Universidad de Alcalá

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Unidad Docente de Geografía

Programa de Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MODELO BASADO EN AGENTES PARA LA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

Carolina de Carvalho Cantergiani

Tesis Doctoral

2017

Imagen adaptada de la obra `*Expansion*´ 2009, Amy Casey
www.amycaseypainting.com / www.ZgGallery.com

Universidad de Alcalá

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Unidad Docente de Geografía

Programa de Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MODELO BASADO EN AGENTES PARA LA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

TESIS DOCTORAL

CAROLINA DE CARVALHO CANTERGIANI

Alcalá de Henares, España

Abril de 2017

Universidad de Alcalá

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Unidad Docente de Geografía

Programa de Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MODELO BASADO EN AGENTES PARA LA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

Tesis Doctoral presentada por:

CAROLINA DE CARVALHO CANTERGIANI

Bajo la dirección de:

DRA. MONTSERRAT GÓMEZ DELGADO

Alcalá de Henares, España

Abril de 2017

Universidad de Alcalá
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE

C/ Colegios, 2
28801 Alcalá de Henares (Madrid)
Teléfonos: 91 885 44 29
Fax: 91 885 44 39
e-mail: dep419@uah.es

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ, PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

Francisco Javier Salas Rey, Director del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá, en representación de su Consejo de Departamento,

HACE CONSTAR

Que la Tesis Doctoral titulada "Desarrollo de un prototipo de modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano", realizada por Dña. **Carolina de Carvalho Cantergiani**, reúne las características adecuadas para su exposición y defensa pública: rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación adecuada de la metodología. Por tales motivos doy mi conformidad para que se proceda al depósito y registro de esta Tesis Doctoral.

Alcalá de Henares, 7 de abril de 2017

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ · DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE ·

Francisco Javier Salas Rey
Director del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Universidad de Alcalá

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE
Calle Colegios, 2
28801 Alcalá de Henares (Madrid)
Teléfonos: 91·885·44·29
Fax: 91·885·44·39
dep419@uah.es

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ. PATRIMONIO DE LA HUMANIDAD

La Dra. Montserrat Gómez Delgado, Profesora Titular de Universidad en la Unidad Docente de Geografía, del Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá, y directora de la Tesis Doctoral **Desarrollo de un prototipo de modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano** realizada por **Dña. Carolina de Carvalho Cantergiani**

INFORMA

Que el trabajo presentado reúne los requisitos científicos, metodológicos, formales y de originalidad suficientes para constituir una Tesis Doctoral. El trabajo riguroso, así como las aportaciones metodológicas y técnicas de la investigación, hacen acreedora de mi VISTO BUENO para proceder a la lectura y defensa pública ante el correspondiente tribunal.

Alcalá de Henares, a 6 de Abril de 2017

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ · DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE ·

DIRECTORA DE LA INVESTIGACIÓN
Dra. Montserrat Gómez Delgado

A mi familia

Colaboración Beca IELAT-Santander

Esta investigación fue parcialmente financiada por la *Beca IELAT-Santander*, resultante del convenio establecido entre el Instituto Universitario de Estudios Latinoamericanos (IELAT) y el Banco Santander.

La duración de la ayuda comprendió los meses de febrero hasta diciembre de 2015, intervalo coincidente con un impulso importante para el término de esta etapa académica.

En el marco de esta beca, quiero expresar mi especial agradecimiento a los impulsores de este convenio, el comité directivo del IELAT, así como a los responsables por parte del Banco Santander, que conjuntamente proporcionaron el soporte financiero necesario para avanzar hacia la finalización de esta investigación, sin la cual hubiera sido más dificultoso concluirla.

Asimismo, deseo mencionar la inestimable comprensión y soporte del director del IELAT, Prof. Pedro Pérez Herrero que, en todo momento y dentro de sus posibilidades, ha estimulado el desarrollo y avance de esta investigación.

Finalmente, agradezco el apoyo del Prof. Dr. Daniel Sotelsek Salem que, durante este período, asumió el papel de tutor académico, y cuyo apoyo llevó a la generación de diálogos valiosos que trataban temas más allá de aquellos exclusivos del ámbito científico y del contexto de esta tesis doctoral, y cuya sinergia llevó a la propuesta de nuevas actividades junto a este instituto.

