiento experimentadas en los últimos años, a modo de tendencia agravada. En lo que respecta a las características espaciales de los crecimientos, el escenario contempla: (1) un incremento de la dispersión urbana de las áreas residenciales, (2) las áreas industriales experimentan crecimientos en el entorno de las áreas industriales ya existentes, (3) los usos comerciales se comportan de manera similar; y por último (4) se incluyen nuevas infraestructuras viarias actualmente en proyecto<sup>1</sup>, que permitirán apoyar las características de los crecimientos establecidos para este escenario.

### *III.2.2. Escenario de especialización tecnológica e industrial (escenario S2)*

Este escenario explora la posibilidad de un incremento de la actividad económica hasta situarse a los niveles del período de mayor expansión económica, pero en este caso dirigida especialmente a la creación de nueva actividad industrial y comercial, que además será potenciada en los planes metropolitanos. El escenario se caracteriza por: (1) una tasa de crecimiento similar a la experimentada en los últimos años, considerando una coyuntura económica favorable; (2) un fuerte incremento de los usos industriales y comerciales en el entorno de la red de carreteras, especialmente favorecidos por el planeamiento metropolitano; (3) un crecimiento moderado de las áreas residenciales, que no se hacen más dispersas; y finalmente (4) la inclusión de nuevas infraestructuras en proyecto, al igual que en el caso del escenarios S1.

### *III.2.3. Escenario de contención de la ocupación urbana (escenario S3)*

Este escenario asume un contexto económico menos favorable que el de los anteriores años y similar al actual, que en cualquier caso permitirá favorecer el desarrollo de nuevas zonas productivas, concretamente áreas industriales y comerciales. Igualmente contempla la existencia de un plan metropolitano más restrictivo, especialmente con los crecimientos residenciales. Por ello las principales características del mismo son: (1) un descenso de la tasa de crecimiento urbano experimentada en los últimos años que se reduce a un 30 %, dado el contexto económico menos favorable, especialmente para el crecimiento residencial; (2) los crecimientos industriales y comerciales se localizan en el entorno de los principales nodos de las infraestructuras viarias, potenciados por un planeamiento metropolitano que busca ubicarlos en áreas de interés estratégico; y (3) no se incluyen nuevas infraestructuras viarias, dada la coyuntura menos favorable desde la perspectiva económica.

---

1 Infraestructuras propuestas en el Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada (Consejería de Obras Públicas, 1999) (POTAUG) que previsiblemente generará nuevas tensiones urbanísticas a lo largo de su trazado, como consecuencia de su carácter metropolitano.

### III.3. Diseño del modelo basado en AC

En lo que respecta al diseño del modelo de simulación basado en AC, el cuál será empleado para simular espacialmente los tres escenarios futuros propuestos, se ha recurrido a la estructura propuesta por White y Engelen (1993) y White, et al (1997). Esta estructura consiste en un modelo paramétrico que no es un autómata celular en sentido estricto, sino que además de **un parámetro de vecindad** inspirado en el funcionamiento de los autómatas celulares propiamente dichos (ver Torrens y O'Sullivan, 2000), cuenta con la inclusión de un **parámetro de accesibilidad**, un **parámetro de aptitud del territorio**, y por último uno **denominado de aleatoriedad**.

De los múltiples factores explicativos que pueden relacionarse con el proceso de crecimiento urbano, y que han sido explorados en diversos trabajos a través de estudios estadísticos (Cheng y Masser, 2003; Plata-Rocha et al., 2010) la estructura propuesta por White et al (1997) únicamente emplea los cuatro parámetros citados anteriormente. Esta estructura, que podría parecer en principio demasiado simple, ha alcanzado sin embargo gran popularidad dada su sencillez (Santé et al., 2010), así como su enfoque «de abajo arriba», en el que se prima la emergencia de formas complejas a partir del establecimiento de reglas de vecindad (O'Sullivan y Torrens, 2000). Modelos basados en esta estructura y que emplean estos mismos factores han sido utilizados para la simulación del crecimiento urbano en diversos ámbitos europeos como Dublín (Barredo et al., 2003); Holanda (White y Engelen, 2000); Madrid (Gómez y Barredo, 2008) o la región del Algarve en Portugal (Petrov et al., 2009) (Para una revisión amplia acerca de la aplicabilidad de esta estructura consultar Santé et al., 2010). Por todo ello se ha considerado una estructura perfectamente aceptable y adecuada para la simulación del crecimiento urbano, y cuya metodología de simulación resulta especialmente interesante aplicar a las áreas metropolitanas españolas.

De una manera simple, se puede señalar que los 4 factores que forman parte de la estructura del modelo, normalizados en valores de 0 a 1, con valores máximos de 1 y mínimos de 0 para cada uno de ellos, se pueden combinar entre sí para generar un potencial de transición. Este potencial establecerá un valor de la tendencia a la transformación de los diferentes píxeles que componen el ámbito de estudio. A continuación, empleando una regla de decisión, se escogerán, en función de los valores del potencial de transición, las áreas o píxeles más proclives para el cambio, y hacia qué uso cambiarán.

Este potencial de transición se calculará únicamente para 4 de los usos detallados en el epígrafe II.1, de tal forma que sólo estos usos se considerarán susceptibles de crecimiento. Estos usos se denominan usos DINÁMICOS, esto es, que pueden cambiar su estado en las simulaciones, y están constituidos por las zonas residenciales de alta y de baja densidad, zonas comerciales y zonas industriales. El resto de los usos se han considerado usos ESTÁTICOS, que no pueden cambiar su estado, pero que por otra parte tendrán capacidad de influir en los cambios de los usos dinámicos. Este recurso, también empleado en algunos de los trabajos existentes en la materia, tiene como objetivo simplificar las tareas de diseño del modelo, considerando únicamente como usos dinámicos aquellos con un mayor dinamismo (White et al., 1997).

Una vez calculado el potencial de transición para los usos dinámicos, la selección de aquellos píxeles que se transformarán en usos urbanos supone el cierre de un ciclo o iteración

del modelo, el cual ha sido concebido para representar el proceso de cambio acontecido a lo largo de un año. En este sentido, es necesario señalar que la cantidad de píxeles seleccionados para su transformación debe ser establecida para ajustar los crecimientos simulados en cada iteración a la tasa de crecimiento que se pretenda. Otros trabajos en esta línea (White y Engelen, 2000; Barredo *et al.*, 2003), permiten obtener estas «demandas» de cambio para cada uso e iteración a través de otros modelos socio-económicos externos vinculados al de autómatas celulares, que operan a una escala más regional. Estos modelos regionales, en función de un conjunto de parámetros económicos, demográficos, etc., estiman unas demandas de crecimiento, que posteriormente son localizadas por el modelo basado en AC. Sin embargo de acuerdo con los objetivos de este trabajo no se ha explorado la realización de un modelo de carácter regional.

