

PROPUESTA DE UN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA VALIDAR MODELOS PROSPECTIVOS DE SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES

PABLO BARREIRA GONZÁLEZ¹, FRANCISCO AGUILERA BENAVENTE², MONTSERRAT GÓMEZ DELGADO

Departamento de Geografía

C/ Colegios, 2, Alcalá de Henares 28801 (Madrid, España)

¹pablobarreiragonzalez@hotmail.com

²f.aguilera@uah.es

³montserrat.gomez@uah.es

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta que podría formar parte de un proceso de validación para modelos prospectivos (no necesariamente predictivos) de simulación del crecimiento urbano basado en autómatas celulares (AC). Concretamente, se plantea la aplicación de un análisis de sensibilidad que pretende explorar el grado de influencia de cada uno de los parámetros de los modelos tradicionalmente empleados en la simulación del crecimiento urbano, valorando si la ausencia de uno o varios de ellos supone una alteración significativa de los resultados. Para ello se ha empleado un modelo desarrollado para simular un crecimiento urbano futuro deseable en la Comunidad de Madrid y que, por tanto, no se limita a reproducir en el futuro lo acontecido en el pasado, aplicación que tradicionalmente se ha llevado a cabo con los modelos basados en AC. La propuesta se basa en la generación de diferentes versiones del modelo derivadas de la eliminación de diversos parámetros de los que conforman la versión original. Los resultados muestran la gran influencia de factores como la aptitud y la vecindad. La evaluación de los resultados del análisis de sensibilidad, por otro lado, nos ofrece información interesante sobre aquellas localizaciones que podríamos considerar soluciones robustas del modelo y que, por tanto, minimizarían el riesgo asumido al tomar la decisión de urbanizarlas.

Palabras clave: Análisis de sensibilidad, autómatas celulares, simulación del crecimiento urbano, modelos prospectivos.

SENSITIVITY ANALYSIS FOR CELLULAR-AUTOMATA BASED MODELS. A METHODOLOGICAL APPROACH ON PROSPECTIVE SCENARIO ASSESSMENT

ABSTRACT

This paper presents a Sensitivity Analysis (SA) as part of a validation procedure to be applied to prospective models for urban simulation growth based on Cellular Automata (CA). This SA explores the influence of each factor integrating the CA model on the results to simulate the future urban growth in Madrid region. The proposal is based on the generation of different versions of the original model, erasing one factor at a time. The results show a relevant influence of the suitability and neighbourhood factors. The evaluation of the results of the SA also offers interesting information about those locations that could be considered robust solutions of the model (in order to be urbanized), minimizing the decision risk.

Keywords: Sensitivity analysis, cellular automata, urban growth simulation, prospective models.

1. Introducción

Los procesos de cambio en los usos del suelo, y especialmente la expansión de las zonas urbanas, son una de las alteraciones más importantes que actualmente tienen lugar, tanto en Europa (EEA, 2006; Kasanko *et al.*, 2006) y Estados Unidos (Buyantuyev y Wu, 2009), como en otros países menos desarrollados del resto del mundo (Barredo *et al.*, 2004). Las implicaciones ambientales y territoriales de estas alteraciones son innegables (Berling-Wolf y Wu, 2004, Mitsova *et al.*, 2011), por ello en los últimos años se ha producido un incremento del esfuerzo científico para conocer, caracterizar, medir y simular las dinámicas de cambio en los usos del suelo y especialmente los crecimientos de las áreas urbanas y metropolitanas.

En este contexto, la utilidad de los instrumentos de simulación urbana resulta evidente: además de ayudar a comprender mejor los procesos de crecimiento urbano, sus factores motrices, etc. (Cheng y Messer, 2000; Verburg *et al.*, 2004), los modelos de simulación urbana permiten reproducir dinámicas y procesos territoriales pasados (Paegelow y Camacho, 2008), así como simular posibles evoluciones de dichas dinámicas y procesos en el futuro (Hansen, 2010; Santé *et al.*, 2010). Además nos permiten valorar cambios en los patrones de crecimiento de las ciudades y áreas metropolitanas (Berling-Wolf y Wu, 2004; Li y *et al.*, 2008; Aguilera Benavente *et al.*, 2011), y posibles afecciones de estos crecimientos sobre el paisaje y el territorio en el que tienen lugar (Forman, 1995; Aguilera Benavente y Talavera García, 2009; Mitsova *et al.*, 2011). La importancia de este proceso, así como la mayor magnitud de los cambios y su aceleración a lo largo del tiempo, han provocado una auténtica "nueva ola de simulación urbana" (Benenson y Torrens, 2004) que se ha traducido en el desarrollo de multitud de herramientas de simulación de este fenómeno (White *et al.*, 1997; Lopez *et al.*, 2001; Gómez Delgado y Barredo, 2005; Paegelow y Camacho, 2008; Aguilera Benavente *et al.*, 2010; Plata Rocha *et al.*, 2011).

Entre los múltiples instrumentos de simulación disponibles, las técnicas de evaluación multicriterio (Malcewski, 1999; Gómez Delgado y Barredo, 2005; Plata Rocha *et al.*, 2011), los modelos basados en agentes (Gilbert y Troitzsch, 2005) y los modelos basados en autómatas celulares (AC) (Itami, 1994; Batty y Xie, 1997; White *et al.*, 1997; Barredo *et al.* 2003; Aguilera Benavente *et al.*, 2010; Santé *et al.*, 2010) destacan como los instrumentos más ampliamente utilizados. Sin embargo, las principales características de los procesos de expansión urbana como

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

son la complejidad, autosimilitud, etc. (Frankhauser, 1998; O'Sullivan y Torrens, 2000) y la capacidad de AC para reproducir comportamientos de este tipo (Torrens, 2000), han provocado que exista una importante proliferación de herramientas y estudios de simulación basada en este tipo de modelos (O'Sullivan y Torrens, 2000; Aguilera Benavente *et al.*, 2010; Santé *et al.*, 2010). Los ámbitos de aplicación han sido además diversos, empleándose para la simulación de crecimientos en ámbitos urbanos en España (Aguilera Benavente *et al.*, 2010; García *et al.*, 2011), Europa (White *et al.*, 1997; Barredo *et al.*, 2003, Petrov *et al.*, 2009), Estados Unidos (Berling-Wolf y Wu, 2004; Mítsova *et al.*, 2011), África (Barredo *et al.*, 2004) o Asia (Liu y Anderson, 2004; Li *et al.*, 2008).

Estos modelos generalmente presentan una estructura paramétrica en la que un parámetro, denominado de vecindad, representa el comportamiento de los AC, que se ve acompañado de otros parámetros como la aptitud o la accesibilidad. La estructura más extendida es la popularizada por el modelo MOLAND, basada en la propuesta metodológica de White *et al.* (1997), que emplea concretamente 4 factores: vecindad (parámetro de AC) aptitud, accesibilidad y aleatoriedad.

Para su correcto funcionamiento precisan de un proceso de calibración previo que permite valorar su capacidad operacional para reproducir situaciones presentes a partir de datos pasados. En estos casos es posible comparar los resultados de las simulaciones de los modelos con datos reales de ocupación urbana, pudiendo llevarse a cabo un proceso de validación completo.

No obstante, cuando se emplean para simular escenarios de crecimiento urbano futuro que representan situaciones posibles, óptimas o deseables, es necesario ampliar y flexibilizar el concepto de validación, que ha de ser forzosamente parcial, pues no existen datos reales con los que comparar los resultados obtenidos en las simulaciones (Pagelow y Camacho, 2008). Más aún, cuando se pretende simular varios tipos de escenarios normativos o exploratorios, que en ningún caso pretenden reproducir lo acontecido en el pasado, sino proponer diferentes alternativas a futuro que, por ejemplo, sigan unos determinados principios de sostenibilidad. Esta validación parcial puede realizarse a partir de la evaluación de la estabilidad de los resultados, a través de lo que se conoce como Análisis de Sensibilidad (AS). Así, el AS nos permitiría estudiar: (1) cómo los resultados obtenidos dependen de la información de la que se nutre dicho modelo (Saltelli *et al.*, 2000), así como del efecto de la resolución espacial, y (2) cómo la variación de los resultados del modelo puede ser atribuida (cualitativa o cuantitativamente) a la modelación de los diferentes parámetros y factores que lo conforman.

En relación con el primer aspecto, Yeh y Li (2006) realizan un análisis de la incertidumbre generada por los datos de partida. Para ello, introducen errores en ellos de forma controlada y deliberada para comprobar su influencia en los resultados. Dietzel y Clarke (2006) evalúan el efecto de la agregación/desagregación de algunas de las categorías de ocupación urbana simuladas como fuente de variación de los resultados. Liu y Andersson (2004) tratan de ver cómo los resultados de un modelo pueden variar teniendo en cuenta que no todos los cambios de usos del suelo se producen con igual rapidez en el tiempo, de manera que resulta necesario considerar la dimensión temporal de los mismos. Dietzel y Clarke (2004), Jantz y Goetz (2005) y Samat (2006), por su parte, abordan el estudio de la influencia de la resolución espacial en los resultados simulados.