Me siento afortunada de haber sido una de las primeras beneficiadas de esta ayuda, y espero que esta iniciativa pueda seguir ayudando a futuros doctorandos a alcanzar sus objetivos académicos.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer de forma general, a todos aquellos que, de alguna forma, hicieron parte de este largo camino, a veces cruzándolo, y otras acompañándome y ayudándome a vencer las numerosas etapas, ahora pasadas.

No podría dejar de mencionar el apoyo fundamental que recibí de los amigos con quienes coincidí en este departamento en diferentes períodos de mi larga trayectoria, que seguramente hicieron esta etapa más amena. A los que ya siguieron sus caminos, espero volver a encontraros.

Dedico un agradecimiento especial a mi `familia alcalaína´, sin la cual sería imposible superar tantos momentos de incertidumbre. Tener la agenda cubierta de encuentros hizo mucho más fácil superar la distancia de casa. La vida en Alcalá es mucho más divertida con vosotros.

También a los muchos amigos externos al ámbito universitario, quiero dar las gracias por permitirme desconectar y pasar momentos inolvidables explorando otros mundos que no el mío.

A aquellos que ya no están entre nosotros, mis sinceras gracias por hacerme ver, de la forma más dura, que la vida es corta y hay que aprovecharla al máximo. A María Ángeles Díaz Muñoz por haber sido mi primera mentora, y que me acogió cariñosamente al llegar a España y me acompañó en la etapa inicial de mi carrera investigadora, cuando todo eran incertezas.

Por supuesto debo agradecer a aquellos que me brindaron con su amistad y confianza, y que hicieron valiosas contribuciones a la mejora de calidad de esta tesis. Yo sabía que podía confiar en todos vosotros, muchas gracias por vuestro tiempo y dedicación. Gracias especialmente a César Vergara por ofrecer su ayuda inestimable con en la programación de mis modelos.

No puedo dejar de agradecer a aquellos que creían que no llegaría. El esfuerzo para mostrar a mí misma que era capaz y las ganas puestas en ello me hicieron más fuerte y me impulsaron a cumplir mis objetivos y cerrar esta etapa.

Por supuesto, no quiero dejar de agradecer a mis familiares y amigos que están en Brasil y que, aunque nunca entendieron el porqué de esta tesis eterna, se mantuvieron cercanos, incentivándome a seguir adelante en todo momento. Sin la ilusión de reencontrarles a cada fin de año, tampoco hubiera sido fácil seguir adelante.

Mi eterna gratitud a Montse, mi directora de tesis, con quien compartí años de aprendizaje constante y cuyos comentarios acertados en momentos oportunos, broncas merecidas, el trato cercano, además de la profesionalidad inmejorable, me llevaron a llegar donde estoy. Gracias por creerlo y hacerme creer que era posible, y empujarme siempre hacia delante.

Por último, y lo más importante, quiero agradecer con todo mi amor el apoyo incesante que he tenido por parte de mi familia. A mis padres Marilda e Ivo; mis hermanos Sabrina y Paulo Virgilio; mi cuñado Paulo Roberto; mis sobrinos Paulo Henrique, Cecilia y Enzo. A pesar de la distancia, durante todos estos años no dudé ni un segundo de que siempre habéis estado a mi lado, de corazón. ¡Os quiero más que todo en este mundo!

ÍNDICE

Resumen 1
Abstract 3

INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN 4
Introducción 5
Objetivo general 10
Objetivos específicos 11
Estructura de la investigación 14
Publicaciones resultantes de esta investigación 16

MARCO DE REFERENCIA Y MODELO CONCEPTUAL 18

CAPÍTULO 1. Modelos basados en agentes para la simulación del crecimiento urbano .. 19
1. Introducción 19
2. Modelos Basados en Agentes aplicados al crecimiento urbano 22
   2.1. Características generales de un Modelo Basado en Agentes 22
      2.1.1. Estructura básica de un Modelo Basado en Agentes 23
      2.1.2. Comprobación de los Modelos Basados en Agentes 26
3. Aspectos técnicos: protocolo de descripción y plataformas 30
4. Aplicación de Modelos Basados en Agentes a estudios urbanos 33
   4.1. Tipos de escenarios de simulación urbana 33
   4.2. Potencialidades y deficiencias de los MBA 36
   4.3. Aplicaciones existentes y experiencia en España 37