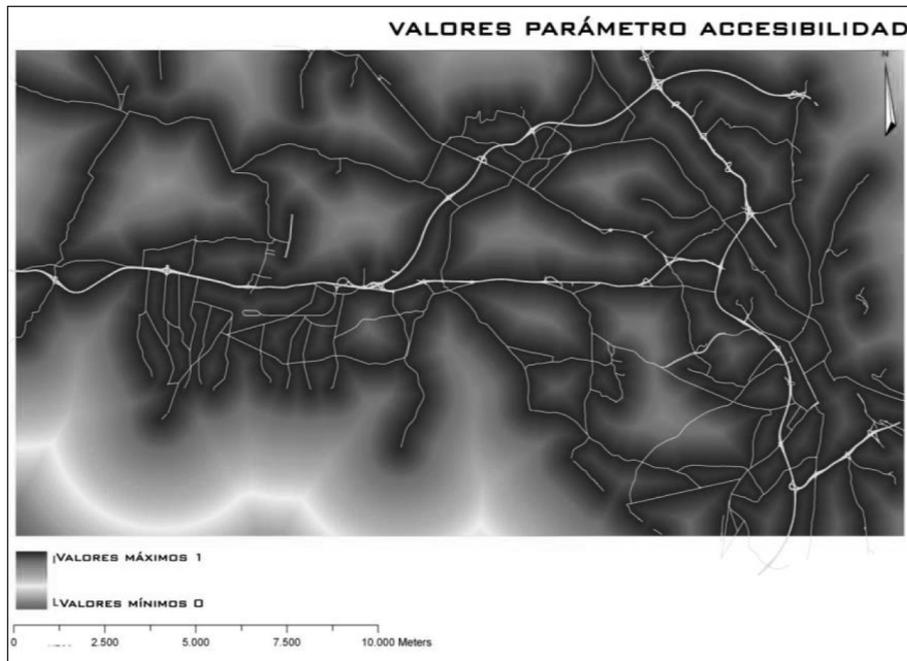
### *III.3.1. Los factores del modelo*

De forma detallada, se puede abordar la explicación de cada uno de los cuatro parámetros que componen el modelo. Especial atención merecerá el parámetro de vecindad, por ser el que se encuentra basado en el funcionamiento de los AC y el de mayor complejidad. Por ello será analizado con mayor detenimiento.

**El factor de accesibilidad:** tiene como objetivo reproducir en las simulaciones las relaciones entre el crecimiento urbano y la red de transporte que lo soporta. En este sentido, la incorporación del factor de accesibilidad contribuye a reflejar los efectos de atracción de las nuevas zonas urbanas que las infraestructuras viarias generan. En el modelo, este parámetro será introducido como una capa de información que represente los valores de distancia en línea recta a la red de carreteras, normalizados de 0 a 1. De esta forma, las celdas adyacentes a la red de carreteras presentarán un valor máximo del parámetro de accesibilidad, representados con valor 1, mientras que aquellas más alejadas de la red viaria tendrán un valor mínimo, al que se asignará el valor 0. Todas las demás celdas recibirán valores intermedios de accesibilidad entre 0 y 1, a partir de una función de transformación lineal. Para su cálculo se han obtenido las distancias a la red viaria existente (ver figura 6), mediante el comando DISTANCE de Idrisi, que posteriormente se ha transformado en valores de 0 a 1 mediante el comando FUZZY.

**El factor de aptitud del territorio:** que tiene como objetivo poner de manifiesto que el proceso de difusión del crecimiento de la ciudad no es isotrópico (Santos, 1994), como es el caso de aquellos autómatas celulares estrictos, (caso del Game of Life de Conway, 1970) o de los seminales postulados de Christaller en 1933, sino que existen diferencias en cuanto a, por ejemplo, pendientes, relieve, uso del suelo, etc. Estas diferencias que facilitan o dificultan el desarrollo o crecimiento de la ciudad. Así pues, este factor refleja la facilidad o dificultad que existe de forma intrínseca en el territorio para el cambio de estado de las celdas en las que se divide el mismo (Benenson y Torrens, 2004). Se introducirá en el modelo como una capa de aptitud para la ocupación urbana normalizada con valores de 0 a 1, que en este caso se ha obtenido únicamente a través de los valores de pendiente. Se podrían incluir otras variables con relevancia para la determinación del proceso de aptitud, como podrían ser la calificación del suelo, equipamientos, etc. No obstante la consideración de la pendiente como factor modificador de la aptitud en estos modelos ha sido considerada suficiente (Barredo *et al.*, 2003), y por ello, y con el objetivo de simplificar el modelo al máximo, se ha empleado en solitario.

Figura 6  
MAPA DEL FACTOR DE ACCESIBILIDAD



Elaboración propia.

En lo que respecta a su modelado, al igual que sucedía en el caso de la accesibilidad, aquellas celdas de la capa de pendientes que presenten valores más bajos, se corresponderán con las zonas de mayor aptitud, y por tanto serán representadas con valores de 1. Por el contrario, aquellas zonas de valores más altos de pendiente se corresponderán con valores de aptitud mínimos, y por tanto recibirán valores de 0. Los píxeles con valores de pendiente intermedios recibirán valores entre 0 y 1 de acuerdo con una transformación lineal. Finalmente, para el cálculo de este parámetro se ha generado un mapa de pendientes en Idrisi Kilimanjaro a partir del MDT existente para el ámbito de estudio. Posteriormente ha sido transformado en valores de 0 y 1 a través del comando FUZZY.

**El factor de aleatoriedad o parámetro estocástico:** introducido por White y Engelen (1993), y mantenido por la mayor parte de los trabajos de simulación herederos de estos. Este parámetro introduce en las simulaciones un efecto que trata de emular la aleatoriedad inherente a los sistemas sociales complejos, como son las ciudades (Batty y Xie, 1997), aportando un mayor o menor grado de dispersión a las simulaciones generadas (Aguilera, 2006). En este sentido, permite que en las simulaciones se produzcan cambios en la ocupación urbana en lugares que en principio, y teniendo en cuenta los otros factores, no serían los más favorables, como de hecho sucede en la realidad.

Siguiendo el esquema para su cálculo propuesto por White *et al* (1997), este parámetro se puede obtener de acuerdo con la ecuación 1.

Ecuación 1  
CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE ALEATORIEDAD

$$v = 1 + (-\ln(rand))^\alpha$$

Donde *rand* es un número aleatorio entre 0 y 1 y  $\alpha$  permite ajustar el grado de perturbación (o de dispersión) que será introducido. En las primeras etapas de desarrollo del modelo, este último parámetro ha sido ajustado a los valores de la dimensión radial (la pendiente de la relación entre el tamaño de un objeto y su diámetro), calculada para el ámbito de estudio (Barredo et al., 2003); obteniéndose un valor de 0,6. Sin embargo, este valor ha sido modificado a la vista de los resultados de las simulaciones obtenidas, quedando finalmente establecido en valores de 0,3 que permitan un mayor grado de similitud entre las simulaciones y la evolución real de la ocupación urbana.

**El factor de vecindad:** se correspondería con la parte propia de Autómatas Celulares del modelo. Este parámetro recoge los efectos de atracción y repulsión que se generan entre las distintas categorías de ocupación urbana, (figura 2). Está constituido por un espacio teselado (una malla raster regular) (O'Sullivan y Torrens, 2000), con un tamaño de 50 x 50 metros, compuesto por 121 celdas. Dicho tamaño de celda ha sido seleccionado a partir del tamaño de los elementos de menor entidad digitalizados en el proceso de generación de la cartografía de ocupación urbana, y da lugar a una vecindad extendida de 121 celdas de 2500 m<sup>2</sup>. Por ser el parámetro de mayor complejidad que opera en el modelo, será explicado con mayor detalle.