En lo que respecta a la influencia de los diferentes parámetros del modelo en los resultados del mismo, las principales aportaciones han consistido en valorar individualmente la influencia del modo en que se modela alguno de los parámetros. Así, Ménard y Marceau (2005), Kocabas y Dragicevic (2006) valoran la influencia del parámetro de vecindad propio de estos modelos, tanto en lo que respecta a su forma como a su tamaño. García *et al.* (2011), por su parte, propone la diferente parametrización de la aleatoriedad como fuente de variación de los resultados generados por el modelo.

No obstante, y en el contexto del segundo ámbito de aplicación del AS a estos instrumentos, consideramos relevante explorar el grado de influencia de cada uno de los parámetros del modelo, valorando si la ausencia de uno o varios de ellos supone una alteración significativa de los resultados. Así, el objetivo de este trabajo es presentar una metodología para la realización de AS en modelos de simulación de crecimiento urbano basados en AC, para valorar la influencia de los diferentes parámetros que lo componen en los resultados simulados. Dicha metodología se basa en la generación de diferentes versiones del modelo derivadas de la eliminación de diversos parámetros de los que conforman la versión original. Los modelos así generados se emplearán para simular un escenario de crecimiento urbano futuro, permitiendo comparar los resultados obtenidos, que se podrán relacionar con el grado de influencia de cada factor en los resultados. Para ello se dispone de un modelo basado en AC desarrollado para la simulación de escenarios prospectivos de crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid, entendida como una de las más dinámicas de la Península Ibérica.

En el epígrafe 2 se presentará la zona de estudio y los datos de partida empleados, es decir, el modelo basado en AC sobre el que se realizará el AS. En el tercer epígrafe se desarrolla la metodología propuesta y el cuarto está dedicado a la presentación de los resultados y su discusión. Finalmente, en el epígrafe 5 se incluirán las conclusiones más relevantes del trabajo.

2. Área de estudio y descripción del modelo de partida

2.1 El área de estudio: la Comunidad de Madrid

La Comunidad de Madrid, situada en la región central de la Península Ibérica ([figura 1](#)) y en la que se ubica el Área Metropolitana de Madrid, se ha caracterizado en las últimas décadas por un elevado dinamismo urbano (Castro Martín y Puga González, 1998; Pozo Rivera, 2005; Catalá Mateo *et al.*, 2008), constituyendo hoy en día un territorio altamente antropizado. Este proceso además se ha visto acentuado en las últimas décadas con motivo del vigoroso ciclo expansivo de la economía española, que ha llevado aparejado un importante crecimiento de las superficies urbanizadas en el ámbito metropolitano.

Así, para toda la Comunidad, las superficies residenciales han experimentado un incremento de su superficie entre el año 1990 y el 2000 del 43% (unas 15.000 ha, aproximadamente) de acuerdo con los datos CORINE LANDCOVER (OSE, 2006; Plata Rocha *et al.*, 2009) y de casi un 20% (aproximadamente 10.000 ha) entre el año 2000 y el 2006 (OSE, 2011).

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

A grandes rasgos podemos decir que este importante crecimiento ha tenido lugar de forma dispersa, principalmente en las periferias de los núcleos urbanos preexistentes, y ha llevado aparejado el desarrollo de importantes superficies industriales y comerciales, ubicadas generalmente próximas a las vías de transporte, atraídas por la mayor accesibilidad (Gutiérrez Puebla, 2004). La aparición de nuevas formas o patrones de ocupación urbana en estos ámbitos convierten a esta región en una interesante área de estudio para explorar las dinámicas futuras de crecimiento urbano y, por tanto, ha sido seleccionada para la simulación prospectiva del crecimiento urbano en el contexto del proyecto de Investigación SIMURBAN (<http://www.geogra.uah.es/simurban/>).

2.2. Modelo de crecimiento urbano basado en AC

El modelo sobre el que se aplicará la propuesta metodológica de AS consiste en una modificación del modelo basado en AC diseñado para simular diferentes escenarios de crecimiento urbano en la Aglomeración Urbana de Granada (Aguilera Benavente *et al.*, 2010), adaptado a las características específicas de la Comunidad de Madrid. Ha sido implementado en el *software* IDRISI Andes (Clark Labs) de acuerdo con la propuesta teórica de White *et al.* (1997), la cual ha servido como base para la implementación de otros modelos de simulación (Barredo *et al.*, 2003; Petrov *et al.*, 2009). Las simulaciones de crecimiento urbano obtenidas con este instrumento constituirán los datos de partida para la realización del análisis de sensibilidad descrito en el epígrafe 3.

El modelo, que opera con un tamaño de píxel de 200 m de resolución, permite simular la localización de nuevos emplazamientos urbanos para tres usos concretos: usos productivos (áreas industriales y comerciales) y usos residenciales de alta y de baja densidad. Para cada lugar del ámbito de estudio el modelo estima un potencial de transición hacia cada uno de los tres usos simulados (P_j). Este potencial se obtiene como resultado de la combinación de cuatro parámetros: vecindad, accesibilidad, aptitud y estocástico.

Una explicación detallada del funcionamiento de estos parámetros puede encontrarse en Aguilera Benavente *et al.* (2010), aunque en este caso calculados para el ámbito de estudio en la Comunidad de Madrid. En cualquier caso, y de forma breve, se presentará una descripción de los mismos.

La **Vecindad** (N) es un parámetro que estima la tendencia a la transformación hacia un tipo de uso urbano para cada píxel en función de dos factores: el tipo de usos urbanos vecinos existentes y la distancia de éstos a la celda evaluada. Por tanto, en primer lugar es necesario definir el tamaño de dicha vecindad. A partir de la revisión realizada por Santé *et al.* (2010), se ha definido una ventana de 11x11 píxeles (2.200 m x 2.200 m). De modo operativo, en el modelo la vecindad actúa como si de una ventana de filtrado se tratase, desplazándose sobre cada uno de los píxeles del área de estudio y calculando un valor de vecindad para cada uno de ellos.

La **Accesibilidad** (A) ha sido modelada previo estudio de los factores explicativos del crecimiento urbano entre los años 1990 y 2000 en la Comunidad de Madrid (Plata Rocha *et al.*, 2008). En su cálculo, realizado mediante regresión logística espacial, se han empleado como

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

factores las distancias a diversos elementos como comercios, universidades, zonas urbanas, centro de negocios e infraestructuras de transporte.

La **Aptitud** (S), al igual que la accesibilidad, se representa como combinación mediante regresión logística espacial de un conjunto de factores relacionados con el proceso de crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid en períodos anteriores (Plata Rocha *et al.*, 2009). Estos factores incluyen clasificación del suelo, distancia a red hidrográfica, altitudes, pendientes y usos del suelo existentes.

El **parámetro estocástico** (V) es un parámetro que trata de replicar el grado de "aleatoriedad" de los procesos de crecimiento urbano como parte de los sistemas sociales complejos (Batty y Xie, 1997). De manera formal se puede definir como:

$$V = 1 + (\ln(rand))^{\alpha}$$

donde *rand* es un número aleatorio comprendido entre 0 y 1 y α es un parámetro que permite ajustar la dispersión que se introducirá. Al igual que en Aguilera Benavente *et al.* (2010), este parámetro debe ser ajustado para generar simulaciones realistas, y que tras diferentes simulaciones se ha ajustado a un valor de 0,5.

De acuerdo con White *et al.* (1997), Barredo *et al.* (2003), Aguilera Benavente *et al.* (2010), entre otros, el cálculo del potencial de transición (P_j) hacia cada uno de los tres usos urbanos puede expresarse a través de la combinación de los parámetros anteriormente descritos, cuyos valores van de 0 a 1. Así, aquellos valores cercanos a la unidad mostrarán la mayor potencialidad de cambio. Este potencial puede expresarse de esta forma:

$$P_j = S_j \times A_j \times V_j \times N$$

El modelo opera de forma iterativa, de tal modo que cada iteración del mismo representa el crecimiento de las zonas urbanas durante un período de un año. Así, en cada iteración los píxeles con valores más altos de potencial de transición para cada uno de los tres usos se convierten en nuevas zonas urbanas del uso en cuestión, que se incorporan a las ya existentes para dar lugar a una nueva iteración del modelo.

No obstante, y como limitación del modelo, el número de píxeles que se transformarán a los diferentes usos en cada una de las iteraciones debe ser establecido de forma externa. Para ello se ha recurrido al diseño de escenarios futuros de crecimiento urbano en los que la cantidad de crecimiento quedará previamente establecida.

El modelo descrito se ha empleado en la Comunidad de Madrid para generar simulaciones de diferentes escenarios futuros de crecimiento urbano para el año 2020, empleando para ello como año base el 2000. Los tres escenarios diseñados establecen, entre otros factores, la cantidad de crecimiento que podría experimentarse en posibles contextos futuros en la Comunidad de Madrid. El análisis de sensibilidad de los resultados simulados por el modelo se ha realizado en el contexto de las simulaciones generadas para uno de los tres escenarios generados en el proyecto SIMURBAN: escenario de "innovación y sostenibilidad". Se trata de un escenario que en ningún

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

caso trata de reproducir a futuro lo que ha sucedido en el pasado, contexto en el que tradicionalmente se han empleado los modelos basados en autómatas celulares. Se trata de una aplicación novedosa en la que se intenta utilizar este tipo de modelos para simular escenarios exploratorios y normativos con los que indagar posibles evoluciones futuras de este fenómeno, conducentes, en este caso concreto, a un estado deseable de crecimiento urbano. En términos numéricos, este escenario supone una reducción del crecimiento experimentado en el período 1990-2000, que implica un total de 508 ha/año de crecimiento de suelos productivos, equivalente a 127 píxeles/año; y un total de 916 ha/año de suelos residenciales (229 píxeles/año), a distribuir entre el uso residencial de alta y de baja densidad (para una descripción detallada de los tres escenarios planteados, las características de los modelos empleados para su simulación y sus resultados es posible consultar Aguilera Benavente *et al.*, 2009 y Aguilera Benavente *et al.*, 2012).

A partir de estas cantidades de crecimiento, el modelo localiza, de acuerdo con el procedimiento anteriormente descrito, los diferentes crecimientos de cada tipo ([figura 2](#)) generando como resultado una simulación espacial del crecimiento para el año 2020, punto de partida para la realización del análisis de sensibilidad.

3. Metodología: análisis de sensibilidad y evaluación de los resultados

Existen diversas propuestas para validar modelos de cambios de usos del suelo, en general, y de suelo urbano en particular. Así, las posibilidades de validación son muy amplias cuando intentamos reproducir situaciones actuales con datos del pasado para, posteriormente, proyectar tendencias al futuro. Los resultados de esos cambios modelados pueden ser comparados con los datos actuales y, así, es posible medir su capacidad operacional de manera sencilla.

Sin embargo, al trabajar con modelos para la simulación de diversos escenarios futuros de crecimiento, esto es, situaciones probables, óptimas o deseables, que no tienen por qué emanar de tendencias pasadas, es necesario ampliar y flexibilizar este proceso de validación. Hemos de volver a insistir en que, en estos casos, es imposible realizar una validación total, pues no existen datos reales con los que comparar los resultados obtenidos. Así, solo es posible abordar una validación parcial, que, como proponen Pagelow y Camacho Olmedo (2008: 29), podría realizarse a través del contraste de los resultados con las opiniones de expertos, evaluando la estabilidad de los resultados (a través, por ejemplo, de un análisis de sensibilidad) o examinando si existe convergencia con los resultados de modelos diferentes.

3.1 Análisis de sensibilidad para el modelo basado en AC

El AS propuesto tiene como objetivo evaluar la incidencia que tiene cada uno de los factores que componen el modelo basado en AC en las simulaciones generadas. De esta forma se podrá valorar la robustez del modelo, replantear la modelación de aquellos parámetros con una menor incidencia en los resultados e, inclusive, realizar en última instancia una simplificación del mismo.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Para ello, la metodología propuesta plantea crear diferentes versiones del modelo, eliminando progresivamente factores y obteniendo así distintos modelos derivados del inicial. Mediante la comparación de los resultados obtenidos con el modelo de referencia y el resto de modelos derivados, se podrá determinar la influencia de los diversos parámetros. Dicha evaluación se realizará a través de los diversos métodos de comparación de mapas que se propondrán en el siguiente apartado.

Como se menciona en el apartado 2.2, el modelo cuenta con un total de 3 factores, más la aleatoriedad. Es necesario hacer hincapié en que este último factor ha de ser tratado aisladamente, ya que sería muy complicado poder comparar los resultados entre modelos si existe una componente aleatoria en la ejecución de cada uno de ellos. La razón principal es la imposibilidad de saber qué emplazamientos genera el modelo como consecuencia de los factores incluidos en el mismo y cuáles han surgido exclusivamente fruto de la aleatoriedad.

Las diferencias que se observarán en los resultados de las simulaciones no se reflejarán en la cantidad de píxeles asignados a los nuevos usos urbanos, ya que la demanda (píxeles nuevos generados por el modelo en cada ejecución) es fija y estable, sino que tendrá que ver con la localización de los mismos. Así pues, el AS determinará en qué medida se dispersan, se compactan o se fragmentan los resultados obtenidos en función de los factores presentes en cada modelo derivado. Por lo ya explicado en cuanto a la aleatoriedad, se ha tomado como referencia en las comparaciones un modelo que engloba la totalidad de factores, excluyendo este factor (modelo M1).

Tal y como queda reflejado en la [tabla 1](#), y como parte inicial del AS, se generaron diversos modelos derivados de la versión descrita en el epígrafe 2.2. Además, se generaron tantos modelos derivados sin aleatoriedad como combinaciones posibles existían entre factores (M2, M3, M4, M5, M6 y M7). Por último, se obtuvieron tres ejecuciones del modelo original que incluyen la totalidad de factores, además de la aleatoriedad (bajo el nombre de M8), con el fin de determinar la influencia de esta última en los resultados. La razón de generar hasta tres ejecuciones del modelo M8 reside en el hecho de que cada ejecución del mismo generará un resultado diferente a causa del factor de aleatoriedad. De esta forma, generando varias ejecuciones se puede establecer qué patrón siguen los resultados del modelo original debido a este factor.

Podemos decir que los factores son estables, en el sentido que no se pretende variar su conformación o contenido, sino activarlos o desactivarlos según el tipo de modelo derivado. Una vez generado cada uno de estos modelos se pasará a realizar la comparación de los resultados que arroja cada uno. La [figura 3](#) muestra de manera gráfica la secuencia metodológica aplicada.

3.2 Evaluación de los resultados

Existen multitud de métodos para comparar dos mapas *raster*. En este caso se han seleccionado dos de los métodos tradicionales más extendidos y utilizados por la práctica totalidad de autores relacionados con este tipo de modelos, como son la comparación visual y el índice *kappa* (derivado de la tabulación cruzada).

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Por un lado la comparación visual permite apreciar las diferencias principales entre los resultados generados por los distintos modelos, además de establecer una serie de características comunes entre los mismos. Por otro, la tabulación cruzada permite cuantificar el número de píxeles coincidentes entre el modelo a comparar y el de referencia. Derivado de los resultados de esta tabulación, el estadístico *kappa* indica si el modelo que se compara es mejor que el que se pudiera haber generado por el azar (interpretación clásica de este estadístico) (Chuvieco, 2007). Los valores de ese índice varían entre 0 y 1, donde los valores más próximos a la unidad indicarán mayor acuerdo entre los dos mapas comparados.

Son muchos los autores que en las últimas décadas han defendido la utilización del índice *kappa* como valor indicativo de la validez de los resultados de clasificaciones temáticas u otro tipo de trabajos con cartografía *raster* en el que se comparen dos mapas, como queda patente en la revisión de Santé *et al.* (2010). A pesar de las críticas suscitadas hacia el uso del estadístico *kappa*, incluso por autores que lo habían utilizado tradicionalmente (Pontius y Millones, 2010), entendemos su aplicación como necesaria, puesto que aporta una visión inicial y de carácter matemático muy fácilmente interpretable.

No obstante, un punto importante de discusión sin resolver todavía por parte de la comunidad científica es si la comparación del mapa simulado con la realidad debe realizarse incluyendo la superficie urbana preexistente, además de la obtenida mediante la simulación, o por el contrario únicamente debe compararse el crecimiento simulado entre dos fechas con el crecimiento real. La mayor parte de los autores analizan los resultados incluyendo los píxeles ya existentes en el año de inicio de la simulación (es decir, se comparan los mapas simulados incluyendo la superficie preexistente), puesto que consideran que mantener los usos preexistentes es un acierto del modelo.

De esta forma, al emplear cualquier tipo de procedimiento para comprobar la similitud entre simulaciones, los resultados indicarán que los mapas simulados son bastante parecidos a los reales, puesto que la superficie preexistente es bastante mayor que la ocupada por los crecimientos simulados.

No obstante, se considera interesante comprobar cómo varían los resultados obtenidos en función del uso de uno u otro método de comparación. Por ello se estudiará, por un lado la comparación de resultados que incluyan solamente la superficie simulada, y por otro la superficie simulada además de la preexistente del uso en cuestión.

4. Resultados y discusión

4.1. Comparación visual

En los siguientes mosaicos de mapas (figuras 4 y 5) aparecen, en primer lugar, los resultados más interesantes de la ejecución de los modelos para uso residencial de alta y baja densidad ([figura 4](#)) y, en segundo lugar, los más significativos para el uso productivo ([figura 5](#)).