La vecindad se comporta de forma similar a las ventanas móviles de filtrado (Gutiérrez y Gould, 1994) ampliamente empleadas por los SIG y en el tratamiento de imágenes de satélite (Chuvieco, 2002), de tal forma que la ventana se desplazaría por todo el ámbito de trabajo, obteniendo para cada celda sobre la que se coloca, un valor de vecindad en función de los distintos tipos de usos urbanos presentes en las 120 celdas adyacentes que componen la vecindad de dicha celda. En este sentido, y para el funcionamiento de dicha ventana, es necesario establecer unos *valores de vecindad* similares a los establecidos para una ventana de filtro. Estos valores (*mkd*) estarán en relación principalmente con dos aspectos: con el tipo de usos urbanos presentes en la ventana de vecindad para cada celda (algunos usos actuarán como atractores y otros como repulsores de los distintos usos dinámicos); así como con la distancia a la que se encuentre cada una de esas zonas urbanas de la celda central:

En lo que se refiere al tipo de usos presentes en la vecindad, cada categoría dinámica se encontrará atraída o repelida por cada uno de las demás usos urbanos, en función de un conjunto de afinidades o compatibilidades entre los mismos. Así por ejemplo, en lo que se refiere los usos residenciales de baja densidad, la presencia en su vecindad de múltiples zonas industriales, generará un efecto de repulsión, mientras que en cambio, el efecto será el contrario si se trata de la ubicación de nuevas zonas industriales. Por su parte las áreas agrícolas no incluidas en las categorías definidas en el epígrafe II.1 se agrupan bajo la categoría de «no urbano» y no presentarán ningún efecto de atracción o repulsión sobre los usos urbanos dinámicos, de tal forma que su comportamiento es neutro en el modelo.

En lo que respecta a la distancia, el efecto de atracción-repulsión guarda relación con la distancia a la que los distintos usos se encuentren de la celda para la que la ventana de vecindad está calculando el valor (Figura 7). Así pues, generalmente el efecto de atracción o repulsión que unos usos ejercerán sobre otros decaerá con la distancia, lo que es conocido como *distance-decay effect* (Tobler, 1970) y que como se señala en White *et al.*, (1997) aparece como un carácter común a la mayoría de las ciudades. Combinando los dos aspectos, se puede generar una tabla con los valores de vecindad para cada uno de los usos dinámicos. La asignación de unos valores u otros de vecindad dependerá de un proceso de calibración, que se aborda más adelante.

Figura 7  
ZONAS DE DISTANCIA PARA EL CÁLCULO DE LA VECINDAD EN UNA MATRIZ DE FILTRADO DE 11X11

		1	8	1	7	1	6	1	5	1	6	1	7	1	8						
		1	4	1	3	1	2	1	1	1	0	1	1	1	2	1	3	1	4		
		1	8	1	3	9	8	7	6	7	8	9	1	3	1	8					
		1	7	1	2	8	5	4	3	4	5	8	1	2	1	7					
		1	6	1	7	4	2	1	2	4	7	1	1	1	6						
		1	5	1	0	6	3	1	0	1	3	6	1	0	1	5					
		1	6	1	7	4	2	1	2	4	7	1	1	1	6						
		1	7	1	2	8	5	4	3	4	5	8	1	2	1	7					
		1	8	1	3	9	8	7	6	7	8	9	1	3	1	8					
		1	4	1	3	1	2	1	1	1	0	1	1	1	2	1	3	1	4		
		1	8	1	7	1	6	1	5	1	6	1	7	1	8						

Elaboración propia.

### III.3.2. El cálculo del potencial de transición

De manera formal, el potencial de transición hacia cada uno de los cuatro usos dinámicos, puede representarse matemáticamente, de acuerdo con la propuesta de White *et al* (1997), y las modificaciones realizadas en trabajos posteriores (Valenzuela *et al*; 2008), como función de los 4 parámetros señalados (Ecuación 2).

Ecuación 2  
POTENCIAL DE TRANSICIÓN A PARTIR DE LOS FACTORES INTEGRANTES DEL MODELO

$$P_j = v \times s \times a_j \left( \sum_{k,i,d} m_{kd} \right)$$

Donde  $P_j$  es el potencial de transición para cada celda del uso urbano  $j$ . Es el resultado de la combinación de los diversos factores para cada uso, de tal forma que se obtiene un poten-

cial de transición para cada uno de los diferentes usos urbanos que el modelo simula. En este caso únicamente se estimará para los usos dinámicos.

$v$  es el factor de aleatoriedad o estocástico.

$s$  es el factor de aptitud, que se mantiene constante para todos los usos.

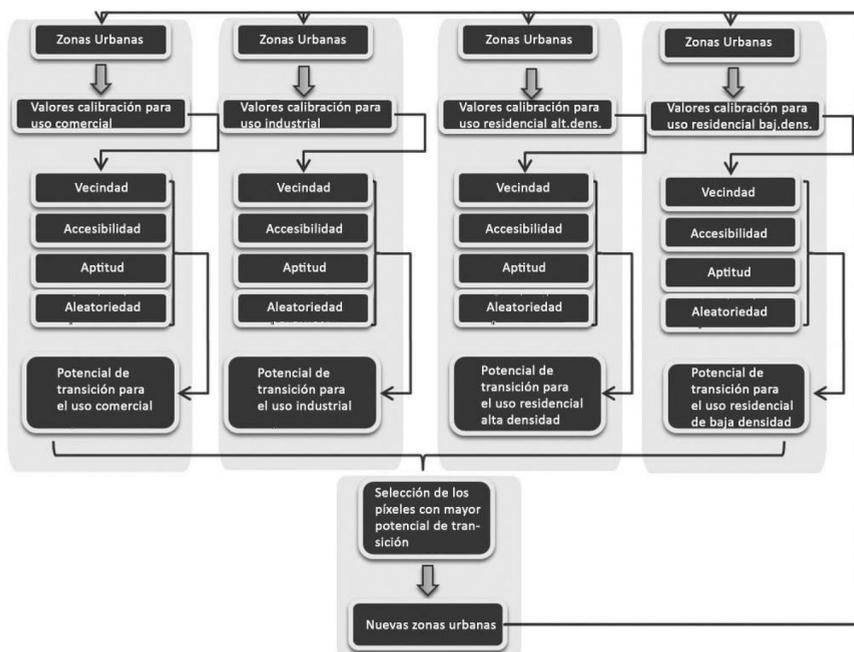
$a$  es el parámetro de accesibilidad, que se mantiene constante para todos los usos.

$m_{kd}$  hace referencia a los valores de vecindad que representan los efectos de atracción y repulsión entre usos urbanos.

De esta forma, para cada uno de los usos dinámicos se estimará un potencial de transición (potencial de transición a zonas comerciales, a zonas industriales, a zonas residenciales de alta densidad y a zonas residenciales de alta densidad) (Figura 8), que constituirán cuatro bloques del modelo. Una vez estimados los potenciales, existe un quinto bloque que seleccionará de entre los cuatro potenciales, aquellos píxeles con el valor más alto, que se transformarán en nuevas zonas urbanas de la categoría para la que presentan un mayor potencial. El número de píxeles seleccionados dependerá, como se señaló anteriormente, de un valor numérico que se debe especificar al modelo y que permite ajustar las tasas de crecimiento de cada escenario.

Figura 8

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA OBTENCIÓN DE LOS POTENCIALES DE TRANSICIÓN PARA CADA UNO DE LOS USOS DINÁMICOS (4 PRIMEROS BLOQUES) Y SELECCIÓN DE LOS PÍXELES QUE SE TRANSFORMARÁN EN ZONAS URBANAS (BLOQUE 5)



Elaboración propia.

### III.4. La Calibración del modelo y la relación de las características de los escenarios con sus parámetros

De acuerdo con el funcionamiento del modelo descrito, para proceder a la simulación de dinámicas urbanas es necesario llevar a cabo un proceso de calibración de los valores de vecindad. Este proceso de calibración se ha realizado para las dinámicas pasadas comprendidas entre 1984-1999, en diversos trabajos previos (Aguilera et al., 2006; Aguilera, 2008). Tras el proceso de calibración, los resultados de dichas simulaciones para el año 1999 comparadas con la situación real para ese año, han mostrado correspondencias elevadas, como demuestra un índice kappa global del 0,74 para las tabulaciones cruzadas; que para el caso de los usos residenciales presenta valores incluso superiores.