Para valorar la influencia de la aleatoriedad se pueden comparar los resultados de los modelos M8 y M1 (que incluyen y excluyen, respectivamente, la aleatoriedad). En la [figura 6](#) se puede observar que existen bastantes similitudes entre ambos modelos para los dos usos. En primer lugar se comentarán los resultados obtenidos para los usos residenciales, discutiendo la influencia de cada uno de los factores, continuando después con los usos productivos.

Así, en lo que respecta a los **usos residenciales**, la eliminación de la aleatoriedad manteniendo la totalidad de los factores del modelo (M1) hace que se obtengan parcelas similares a las que se consiguen con las ejecuciones del modelo original (M8). Bien es cierto que las parcelas nuevas de mayor superficie residencial se sitúan adyacentes a las ya existentes en el año 2000 en ambas simulaciones, aunque también se registran algunas diferencias de localización espacial en parcelas de menor tamaño.

En lo que respecta a la influencia de la aptitud, los resultados del modelo que excluye este factor (M2) muestran de manera clara una diferencia en la forma de las parcelas generadas, en comparación con los modelos M1 y M8 comentados anteriormente. Las parcelas tienen en esta versión formas más agregadas y no aparecen tan dispersas. Se conservan algunos nuevos emplazamientos del uso en la zona central de la Comunidad de Madrid, aunque otros de gran tamaño desaparecen y se generan nuevas parcelas en distintas localizaciones ([figura 7](#)); de tal forma que la aptitud limita el crecimiento por extensión de las parcelas preexistentes, favoreciendo una mayor dispersión.

El factor accesibilidad, por su parte, no parece presentar un grado de influencia tan acusado como el del resto de factores. Así, los resultados del modelo que no incluye este factor (M3) son muy similares a los de los modelos en los que se mantiene, a excepción de algunas parcelas que parecen estar algo más agregadas. Esta situación no parece tener mucha lógica pues este factor suele ser determinante en la aparición de nuevas zonas urbanas. Así cabe pensar que el problema reside en que dicho factor no ha sido correctamente tratado o modelado. Por tanto, este resultado aleja la posibilidad de simplificar el modelo eliminando este factor, por el contrario sería necesario repensar la implementación del mismo para que refleje de manera apropiada su influencia y determinación en los resultados del modelo.

Finalmente, en lo que respecta al factor de vecindad (eliminado en el modelo M4), los resultados obtenidos muestran como se conservan las parcelas de uso residencial más comunes a los diferentes modelos, aunque se generan otras que no aparecen en el resto y que se caracterizan por no ser adyacentes a los usos ya existentes. La eliminación de este factor, por tanto, provoca diferencias significativas respecto al modelo tomado como referencia (M1), constituyéndose como uno de los dos factores dominantes del modelo (y que es uno de los parámetros, *a priori*, más importantes, junto con la aptitud).

En cuanto a la influencia de los factores en los resultados para los **usos productivos**, los nuevos emplazamientos para 2020 se localizarían en las proximidades de las vías de comunicación más importantes, de ahí que se puedan apreciar patrones más lineales en la distribución de los mismos, con matices en función de la ausencia de los diferentes factores.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Al igual que ocurría con los usos residenciales, los resultados para el modelo que no considera la aleatoriedad (M1) muestran una situación muy similar a los de la versión completa (M8), con alguna pequeña diferencia en la localización de las parcelas de menor tamaño.

Por su parte el modelo que no incluye la aptitud (M2) hace que los nuevos emplazamientos productivos no se concentren tanto en la zona central (próximos a los ya existentes) y se sitúen en zonas donde no existía tal uso en el año 2000, dispersando en exceso los resultados.

En lo que respecta a la accesibilidad, el modelo que no la incluye (M3) muestra un comportamiento similar al modelo de uso residencial, sin que se aprecie especial incidencia en la variación de los resultados por parte del factor excluido.

Por último, la eliminación del factor vecindad en el modelo M4 genera resultados más agregados y en torno a la zona central, aumentando la superficie de las parcelas industriales preexistentes y evitando la localización de nuevos emplazamientos en zonas con menor densidad de ocupación urbana.

Al comparar los resultados obtenidos para el uso residencial y los del uso productivo se demuestra que los factores no actúan de igual forma para ambos usos. Esto puede resultar algo evidente, ya que los filtros de vecindad utilizados para cada uso son distintos y es en este punto donde residen principalmente las diferencias visuales de los resultados generados. Por ello los resultados del uso productivo tienen tendencia a localizarse más próximos a las vías de comunicación. En cuanto al resto de los factores, la aleatoriedad juega un papel más relevante en los resultados simulados para el uso residencial en comparación con los obtenidos para el productivo. En lo que respecta a la aptitud, su consideración para ambos usos supone un comportamiento similar, provocando que las teselas de nuevo crecimiento se ubiquen en zonas más idóneas para ello. Además la accesibilidad no incluye muchas diferencias entre modelos debido a este factor en cualquiera de los dos usos simulados.

4.2 Tabulación cruzada e índice *kappa*

A continuación, aparecen los resultados derivados de la tabulación cruzada y en consecuencia del índice *kappa* (tabla 2). Se han valorado para ambos usos tanto la superficie simulada como la superficie total del uso (simulada y preexistente). Si tenemos en cuenta solamente la superficie total, los resultados de *kappa* estarán sesgados, dado que los resultados de los modelos a comparar tendrán en común la superficie preexistente, tendiendo a ser los valores de *kappa* más altos. Si se estudia solamente la superficie simulada (los nuevos desarrollos urbanos para 2020), se encontrarán valores altos de *kappa* debido a que realmente los modelos comparados generan simulaciones muy similares.

En primer lugar se trataría de obtener información sobre cómo actúan cada uno de los factores de manera individual, excluyendo la aleatoriedad. Por tanto se compararán los resultados

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

del modelo M1 (tomado como referencia) con los de los modelos M2, M3 y M4 en los que se elimina sólo uno de los factores del modelo original.

En segundo lugar se realizarán varias comparaciones con modelos ejecutados con tan sólo uno de los factores (vecindad, accesibilidad o aptitud). Así se comprobará la influencia que sobre los resultados tendría la eliminación de los factores no relacionados con la vecindad (M1 con M5); o lo que sucede si se aísla la vecindad (M4) y se compara con modelos en los que se cuenta tan sólo con los factores de accesibilidad y aptitud (M6 y M7); por último, se compararán las diversas ejecuciones generadas con aleatoriedad (modelo M8 en sus versiones a, b y c) entre sí y con el modelo M1 para determinar la influencia de ésta.

Es necesario advertir que la superficie preexistente en el año 2000 en los dos usos estudiados es del orden de entre dos y tres veces superior en comparación con la superficie generada por la simulación (13.995 píxeles preexistentes por 4.580 simulados en residencial y 3.591 por 2.540 en el caso del uso productivo). Si se revisan los valores obtenidos para el índice *kappa* considerando la superficie total se podrá comprobar que estos son muy altos y se pueden extraer pocas conclusiones de los mismos. Por ello se considera necesario estudiar qué ocurre considerando solamente la superficie simulada.

En el caso de las ejecuciones del modelo original (M8), se puede apreciar que el índice *kappa* para el uso productivo en las comparaciones ronda el 0,88 y el 0,95 para el residencial de alta y baja densidad, considerando la superficie total del uso. Si se tiene en cuenta sólo la superficie simulada estos valores disminuyen hasta 0,72 y 0,81, respectivamente. Así, se aprecia la notable influencia que la consideración de la superficie total del uso o sólo la simulada puede tener sobre los resultados, reduciéndose de manera importante la similitud de los resultados cuando sólo consideramos esta última. Por otro lado, podemos afirmar que cada vez que se ejecuta un modelo con aleatoriedad (como el modelo original M8) generaremos simulaciones un 28% aproximadamente distintas para el uso productivo (asemejando el índice *kappa* a la tasa de acuerdo entre mapas) y un 18% para el uso residencial debido a este factor.

La comparación entre las ejecuciones M8 y M1 nos indica que en el caso de la superficie total de uso productivo para el año 2020 los mapas alcanzarían un índice *kappa* de 0,90 y un 0,96 en el caso del uso residencial. Para la superficie simulada se alcanzan valores en torno al 0,77 y 0,85, respectivamente. Por lo tanto, se comprueba que la aleatoriedad aporta diferencias sustanciales en los resultados del modelo, de tal forma que uno de cada seis píxeles del uso residencial no coincidirán espacialmente, localizándose en otro lugar al considerar este factor. Esta diferencia es mayor en el uso productivo, donde la localización espacial de prácticamente uno de cada cuatro píxeles generados por el modelo no coincidiría.

Al igual que se mencionó en el apartado de comparación visual, los resultados generados por M8 y M1 son visualmente muy similares ya que las diferencias residen en la localización de pequeños polígonos. A través del índice *kappa* se comprueba que numéricamente la diferencia es algo mayor, aunque entendemos por bueno el grado de aleatoriedad incluido.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Una vez comentadas de forma particular las características del factor de aleatoriedad, nos centraremos ahora en el resto de los factores. Así, en primer lugar hemos podido comprobar cómo la eliminación de la aptitud (M2) provoca una disminución considerable de los valores del índice *kappa* en los dos usos simulados. Esto indica la influencia de este factor en la variación de los resultados del modelo, comprobando que éstos vienen determinados en gran medida por este factor, como ya se comentaba en el análisis visual. La eliminación del mismo hace que se alcancen desacuerdos con el modelo M1 superiores al 60% (*kappa* de 0,34 para uso residencial y 0,38 para uso productivo), demostrando que este factor condiciona profundamente los resultados. Además podemos comprobar qué ocurre si aislamos dicho factor en el modelo M7 al compararlo con el M4. Se observa un comportamiento según el cual la aptitud tendría mayor trascendencia en el uso residencial que en el uso productivo, dados los valores de *kappa* obtenidos.

En segundo lugar, la accesibilidad (M3), que en principio debería presentarse como un factor determinante (especialmente en el caso del uso productivo), no tiene casi incidencia en los resultados del modelo. La eliminación de este factor provoca solamente cambios del orden del 5% en los resultados del modelo de referencia. Es lógico pues pensar que, como se comentó anteriormente en la comparación visual, este factor debería ser recalculado con el fin de otorgarle un papel más relevante en el modelo y decisivo en la obtención de los resultados del mismo.

Por último, la eliminación de la vecindad influye en mayor medida en el caso del uso productivo, haciendo disminuir los valores de *kappa* hasta el 0,30. Por tanto, la ausencia de este factor introduce la mayor discrepancia con respecto al modelo de referencia y por ello debemos destacar su importancia como parte fundamental de un modelo basado en AC.

5. Conclusiones

El principal objetivo que perseguía este trabajo no era otro que sentar unas bases preliminares para la realización de AS sobre modelos de simulación urbana basados en AC, más allá de las consideraciones tradicionales basadas en el tamaño de la vecindad o la influencia de la escala. Este tipo de prácticas resultan esenciales para validar los resultados de modelos que no pueden verificarse con datos reales ya que simulan situaciones hipotéticas que podrían presentarse en el futuro (escenarios exploratorios y/o normativos). Por lo tanto, con la validación no se pretende comprobar la capacidad de predicción del modelo sino: (1) la robustez y fiabilidad de sus resultados y, por extensión, el riesgo que se asumiría al tomar decisiones futuras basándonos en los resultados arrojados por el mismo; (2) valorar el grado de influencia de los diferentes factores con vistas a mejorar la modelación.

En relación con la robustez de los resultados, es posible destacar que para el escenario simulado con las diferentes versiones del modelo existen nuevos emplazamientos urbanos que se repiten en varias de las simulaciones. Estos podrían considerarse como los resultados más robustos y serían los más idóneos para localizar las nuevas superficies de los respectivos usos. En la [figura 8](#) aparece la representación cartográfica de esta valoración a partir de la suma del resultado de todos los modelos para ambos usos (residencial y productivo). Los valores más altos destacan los emplazamientos que más veces han sido seleccionados a partir de los modelos ensayados y que, por

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

tanto, pueden considerarse como los que serían más tendentes para convertirse en zonas urbanas de acuerdo con los modelos simulados. Se trataría por tanto de aquellos lugares sobre los que sería necesario llevar a cabo un proceso de análisis detallado, con el objetivo de ordenarlos de una manera adecuada que pueda responder a las fuertes tensiones urbanizadoras a las que se encuentran sometidos, pero también a sus características territoriales.

En general, podemos observar que en el modelo de uso residencial se obtiene una mayor cantidad de localizaciones estables, pero también el volumen de localizaciones seleccionadas menos de tres veces es muy importante. En el caso de uso productivo encontramos una "estabilidad media" mayor, siendo escasas las localizaciones con alto grado de estabilidad. Esto nos puede servir de base para realizar una mejor selección del territorio a intervenir, aunque, como hemos advertido, en este caso concreto debería estudiarse previamente, y con mayor profundidad, el tratamiento del factor accesibilidad.

En lo que respecta al grado de influencia de los factores que integran el modelo, los resultados han mostrado la especial relevancia de la aptitud y la vecindad en las diferentes simulaciones, destacando también la escasa influencia de la accesibilidad. Frente a la posibilidad de eliminar este factor del modelo es posible intentar avanzar en mejoras de la modelación de este factor que, en futuros trabajos, muestren una mayor influencia del mismo en los resultados.

Otro aspecto relevante que emerge fruto del trabajo realizado es el que respecta a los métodos de comparación de mapas empleados en la valoración de los resultados del AS. En este trabajo se han empleado diversos métodos. A este respecto, la comparación visual y la comparación píxel a píxel mediante índice *kappa* aportan una visión general y valiosa de los resultados obtenidos, permitiendo valorar la incidencia de los diversos factores en el modelo en los resultados, de acuerdo con su inclusión o no en el mismo. Sin embargo, la comparación de mapas sigue siendo uno de los aspectos controvertidos en cartografía temática y más en lo que respecta a la simulación, descripción y comparación de usos del suelo. El empleo de otros métodos de comparación que ejecuten esta tarea significará un gran apoyo a los análisis de sensibilidad aplicados a simulación de escenarios futuros, y en este caso a los modelos basados en AC.

Se considera por tanto que la evaluación de los resultados de los modelos no debe quedarse en comparaciones píxel a píxel puesto que solamente atienden a la localización espacial exacta, sino que también se debe entrar a considerar otro tipo de procedimientos que aclaren si las formas obtenidas por los distintos modelos o las *teselas* o fragmentos urbanos generadas presentan una composición y/o configuración espacial similar. Por ello, se pretende abordar en trabajos futuros la comparación entre los resultados del modelo, aplicando métricas de ecología del paisaje (McGarigal *et al.*, 2002; Aguilera Benavente *et al.*, 2011) con el fin de evaluar la estructura del paisaje generada por cada modelo derivado. También se debería utilizar otros métodos de proximidad espacial entre los diferentes resultados con los que poder realizar una evaluación más flexible, de forma que no se estudie la similitud en cuanto a la localización exacta, sino con un cierto margen de distancia (Pascual Rosa *et al.*, 2010).

Finalmente también es necesario destacar la cuestión relacionada con la comparación de los resultados simulados empleando la superficie simulada o la superficie total (simulada más

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

previa). Los resultados obtenidos en este trabajo arrojan que es necesaria la utilización de la superficie simulada (además de la total) para realizar dicha comparación dado que aportan mayor información y evitan el sesgo que podría producirse en caso de considerar solamente la total. A este respecto, si solamente se considerase esta última, al aparecer la superficie preexistente por igual en los dos mapas comparados, los valores de la tasa de desacuerdo disminuirían y el valor del índice *kappa* se situaría más próximo a la unidad, mostrando valores que podrían ser discutibles.

Agradecimientos

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad", financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 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).

Bibliografía

Aguilera Benavente, F. y Talavera García, R., (2009): "Valoración de escenarios futuros a través de la conectividad del paisaje", *Observatorio Medioambiental*, 12, pp. 17-36.

Aguilera Benavente, F.; Plata Rocha, W.; Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2009): "Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos", *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, pp. 57-80.

Aguilera Benavente, F.; Valenzuela Montes, L.M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en Autómatas Celulares", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, pp. 271-300.

Aguilera Benavente, F.; Valenzuela Montes, L.M.; y Botequilha-Leitão, A. (2011): "Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area", *Landscape and Urban Planning*, 99, pp. 226-238.

Aguilera Benavente, F.; Gómez Delgado, M. y Plata Rocha, W. (2012): "Escenarios y modelos de simulación como instrumento de planificación en ámbitos metropolitanos", en Gómez Delgado, M. y Rodríguez Espinosa, V.M. (Eds.): *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*, Paracuellos de Jarama, Ra-Ma, pp. 185-234.

Barredo, J.; Kasanko, M.; McCornick, M. y Lavalle, C., (2003): "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through celular automata", *Landscape and Urban Planning*, 64, pp. 145-160.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Barredo, J.I.; Demicheli, L.; Lavallo, C.; Kasanko, M. y McCormick, N., (2004): "Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, pp 65-84.

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., (2004): "Modelling urban landscape dynamics: A case study in Phoenix, USA", *Urban Ecosystems*, 7, pp. 215-240.

Buyantuyev, A. y Wu, J. (2009): "Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case of the Phoenix metropolitan area, USA", *Journal of Arid Environments* 73:512-520.

Castro Martín, T. y Puga González, D., (1998): *Informe monográfico del Tomo I de la estadística de población de la Comunidad de Madrid 1996*. Madrid, Estudios y Análisis.

Catalá Mateo, R.; Bosque Sendra, J y Plata Rocha, W., (2008): "Análisis de los posibles errores en la base de datos CORINE Land Cover (1990-2000) en la Comunidad de Madrid", *Estudios Geográficos*, CSIC, LXIX, 264, enero-junio, pp. 81-104.

Cheng, J. y Masser, I. (2003): "Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China", en *Landscape and Urban Planning*, 62, pp. 199-217.