Tabla 2  
VALORES DE CALIBRACIÓN PARA EL USO RESIDENCIAL DE BAJA DENSIDAD PARA LOS CUATRO PATRONES DE OCUPACIÓN. (FUENTE: VALENZUELA ET AL., 2008)

Calibración residencial disperso	ZONAS DE DISTANCIA																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>PATRÓN LINEAL</b>																		
Comercial	6	6	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrial	0	0	0	0	0	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7
Residencial disperso	90	90	90	90	90	90	70	70	70	70	5	5	5	5	5	5	5	5
Residencial compacto	60	25	20	16	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Espacio Libre	40	25	15	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Equipamientos	50	35	25	20	14	10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5
Viarío	100	100	100	100	100	100	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
<b>PATRÓN NODAL</b>																		
Comercial	6	6	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrial	60	60	60	60	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Residencial disperso	90	90	90	90	90	90	70	70	70	70	5	5	5	5	5	5	5	5
Residencial compacto	50	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Espacio Libre	40	25	15	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Equipamientos	50	35	25	20	14	10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5
Viarío	70	60	47	35	21	17	14	12	10	11	11	10	11	10	11	10	11	10
<b>PATRÓN ABREGADO</b>																		
Comercial	-30	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrial	0	0	2	5	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7
Residencial disperso	95	95	95	95	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Residencial compacto	49	25	25	16	12	9	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Espacio Libre	40	25	15	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Equipamientos	50	35	25	20	14	10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5
Viarío	3	3	3	7	7	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7
<b>PATRÓN URBANIZAC.</b>																		
Comercial	-30	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Industrial	0	0	2	5	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7	6	7
Residencial disperso	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	-9	-9	-9
Residencial compacto	50	50	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Espacio Libre	40	25	15	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Equipamientos	50	35	25	20	14	10	9	8	7	6	5	5	5	5	5	5	5	5
Viarío	70	60	47	35	21	17	14	12	10	11	11	10	11	10	11	10	11	10

Este proceso de calibración empírica de las dinámicas pasadas, ha permitido además determinar qué valores de atracción-repulsión o de vecindad dan lugar cada uno de los patrones de crecimiento urbano identificados en el área de estudio. A este respecto, la tabla 2 muestra los valores de vecindad adecuados para la simulación de los cuatro patrones identificados, referidos al uso residencial de baja densidad. Así, empleando la relación entre los valores de vecindad y los patrones de ocupación urbana, es posible seleccionar qué patrones de ocupación urbana se pretenden simular.

A continuación, y con el objetivo de simular los tres escenarios, ha sido necesario relacionar las características descritas en ellos con los cuatro parámetros del modelo. En el caso del parámetro de vecindad, esta relación se ha implementado a través de la asignación de patrones de ocupación a los cuatro usos urbanos en cada escenario. Para el caso del parámetro de accesibilidad, se ha incluido en su cálculo las nuevas infraestructuras viarias establecidas en los escenarios. Para el caso del parámetro de aleatoriedad o estocástico, se ha modificado el valor de  $\alpha$ , para ajustar el grado de dispersión urbana simulada en cada escenario. Finalmente, el parámetro de aptitud ha permanecido constante en todos los escenarios. La tabla 3, muestra de forma resumida cómo se han incorporado las características de los escenarios mediante los diferentes parámetros del modelo.

Tabla 3  
CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS TRES ESCENARIOS DISEÑADO

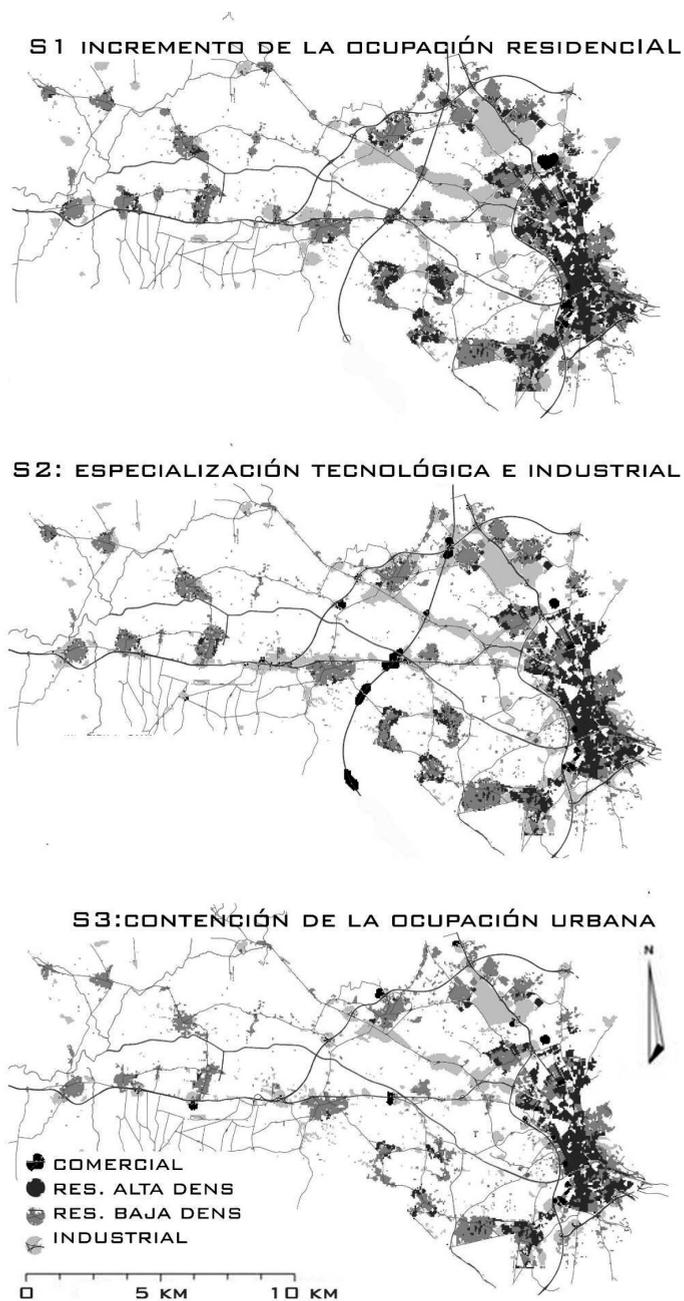
Escenario	Patrones de ocupación	Factores del modelo	Tasa de crecimiento
<b>Escenario de incremento de la ocupación residencial (S1)</b>	<b>Residencial de baja densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento en urbanizaciones	<b>Accesibilidad:</b> Incorpora la 2ª ronda de circunvalación así como el viario propuesta en el Plan Metropolitano	La tasa de crecimiento se ve incrementada un 33 % con respecto a la observada en los años anteriores. (+ 100 ha/año)
	<b>Residencial de alta densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento en urbanizaciones	<b>Vecindad:</b> Valores de atracción repulsión para la simulación de los patrones establecidos.	
	<b>Comercial</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal.	<b>Parámetro Estocástico:</b> Se aumenta el valor de $\alpha$	
	<b>Industrial</b> En este escenario se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal		

<b>Escenario de especialización tecnológica e industrial (S2)</b>	<b>Residencial de baja densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento agregado	<b>Accesibilidad:</b> Incorpora la 2ª ronda de circunvalación así como el viario propuesta en el Plan Metropolitano	La tasa de crecimiento anual mantiene, con una caída importante en lo que a los crecimientos residenciales se refiere. (80 ha/año)
	<b>Residencial de alta densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento en urbanizaciones	<b>Vecindad:</b> Valores de atracción repulsión para la simulación de los patrones establecidos.	
	<b>Comercial:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal.	<b>Parámetro Estocástico:</b> Se reduce el valor de $\alpha$	
	<b>Industrial:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal.		
<b>Escenario de contención de la ocupación urbana (S3)</b>	<b>Residencial de baja densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de agregado.	<b>Accesibilidad:</b> No incorpora nuevas infraestructuras	La tasa de crecimiento se ve reducida a un 33 % de la experimentada durante los últimos años. (27 ha/año)
	<b>Residencial de alta densidad:</b> Se caracteriza por un patrón de agregado.	<b>Vecindad:</b> Valores de atracción repulsión para la simulación de los patrones establecidos.	
	<b>Comercial:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal.	<b>Parámetro Estocástico:</b> se reduce el valor de $\alpha$	
	<b>Industrial:</b> Se caracteriza por un patrón de crecimiento nodal.		

#### IV. RESULTADOS: SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

Tras el establecimiento de la relación entre los parámetros del modelo y las características descritas en los escenarios, se han generado las simulaciones espaciales para cada uno de ellos. Los resultados de las mismas quedan recogidos en la figura 9, mientras que los valores de ocupación final para cada uno de los usos simulados se presentan en la tabla 4.

Figura 9  
RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE LOS TRES ESCENARIOS ESTABLECIDOS



Elaboración propia.

Tabla 4  
 OCUPACIÓN URBANA DE LOS USOS DINÁMICOS EN LOS TRES ESCENARIOS SIMULADOS

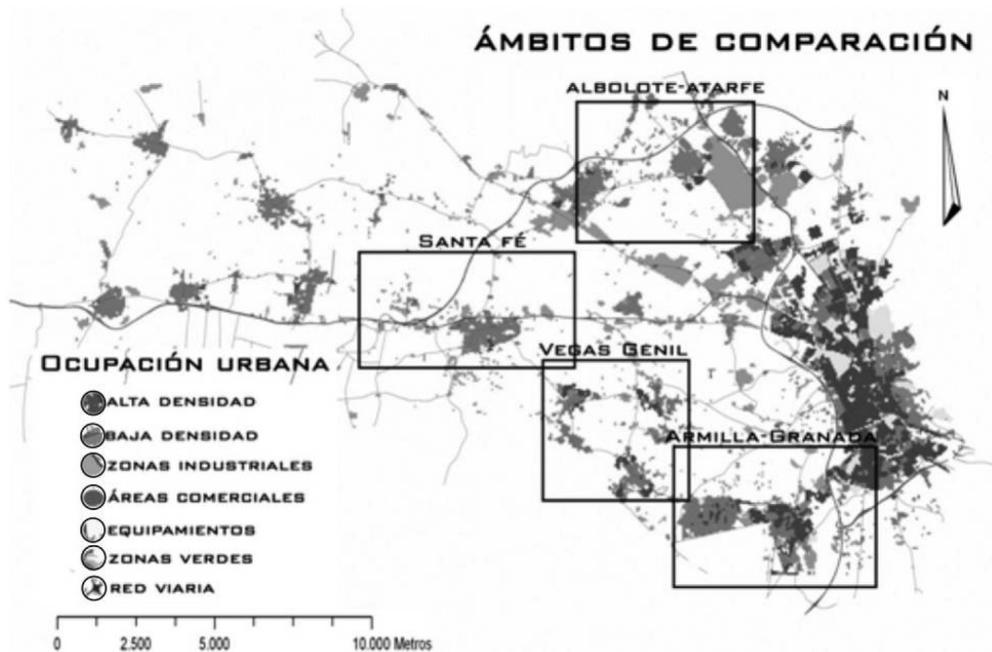
Escenario	Uso urbano	Superficie en hectareas
Escenario S1	Residencial de alta densidad	2325,25
	Residencial de baja densidad	1575,75
	Industrial	1678,25
	Comercial	76,75
Escenario S2	Residencial de alta densidad	2106,25
	Residencial de baja densidad	1200,25
	Industrial	1800,5
	Comercial	174
Escenario S3	Residencial de alta densidad	1970,75
	Residencial de baja densidad	1014,25
	Industrial	1375,5
	Comercial	85

Tanto en la tabla 4 como en la figura 9 se pueden observar las manifiestas diferencias en lo que a los patrones o formas de crecimiento así como de intensidades mostradas por los diferentes escenarios se refiere. Así, se pone de manifiesto, por ejemplo, la mayor intensidad de ocupación mostrada en el Escenario de incremento de la ocupación residencial (S1), la forma global de los crecimientos, muchos de ellos asociados a una de las principales infraestructuras de movilidad proyectadas (denominada «2ª Circunvalación»), o los patrones de crecimiento lineal para las zonas industriales en el escenario de especialización tecnológica (S2). En cualquier caso, y para mostrar de forma detallada las diferencias generadas en las simulaciones, se han seleccionado diferentes sectores o áreas que son representativas de las mismas (figura 10). A continuación se presenta una comparación de los escenarios en dichos sectores.

#### IV.1. CONURBACIÓN ARMILLA-GRANADA

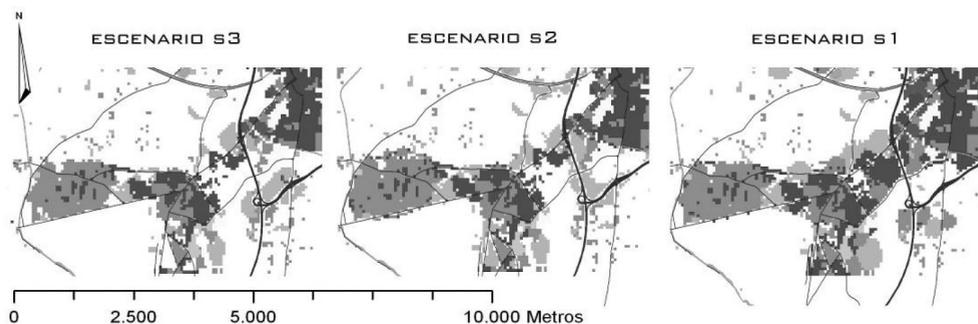
El primero de los sectores de comparación se corresponde con la conurbación formada por los núcleos urbanos de Granada, Armilla y Churriana (Figura 11). Se puede observar un mayor proceso de agregación en el escenario S1, con importantes crecimientos de suelos residenciales de alta y de baja densidad, a la vez que aparecen algunas zonas industriales en su entorno. Por el contrario, en el caso de los escenarios S3 y S2 los crecimientos tienden a ser de tipo industrial en torno a los principales nodos de la zona en el primer caso, y de forma lineal en el segundo.

Figura 10  
ÁMBITOS DE COMPARACIÓN VISUAL DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS



Elaboración propia.

Figura 11  
COMPARACIÓN DE LOS ESCENARIOS EN EL SECTOR CONURBACIÓN ARMILLA-GRANADA



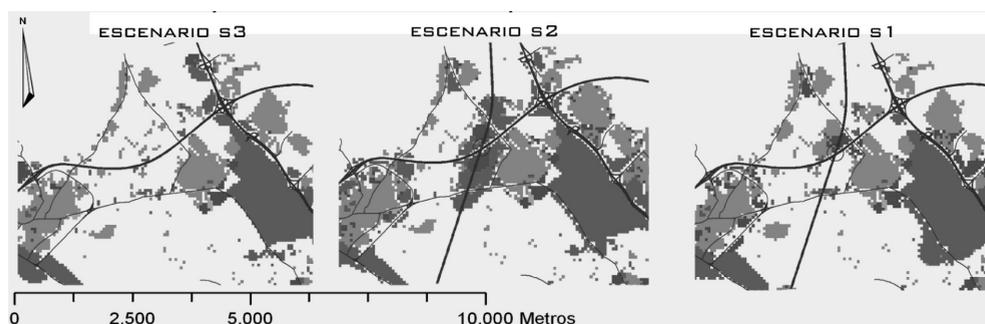
Elaboración propia.