Chuvieco Salinero, E. (2007): *Teledetección Ambiental*. Barcelona, Ariel Ciencia, 3ª Edición.

Dietzel, C. y Clarke, K.C. (2004): "Replication of spatio-temporal land use patterns at three levels of aggregation by an urban cellular automata", en *Lecture Notes in Computers Science*, 3304, pp. 523-532.

Dietzel, C. y Clarke, K.C. (2006): "The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting", *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, pp. 78-101.

European Environment Agency, (2006): *Land Accounts for Europe. Towards integrated land and ecosystem accounting*. EEA Report N°11/2006.

Frankhauser, P. (1998): "Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis", *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, pp. 127-145.

Forman, R. T. T. (1995): *Land Mosaics: The ecology of Landscapes and regions*. Cambridge, University Press.

García, A.M.; Santé, I.; Crecente, R. y Miranda, D. (2011): "An analysis of the effect of the stochastic component of urban cellular automata models", *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, pp. 286-296.

Gilbert, N. y K.G. Troitzsch, eds. (2005). *Simulation for the Social Scientist*, Glasgow, Open University Press.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Gómez Delgado, M. y Barredo, J.I., (2005): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, Paracuellos de Jarama, Editorial Ra-Ma, 2º Edición.

Gutiérrez Puebla, J., (2004): "Producción de suelo industrial en la Comunidad de Madrid: expansión, dispersión y fragmentación del espacio industrial", *Anales de Geografía*, 24, pp. 169-192.

Hansen, H. S., (2010): "Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise", *Landscape and Urban Planning*, 98, pp. 141-149.

Itami, R. M. (1994): "Simulating spatial dynamics: cellular automata theory", *Landscape and Urban Planning*, 30, pp. 27-47.

Jantz, C.A. y Goetz, S.J. (2005): "Analysis of scale dependencies in an urban land use change model", *International Journal of Geographical Information Science*, 19 (2), pp. 217-241.

Kasanko, M.; Barredo, J.I.; Lavallo, 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*, 77, pp. 111-130.

Kocabas, V., y Dragicevic, S., (2006): "Assessing cellular automata model behavior using a sensitivity analysis approach", *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, pp. 921-953.

Li, X; Yang, Q. y Liu, X. (2008): "Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata", *Landscape and Urban Planning*, 86, pp 177 – 186.

Liu, X. y Andersson, C. (2004): "Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling", *Computers, Environment and Urban Systems*, 28 (1-2), pp. 107-124.

López, E.; Bocco, G.; Mendoza, M. y Duhau, E. (2001): "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A Case in Morelia City, Mexico", *Landscape and Urban Planning*, 55, pp 271-285.

Malczewski, J. (1999): *GIS and multicriteria decision analysis*. New York. John Wiley & Sons.

McGarigal, K.; Cushman, S.A.; Neel, M.C. y Ene, E. (2002): *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*, Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. [Consulta: 01-04-2012]. Disponible en: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

Ménard, A. y Marceau, D.J. (2005): "Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata", *Environment and Planning B.*, vol. 32, pp. 693-714.

Mitsova, D.; Shuster, W. y Wang, X., (2011): "A cellular automata model of landcover change to integrate urban growth with open space conservation", *Landscape and Urban Planning*, 99, pp 141-153.

OSE: Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006): *Cambios de ocupación del suelo en España*. Madrid. Ed. Mundi-Prensa Libros, S.A., ISBN: 978-84-8476-287-4.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

OSE- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2011): *Sostenibilidad en España 2011*. Madrid. Ed. Mundi-Prensa Libros, S.A. [Consulta: 01-04-2012]. Disponible en: <http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/ Informes/anuales/2011/sostenibilidadenespana2011.pdf>

O'Sullivan, D. y Torrens, P.M., (2000): *Cellular models of urban systems. WP-22*. London, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London.

Paegelow, M. y Camacho, M.T (2008): *Modelling environmental dynamics*. Berlin, Springer-Verlag.

Pascual Rosa, V.; Aguilera Benavente, F.; Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J., (2010): "Simulación de modelos de crecimiento urbano: métodos de comparación con los mapas reales", en Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Sevilla, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, pp. 1.000-1.013.

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*, 92, pp. 10-23.

Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008): 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*, 0, España. [Consulta: 01-04-2012]. Disponible en: http://www.planeamientoyurbanismo.com/numeros-antteriores.asp?id_perodo=3.

Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): "Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000)", *Scripta Nova (Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales)*, Vol. XIII, núm. 293.

Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2011): "Simulating urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain", *Environment and Planning B. Planning and design*, 38 (6), pp 1012-1031.

Pontius, R.G. y Millones, M. (2010): "Death to Kappa: Birth of Quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment", en *International Journal of Remote Sensing*, 32 (15), pp. 4407-4429.

Pozo Rivera, E. (2005): "Tendencias recientes en la evolución de la población de la Comunidad de Madrid (1996-2001)", en *Anales de Geografía*, 25, pp. 353-379.

Saltelli, A.; Chan, K. y Scott, E.M., (2000): *Sensitivity Analysis*. Chichester, John Wiley & sons.

Samat, N., (2006): "Characterizing the Scale Sensitivity of the Cellular Automata Simulated Urban Growth: A Case Study of the Seberang Perai Region, Penang State, Malaysia", *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, pp. 905-920.

Santé, I.; García, A.M.; Miranda, D. y Crescente, R., (2010): "Cellular autómatas models for the simulation of real world urban processes: A review and analysis", *Landscape and Urban Planning*, 96, pp. 108-122.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Torrens, P.M., (2000): "How cellular models of urban systems work". London, WP-28. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London.

Verburg, P.H.; Schot, P.P.; Djist, M. J. y Veldkamp, A. (2004): "Land Use change modeling: current practice and research priorities", *Geojournal*, 61, pp 309-324.

White, R.; Engelen, G. y Uljee, I., (1997): "The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 323-343.

Yeh, A. y Li, X., (2006): "Errors and uncertainties in urban cellular automata", *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, pp. 10-28.

TABLAS

Tabla 1. Relación de los modelos estudiados derivados del inicial (M1 a M7), ejecuciones del modelo original (M8) y factores que lo componen.

SIMULACIONES OBTENIDAS								
MODELOS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
FACTORES EMPLEADOS EN CADA SIMULACIÓN								
Aleatoriedad								X
Vecindad	X	X	X		X			X
Accesibilidad	X	X		X		X		X
Aptitud	X		X	X			X	X

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Comparación de los resultados de los modelos tanto para uso residencial de alta y baja densidad como para uso productivo.

Modelo de referencia	Modelo a comparar	Residencial		Productivo	
		Kappa (sup. Total)	Kappa (sup. simulada)	Kappa (sup. Total)	Kappa (sup.simulada)
M 1	M 2	0,83	0,34	0,74	0,38
M 1	M 3	0,99	0,94	0,97	0,93
M 1	M 4	0,90	0,61	0,71	0,30
M 1	M 5	0,83	0,33	0,74	0,39
M 4	M 6	0,76	0,05	0,59	0,02
M 4	M 7	0,99	0,99	0,85	0,63
M 8a	M 1	0,96	0,85	0,90	0,75
M 8a	M 8b	0,96	0,82	0,88	0,72
M 8a	M8c	0,95	0,80	0,88	0,72
M 8b	M 1	0,96	0,86	0,90	0,77
M 8b	M 8c	0,95	0,81	0,88	0,72
M 8c	M 1	0,96	0,83	0,90	0,77

Nota: en este caso se estudia en la primera columna de cada uso el estadístico *kappa* para la superficie total del uso (preexistente y simulada) y en la segunda columna la superficie de crecimiento simulada para el año 2020, excluyendo la preexistente.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

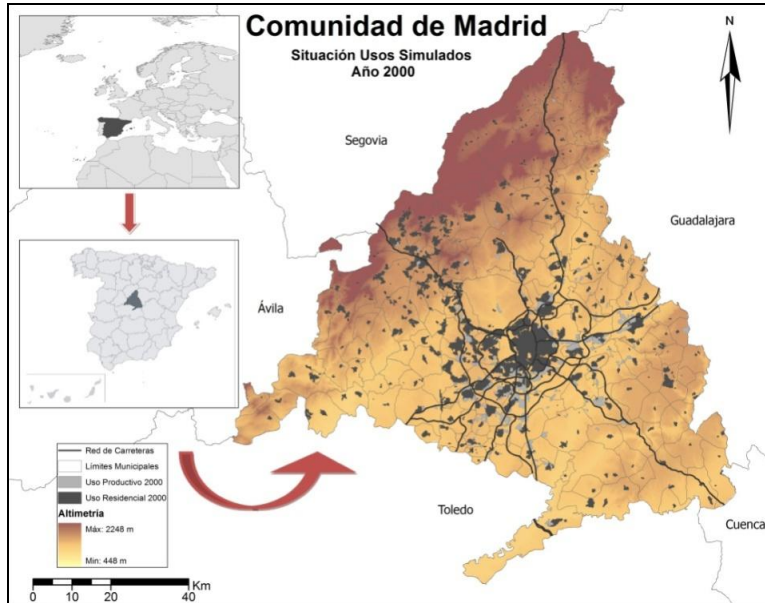


Figura 1. Situación geográfica del área de estudio: Comunidad de Madrid
Fuente: elaboración propia.