## IV.2. SECTOR INDUSTRIAL-RESIDENCIAL ALBOLOTE-ATARFE

El sector industrial-residencial del entorno de los núcleos de Albolote y Atarfe (Figura 12) se corresponde con un interesante ejemplo, con motivo de la inclusión de una nueva infraestructura viaria en dos de los escenarios (S1 y S2). Su ausencia en el escenario S3, supone una escasa transformación de esta zona, a pesar de que en algunos de los nodos existentes aparecen crecimientos industriales y especialmente de uso comercial. Sin embargo, en el caso de los otros dos escenarios, la inclusión de esta vía supone un importante cambio de las áreas adyacentes, aunque en diferentes direcciones:

En el escenario S2, se puede observar una importante transformación en el entorno de la vía a través del desarrollo de grandes áreas comerciales e industriales de acuerdo a patrones de ocupación nodales y lineales respectivamente. En el caso del escenario S1, los principales crecimientos que tienen lugar son los de origen residencial de alta y de baja densidad, que en este caso se sitúan principalmente de forma agregada a los núcleos existentes e igualmente en las proximidades de los nuevos nodos.

Figura 12  
COMPARACIÓN VISUAL DE LOS ESCENARIOS EN SECTOR INDUSTRIAL-RESIDENCIAL DE ALBOLOTE-ATARFE



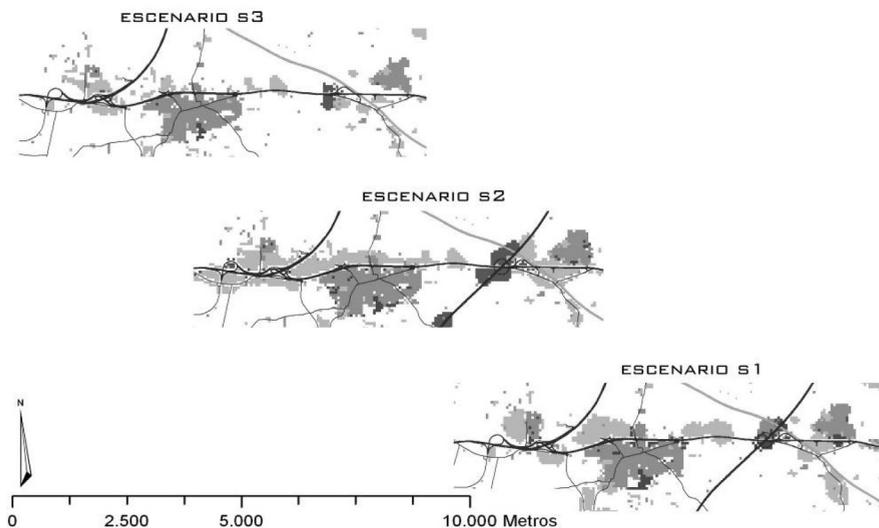
Elaboración propia.

## IV.3. SECTOR SANTA FÉ-NODO 2ª CIRCUNVALACIÓN

El área correspondiente con las proximidades del núcleo urbano de Santa Fe y el nodo de la infraestructura proyectada «segunda circunvalación» (Figura 13) constituye otro ejemplo de las diferencias existentes entre los escenarios. La inclusión de esta ronda en el caso del escenario S2 supone un importante desarrollo de zonas comerciales en dicho nudo. Con respecto a las zonas industriales que se desarrollan en las proximidades de la otra vía existente (A-92G) también en este escenario se corresponden con un patrón claramente lineal a ambos lados del eje metropolitano.

Por su parte, en el escenario S1 los crecimientos que tienen lugar son principalmente de áreas residenciales en las proximidades del nodo, así como crecimientos industriales que lo hacen por agregación de aquellos fragmentos de menor tamaño existente.

Figura 13  
COMPARACIÓN VISUAL DE LOS ESCENARIOS EN EL SECTOR DEL NÚCLEO URBANO DE SANTA FÉ Y EL NODO EN  
PROYECTO DE LA SEGUNDA RONDA DE CIRCUNVALACIÓN

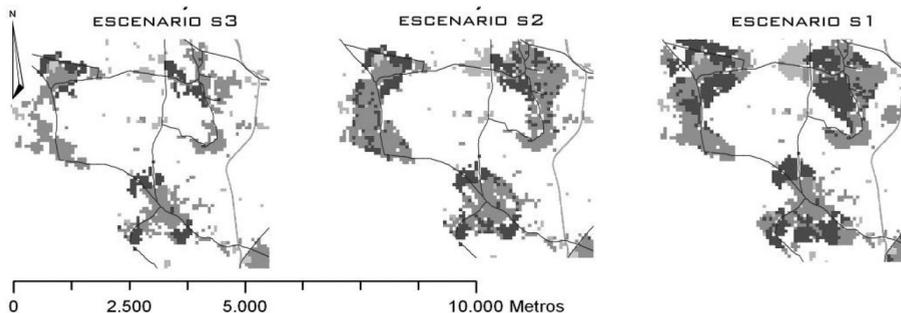


Elaboración propia.

#### IV.4.SECTOR RESIDENCIAL VEGAS DEL GENIL

El último de los sectores se corresponde con la zona mayoritariamente residencial del entorno de Vegas del Genil (Figura 14) En el caso del escenario S2 se produce en esta zona un importante crecimiento residencial, que tiende a seguir en cierta forma alguno de los ejes existentes, mientras que en el escenario S1 el crecimiento es mucho más masivo, configurándose esta zona como una de las de mayor crecimiento de toda la AUG.

Figura 14  
COMPARACIÓN VISUAL DE LOS ESCENARIOS EN EL ENTORNO DEL MUNICIPIO DE VEGAS DEL GENIL



## V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A través del establecimiento de escenarios futuros de desarrollo territorial basados en diferentes formas o patrones e intensidades de crecimiento (Luca, 2007) y el diseño e implementación de un modelo de simulación basado en Autómatas Celulares (Aguilera, 2006; Valenzuela *et al.*, 2008) se pueden explorar diferentes posibilidades de evolución de un espacio metropolitano en ciernes, como es la Aglomeración Urbana de Granada. En este sentido se han planteado los tres escenarios de evolución mostrados para la AUG, que han sido simulados con un modelo basado en AC que constituye una evolución de diversos trabajos previos (Aguilera, *et al.*, 2006; Aguilera, 2008; Valenzuela *et al.*, 2008).

En lo que respecta a los resultados de la simulación de los escenarios, estos han mostrado comportamientos diferenciados, como se ha observado en el epígrafe IV, posibilitando disponer de imágenes que plasmen posibles tendencias futuras de crecimiento de este espacio metropolitano. Así, el escenario S1 muestra fuertes crecimientos residenciales, que en múltiples casos dan lugar a procesos de conurbación y de mayor segregación de dichos usos, con posibles consecuencias negativas para la estructura metropolitana. Por su parte, el escenario S2 muestra fuertes crecimientos de carácter lineal en los usos industriales, que pueden conducir a procesos de aislamiento y fragmentación del paisaje agrícola, mientras que el S3 puede llegar a producir una saturación de los nodos de la red de carreteras, al localizar allí buena parte de los crecimientos de carácter industrial.