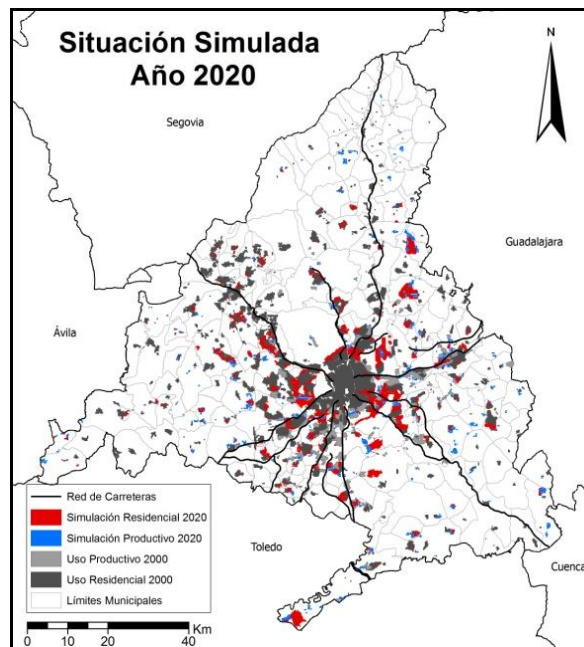


Figura 2. Simulación obtenida para el año 2020 empleando la versión original del modelo desarrollado.
Fuente: elaboración propia.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

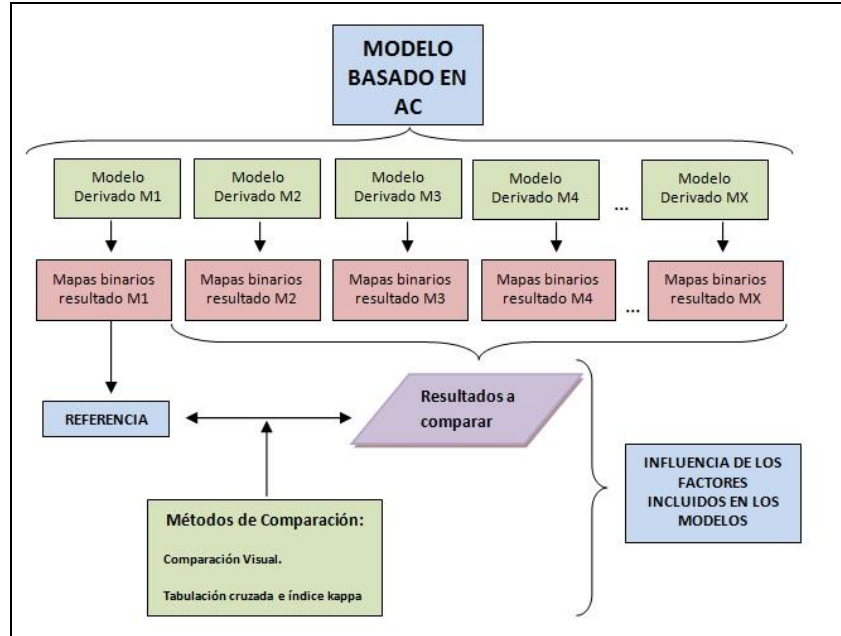


Figura 3. Secuencia metodológica para llevar a cabo el Análisis de Sensibilidad

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

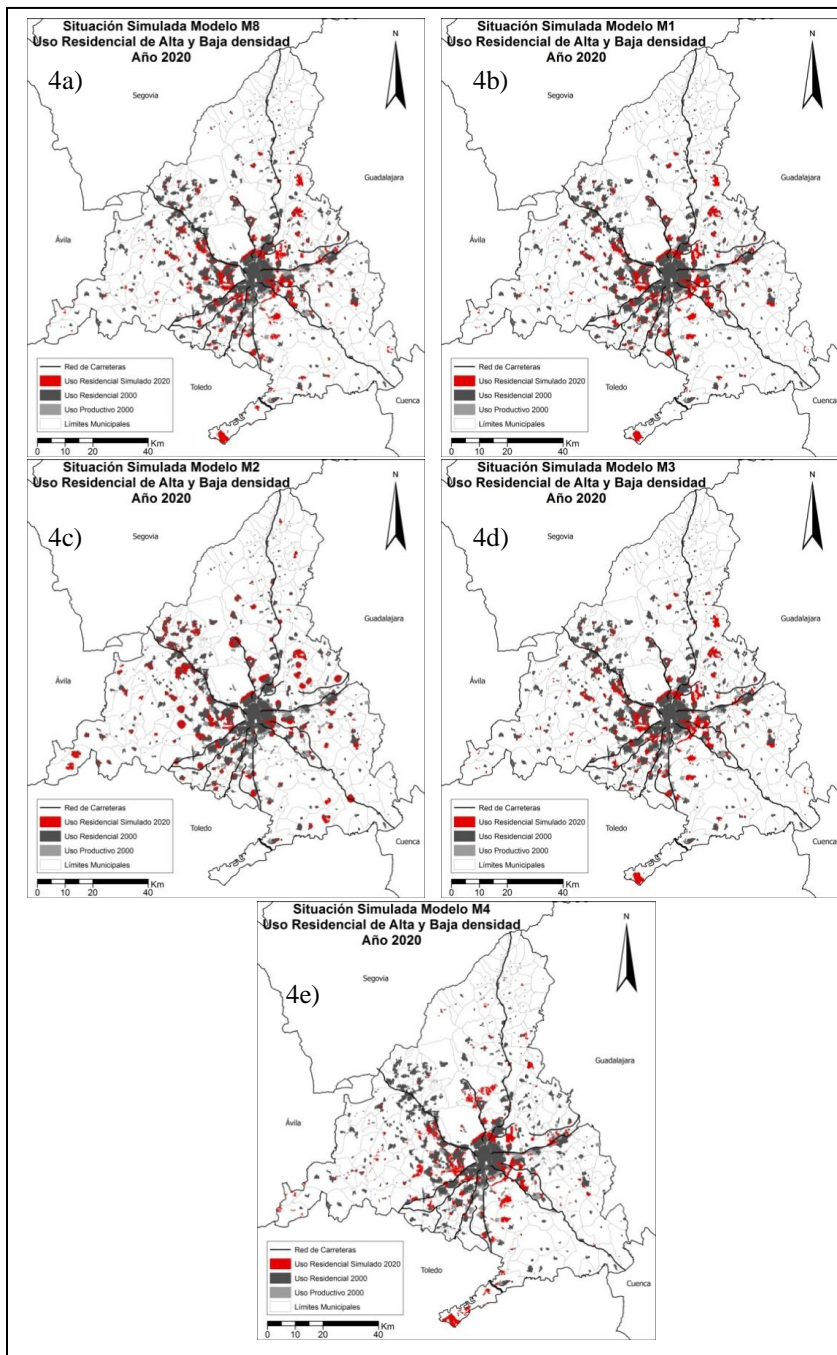


Figura 4. Resultados de cinco de los modelos simulados para uso residencial de alta y baja densidad: ejecución del modelo original M8 (4a), sin aleatoriedad o M1 (4b), sin aptitud o M2 (4c), sin accesibilidad o M3 (fig. 4d), y sin vecindad o M4(fig. 4e).

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

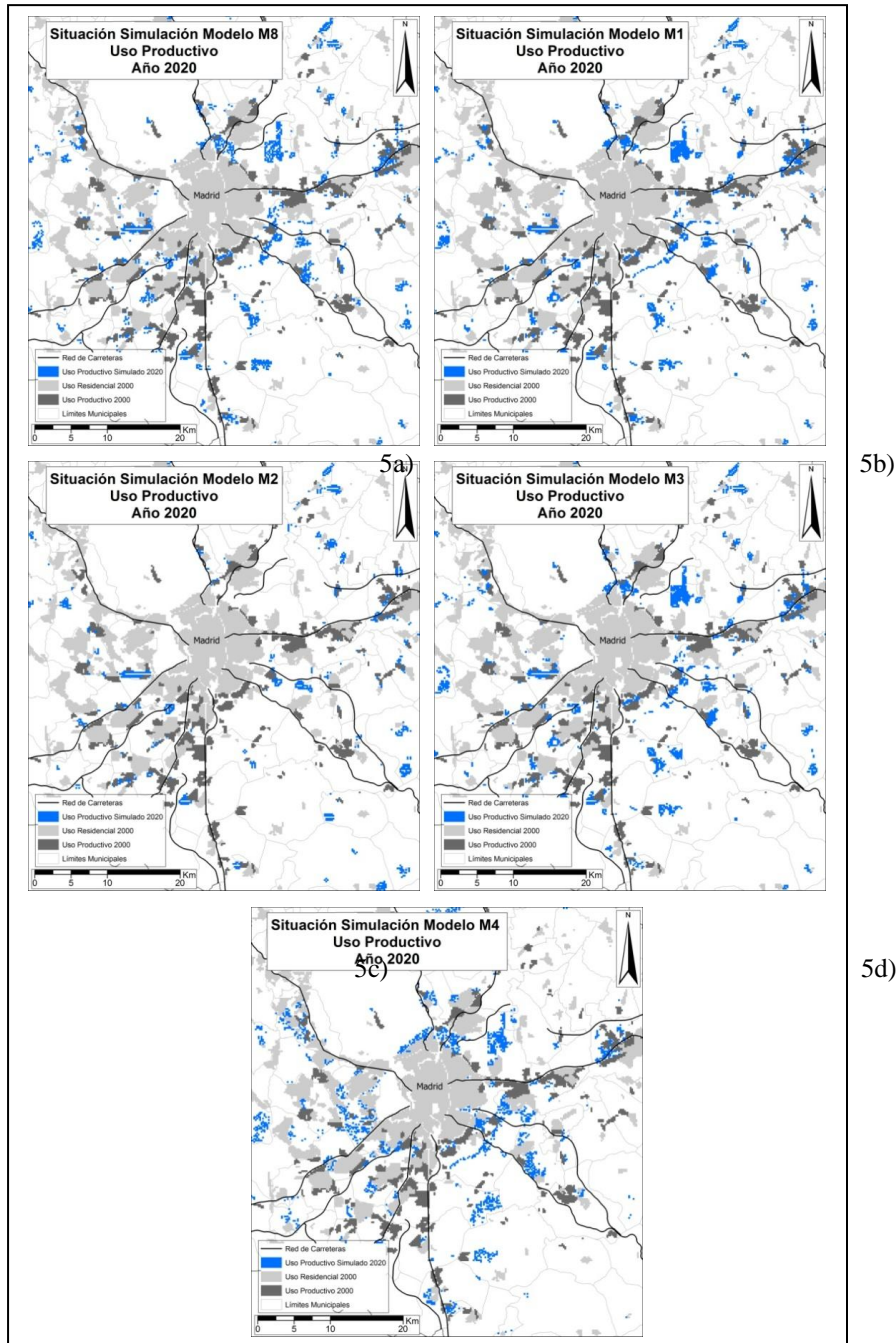


Figura 5. Mosaico de figuras donde se presenta un zoom de una zona significativa de la Comunidad de Madrid para el año 2020 de los diversos modelos para el uso productivo: ejecución del modelo original M8 (fig. 5a), sin aleatoriedad o M1 (fig. 5b), sin aptitud o M2 (fig. 5c), sin accesibilidad o M3 (fig. 5d), y sin vecindad o M4 (fig. 5e).

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

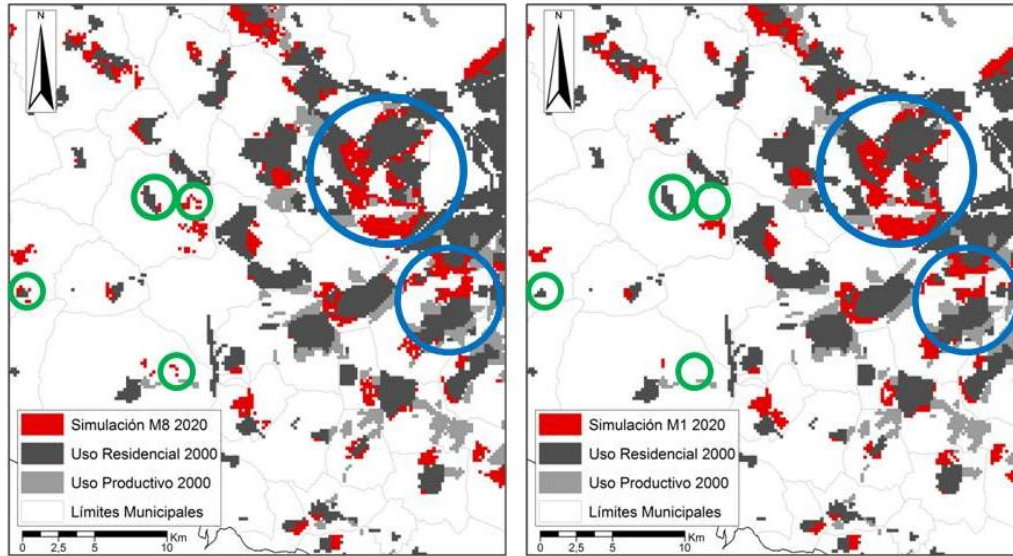


Figura 6. Ejemplo de comparación de resultados entre el modelo M8 (ejecuciones del modelo original) y el M1(sin aleatoriedad) para el uso residencial. Los círculos verdes muestran las diferencias en la localización de nuevas parcelas de pequeño tamaño. Los azules reflejan las igualdades en la representación de las parcelas de mayor tamaño.

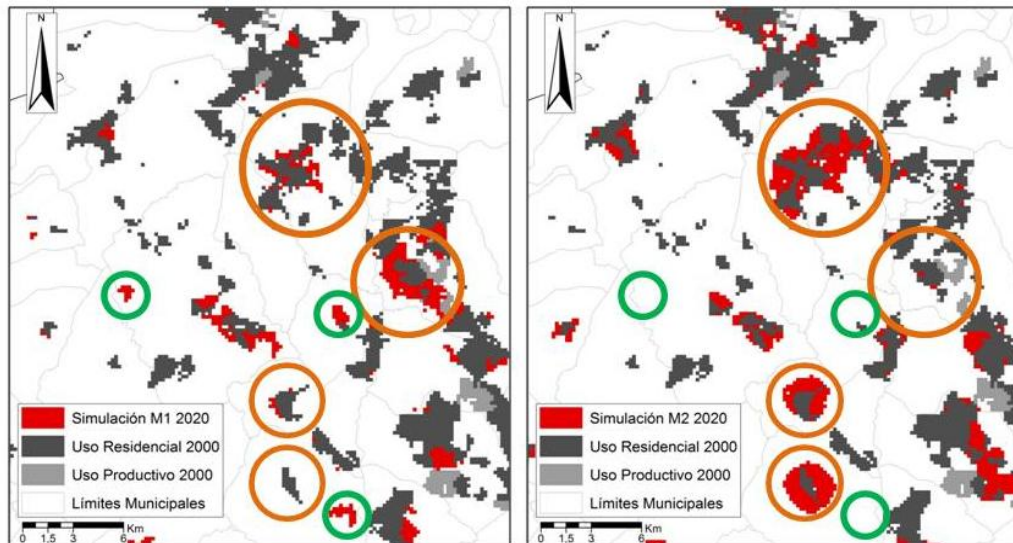


Figura 7. Ejemplo de comparación de resultados para el uso residencial entre el modelo M1 y el M2 para comprobar el efecto de la aptitud. Los círculos verdes muestran parcelas que desaparecen al eliminar dicho factor. Los naranjas reflejan cómo se generan parcelas más agregadas y compactas al prescindir de la aptitud.

Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M. (2012): "Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p.303-328. ISSN: 1578-5157

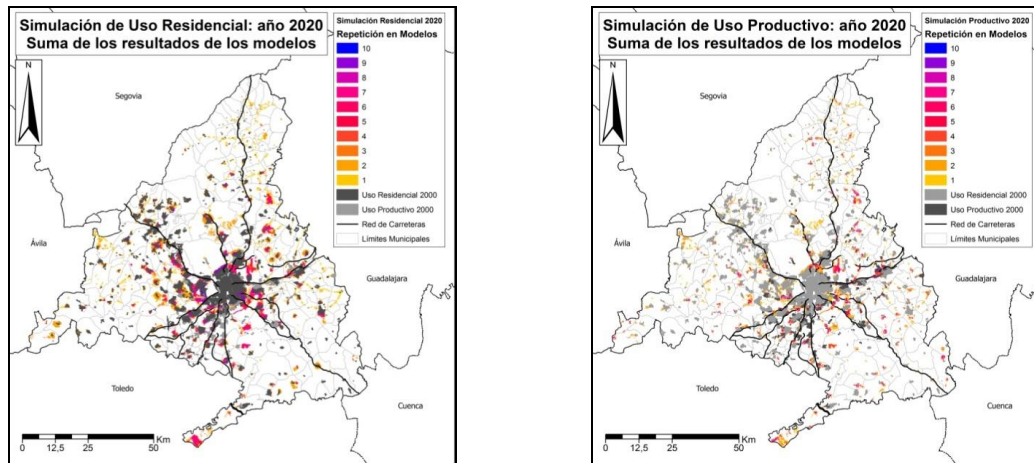


Figura 8. Cartografía de las localizaciones que más veces han sido seleccionadas para uso residencial de alta y baja densidad (izquierda) y para uso productivo (derecha) en la ejecución de los distintos modelos derivados del original.