En cualquier caso, la disponibilidad de estas imágenes alternativas de evolución metropolitana permitirá en trabajos futuros aplicar metodologías de estimación de los impactos y afecciones a los paisajes periurbanos en los que tienen lugar los crecimientos (Tarragona, 2003; Fernández, 2004; Aguilera, 2008). Algunos ejemplos de estas metodologías pueden ser la estimación de la conectividad ecológica (Marull y Mallarach, 2005) o las métricas derivadas de la ecología del paisaje (McGarigal y Marks, 1995; Herzog y Lausch, 2001; Franco *et al.*, 2005; Botequilha-Leitao *et al.*, 2006). Estos instrumentos podrán permitir la determinación de los lugares más sensibles a determinadas formas o intensidades de crecimiento, de tal forma que junto a las diferentes simulaciones y escenarios, permitan inferir criterios para la planificación de espacios metropolitanos (Luca, 2007; Aguilera 2008). Y es que a partir de la simulación de posibles tendencias y posterior evaluación de sus consecuencias, es posible diseñar estrategias de planificación más adecuadas para evitar que se consoliden aquellas tendencias más negativas desde una perspectiva territorial y potenciar aquellas más positivas.

En lo que respecta a la valoración del propio modelo implementado, cabe destacar que ha mostrado su capacidad de representar diferentes formas, patrones e intensidades de crecimiento metropolitano, basándose en la relación entre los diferentes patrones de crecimiento urbano detectados para el ámbito de estudio, y los valores de vecindad. Este hecho se ha conseguido empleando una estructura sencilla, que únicamente emplea 4 parámetros para la simulación del crecimiento urbano, y que se ha popularizado en múltiples trabajos (Santé *et al.*, 2010). En cualquier caso, cabe plantearse la adecuación de los parámetros y/o de la presente estructura, a la simulación del crecimiento urbano en un área metropolitana española. A este respecto, se puede señalar que dicha estructura ha sido empleada en diversos ámbitos europeos con éxito, como puede ser Dublín (Barredo *et al.*, 2003) Holanda

(White y Engelen, 2000) o el Algarve (Petrov et al., 2009). No obstante, la exploración de la aplicación de este instrumento a otras áreas metropolitanas españolas y su capacidad para simular dinámicas pasadas en ellas, puede arrojar algunas luces en relación con este punto.

Igualmente, un aspecto especialmente controvertido puede ser la relación entre los valores de vecindad y los diferentes patrones de ocupación. Esta relación se ha establecido tomando como base el conocimiento adquirido en el proceso de simulación de las dinámicas pasadas, que permitió simular de una forma razonablemente adecuada los procesos de crecimiento urbano para el período 1984-1999 en la AUG. El conocimiento adquirido de aquellos valores de vecindad que permiten simular determinadas formas o patrones de crecimiento urbano para ese período, se ha empleado para simular los diferentes comportamientos futuros planteados en los escenarios. No obstante, el establecimiento de esta relación vecindad-patrones de ocupación, se ha realizado gracias al conocimiento y experiencia en la sensibilidad del modelo a la alteración de los valores que presentan los autores, y en este sentido pudiera resultar un proceso un tanto subjetivo en el que en el futuro merece la pena detenerse y tomar en consideración algunos aspectos. A este respecto, se abre claramente una línea de investigación en la que se explore la sensibilidad y robustez del modelo ante cambios en los diferentes valores de calibración o vecindad. Un análisis de este tipo permitirá establecer de una manera sistemática en qué medida el modelo responde ante cambios en los valores de calibración representando diferentes formas o patrones de ocupación, disminuyendo así la subjetividad de la relación entre patrones y valores de vecindad establecida hasta el momento.

Finalmente, otra cuestión de interés en relación con este aspecto, puede ser la ya comentada aplicación de este modelo a otros espacios metropolitanos. Y es que de esta forma, se podría explorar también en qué medida la relación establecida entre valores de vecindad y patrones de ocupación es una relación general, aplicable en otros entornos metropolitanos, o por el contrario sólo tiene lugar en la AUG. Este hecho, unido al anteriormente señalado análisis de sensibilidad y robustez del modelo, supondría una importante disminución de la subjetividad presente en el proceso de calibración. Áreas metropolitanas de mayor tamaño y consolidación como puede ser expresamente el Área Metropolitana de Madrid (López de Lucio, 2003; Roch, 2004; Barredo y Gómez, 2008), pueden ser un lugar adecuado para la abordar estudios y análisis futuros que refuercen aquellos aspectos más subjetivos de la presente aplicación.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto SIMURBAN del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria de 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (Referencia SEJ2007-66608-C04-00/GEOG).

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUILERA, F. (2006): «Predicción del crecimiento urbano mediante SIG y modelos basados en AC». *Geofocus*, vol. 6.
- AGUILERA, F.; SORIA, J.A. y VALENZUELA, L.M. (2006): «Explorando el crecimiento urbano en la Aglomeración Urbana de Granada». XII: Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, pp 3-16. ISBN 84-935057-0-6.
- AGUILERA, F. (2008): *Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- BARREDO J. I. KASANKO, M., MCCORMICK, N., LAVALLE, C. (2003): «Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata». *Landscape and Urban Planning*, vol. 64, pp. 145-160.
- BARREDO J. I.; DEMICHELI, L., LAVALLE, C.; KASANKO, M.; MCCORMICK, N. (2004): «Modelling future urban scenarios in developing countries.: an application case study in Lagos, Nigeria». *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 32, pp. 65-84.
- BARREDO, J.I. y GÓMEZ, M. (2008): «Towards a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region». En Paegelow, M. y Camacho, M.T (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*. Springer. Berlín.
- BATTY, M. (1997): «Urban Systems as Cellular Automata». Editorial. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, pp. 159-164.
- BATTY, M. y XIE, Y. (1997): «Possible Urban Automata»: En Besussi, E y Cecchini, A (Ed) *Artificial Worlds and Urban Studies*. Venezia, DAEST, pp. 153-164.
- BENENSON, I. y TORRENS, P (2004): *GEOSIMULATION: Automata-based modelling of urban phenomena*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- BERLING-WOLF, S. y WU, J. (2004a): «Modelling urban landscape dynamics: A case study in Phoenix, USA». *Urban Ecosystems*, vol. 7, pp. 215-240.
- BERLING-WOLF, S. y WU, J. (2004b): «Modelling urban landscape dynamics: A review». *Ecological Research*, vol. 19, pp. 119-129.
- BRIASSOULIS, H. (2000): Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> [Mayo, 2007]
- BOTEQUILHA, A.; MILLER, J.; AHERN, J. y MCGARIGAL, K. (2006): *Measuring Landscapes. A planner's handbook*. Washington, Island Press.
- BORJERSON, L. HOJER, M. DREBORG, K.H. EKVALL, T., y FINNVENDEN, G. (2006): Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, vol. 38, pp. 723-739.
- CAMAGNI, R.; GIBELLI, M.C. y RIGAMONTI, R. (2002): «Urban Mobility and Urban Form: the Social and Environmental Costs of Different Patterns of Urban Expansion» (editorial). *Ecological Economics*, Vol. 40, pp. 199-216.
- CARUSO, G. (2005): *Integrating Urban Economics and Cellular Automata to model Peri-urbanisation: Spatial dynamics of residential choice in the presence of neighbourhood externalities*. Tesis Doctoral. Université catholique de Louvain.
- CHENG, J.; MASSER, I. (2003): «Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China». *Landscape and Urban Planning*, vol. 62, 199-217.
- CHUVIECO, E. (2002): *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Edit. Ariel. Barcelona.

- CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES (1999): *Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada*. Junta de Andalucía.
- CONWAY, J. (1970): «The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game «Life»», *Scientific American*, vol. 223, pp. 120-123.
- DE MIGUEL GONZÁLEZ, R. (2008): Planificación territorial, Gobierno y gobernanza metropolitana en las grandes ciudades españolas. *Boletín de la AGE*, nº 48; pp. 355-374.
- DRAMSTAD, W.E.; OLSON, J.D. y FORMAN, R.T.T. (1997): *Landscape Ecology Principles In Landscape Architecture: And Land-Use Planning*. Island Press.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2006a): *Urban Sprawl in Europe*. EEA Report N°10/2006.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2006b): *Land Accounts for Europe. Towards integrated land and ecosystem accounting*. EEA Report N°11/2006.
- FERIA, J. M. (2004): «Problemas de definición de las áreas metropolitanas en España». *Boletín de la A.G.E.*; No 38, pp. 85-99.
- FERNÁNDEZ, D. (2004): «Bases para la evaluación ambiental y territorial del Área Metropolitana de Granada». Congreso Nacional de Medio Ambiente. Colegio Nacional de Físicos. Madrid.
- FONT, A. (2004): *L'explosió De La Ciutat*. COAC i Fòrum Universal de les Cultures de Barcelona. Barcelona.
- FORMAN, R. T. T. (1995): *Land Mosaics: The Ecology Of Landscapes And Regions*. Cambridge. EE.UU.
- FRANCO, D.; BOMBONATO, A.; MANNINO, I.; GHETTI, P.F. and ZANETTO; G. (2005): «The evaluation of a planning tool through the landscape ecology concepts and methods». *Management of Environmental Quality: An International Journal*. Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 55-70.
- GALSTER, G.; HANSON, R.; RATCLIFFE, M.R.; WOLMAN, H.; COLEMAN, S. y FREIHAGE, J. (2001): «Wrestling Sprawl to the ground. Defining an Measuring an Elusive Concept. *Housing Policy Debate*, vol. 12 Issue 4, pp. 681-717.
- GUTIÉRREZ, J. y GOULD, M. (1994): *SIG: Sistemas De Información Geográfica*. Síntesis, Madrid.
- HERZOG, F. y LAUSCH, A. (2001): «Supplementing land use statistics with landscape metrics: some methodological considerations». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 72, pp. 37-50.
- INDOVINA, F. (2005): *L'esplosione della città*. Ed. Compositori, Bolonia.
- KASANKO, M.; BARREDO, J.I.; LAVALLE, C.; MCCORMICK, I.; DEMICHELI, L.; SAGRIS, V. y BREZGER, A. (2006): «Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas». *Landscape and Urban Planning*, vol. 77, pp. 111-130.
- LI, X.; YANG, Q. y LIU, X. (2008): «Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata». *Landscape and Urban Planning*, vol. 86, pp. 177-186.
- LÓPEZ DE LUCIO, R. (2003): «Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid». *Revista URBAN*, N° 8.

- LUCA, C. (2007): «Generative platform for urban and regional design». *Automation in Construction*, vol. 16, pp. 70-77.
- MARULL, J. y MALLARACH, J.M (2005) : «A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan» Area. *Landscape and Urban Planning*, vol. 71, pp. 243-262.
- MCGARIGAL, K., y MARKS, B. J. (1995): *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for Quantifying Landscape Structure*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351.
- MENOR, J. (2000): *La Vega de Granada: transformaciones agrarias recientes en un espacio periurbano*. Ed Universidad de Granada, Granada.
- MONCLÚS, F. J. (1998): *La Ciudad Dispersa*. Centre cultural contemporánea de Barcelona. Barcelona.
- O'SULLIVAN, D. y TORRENS, P. (2000): «Cellular Models of Urban Systems». *CASA Working Paper Series*, N° 22.
- OSE, (2006): *Informe de la Sostenibilidad en España 2006*.
- PAEGELOW, M. y CAMACHO, M.T. (Eds.) (2008): *Modelling Environmental Dynamics*. Springer-Verlag, Berlín.
- PLATA ROCHA, W., GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2010): «Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid», *GeoFocus* (Artículos), n° 10, pp. 103-134.
- PETROV, L., LAVALLE, C., y KASANKO, M. (2009): Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. *Landscape and Urban Planning*, vol. 92, pp. 10-23.
- PRATO, T. (2007): «Evaluating land use plans under uncertainty». *Land Use Policy*, vol. 24, pp. 165-174.
- RAVETZ, J. (2000): *City Region 2020: Integrated Planning For Sustainable Environment*. Earthscan Publications Ltd, Londres.
- RUEDA, S. (1997): *La ciudad compacta y diversa frente a la conurbación difusa. La construcción de la ciudad sostenible*. <http://habitat.aq.upm.es/cs/lista.html> [Julio 2008]
- RUEDA, S. (1998): «Periurbanización y complejidad en los sistemas urbanos». En Monclús, J. (Ed.) *La Ciudad Dispersa. Suburbanización Y Periferias*. Centre de cultura contemporánea de Barcelona, Barcelona.
- ROCA, J. (2003): «La delimitación de la ciudad: ¿Una cuestión imposible?». *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales* N° 135, pp. 17-36.
- ROCH, F. (2004): «Naturaleza de la Conurbación Madrileña y sus tendencias actuales. Primera Parte. Agentes sociales y tendencias urbanísticas: hegemonía inmobiliaria y pérdida de urbanidad». En Borja, J. y Muxí, Z. (eds.) (2004): *Urbanismo en el Siglo XXI*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- SANTÉ, I.; GARCÍA, A.M.; MIRANDA, D. y CRESCENTE, R. (2010): Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban. Planning*, vol. 96, pp. 108-122.
- SANTOS, J.M. (1994): «La simulación informática y los modelos de difusión», *Estudios Geográficos*, Vol. 55: 217, pp. 711-741.
- SONG, Y. y KNAAP, G.J. (2004): «Measuring Urban Form. Is Portland winning the War on Sprawl?» *Journal of the American Planning Association*, Vol. 70, No. 2.

- TARRAGONA, F. (2003): *El efecto de la antropización en los sistemas naturales del área metropolitana de Granada: el gradiente rural-urbano*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- TOBLER, W. R. (1970): «A computer movie simulating urban growth in the Detroit region». *Economic Geography*, vol. 46(2), pp. 234-240.
- TRESS, G.; TRESS, B.; HARMS, B.; SMEETS, P. y VAN DER VALK, A. (Eds.) (2004): *Planning Metropolitan Landscapes: Concepts, Demands, Approaches*. Delta Series, 4. Wageningen.
- VALENZUELA, L.M.; AGUILERA, F.; SORIA, J.A. y MOLERO, E. (2008): «Designing and assessing of development scenarios for metropolitan patterns». En Paegelow, M. y Camacho, M.T. (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*. Springer. Berlín.
- VERBURG, P.H., SCHOT, P., DIJST, M., y VELDKAMP, A. (2004): «Land use change modelling: current practice and research priorities». *Geojournal* 61(4), pp. 309-324.
- WHITE, R. y ENGELEN, G. (1993): «Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns», *Environment and Planning A*, vol. 25(8), pp. 1175-1199.
- WHITE, R.; ENGELEN, G. y ULJEE (1997): «The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics». *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol 24, pp. 323-343.
- WHITE, R. y ENGELEN, G.; (2000): «High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems». *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp. 383-400.