CAPÍTULO 2. El área de estudio y la gestión de la información 42
1. Contextualización geográfica y delimitación 43
2. Dinámica territorial 47
   2.1. Planificación urbana: marco legal 50
   2.2. Dinámica de la ocupación urbana 56
3. Gestión de la información espacial de referencia para la simulación 62
   3.1. Plataformas para el desarrollo del Modelo Basado en Agentes 62
   3.2. Datos espaciales de referencia 63
   3.3. Soluciones adoptadas para solventar las limitaciones de la información espacial disponible. 65

CAPÍTULO 3. Simulación del crecimiento urbano mediante un Modelo Basado en Agentes 70

1. Introducción 70

2. Diseño de un MBA para el Corredor del Henares: justificación y metodología 72

2.1. Agentes 74

2.2. Variables 76

2.3. Reglas de comportamiento 78

DESARROLLO DEL MODELO BASADO EN AGENTES 84

CAPÍTULO 4. Submodelo de asignación de suelo urbanizable por los planificadores urbanos (SM1) 85

1. Introducción 85

1.1. Estructura lógica del submodelo de los planificadores urbanos 88

1.2. La interfaz gráfica del SM1 en NetLogo 93

1.3. Resolución técnica adoptada para la obtención de las áreas urbanizables. 95

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones con distintos perfiles de planificador urbano 96

CAPÍTULO 5. Submodelo de desarrollo residencial por los promotores inmobiliarios (SM2) 103

1. Introducción 103

1.1. Estructura lógica del submodelo de los promotores inmobiliarios 107

1.2. La interfaz gráfica del SM2 en NetLogo 111

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones del comportamiento de los promotores inmobiliarios 113

CAPÍTULO 6. Submodelo de ocupación residencial por la población (SM3) 120

1. Introducción 120

1.1. Estructura lógica del modelo 123

1.1.1. Atributos del submodelo asociados a los agentes 123

1.1.2. Atributos del submodelo asociados al entorno 125

1.1.3. Descripción de factores a considerar por la población para ocupar nuevas viviendas 126

1.2. La interfaz gráfica del SM3 en NetLogo 132

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones del comportamiento de la población 133

CAPÍTULO 7. Modelo basado en agentes integrado – AMEBA (MI) 138
1. Introducción 138
1.1. Estructura lógica del modelo 139
1.2. La interfaz gráfica en NetLogo 143
2. Verificación del modelo a partir de algunas simulaciones de crecimiento urbano 145

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 151
Reflexiones y Conclusiones 152
Limitaciones y Futuras líneas de investigación 159

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 163
Referencias Bibliográficas 164

ANEXOS 175
Anexo 1. Protocolo ODD 176
Anexo 2. Sintaxis del Modelo Integrado (Programación en NetLogo) 189
Anexo 3. Artículos científicos destacados 193

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS, ECUACIONES Y ACRÓNIMOS 200
Índice de Figuras 201
Índice de Tablas 204
Índice de Ecuaciones 206
Lista de Acrónimos 207

RESUMEN

La complejidad característica del fenómeno urbano, así como la variada problemática (territorial, ambiental, social, económica, etc.) asociada al mismo se han incrementado en las últimas décadas. Cada vez es más evidente la necesidad de favorecer un crecimiento urbano ordenado, respetuoso con el medio ambiente, que asegure condiciones y calidad de vida aceptable para la población. Los modelos espaciales han surgido como un intento por comprender estas dinámicas y procesos urbanos, para representar y facilitar el entendimiento de los cambios observados en el pasado y en el presente, así como para proyectarlos a futuro.

En este sentido, los modelos prospectivos, con la modelización y proyección a futuro de un determinado fenómeno mediante la definición de diferentes escenarios, se presentan como un instrumento de enorme aplicabilidad para apoyar el proceso de planificación.

Dentro de los modelos de simulación prospectiva destacan los Modelos Basados en Agentes (MBA). Se trata de un modelo capaz de contemplar el comportamiento de agentes autónomos desde un enfoque *bottom-up* (desde abajo hacia arriba), es decir, cuyo resultado a un nivel agregado deriva del comportamiento colectivo de varios individuos. Otras características, destacadas por varios autores en relación a su aplicación en el ámbito urbano, son: (i) poder transformar el comportamiento de agentes en reglas de decisión, (ii) contemplar la movilidad de los agentes, que no están limitados al análisis de la vecindad inmediata (iii) simular relaciones sociales, normalmente considerando la población como un agente, (iv) disponer de una variedad de plataformas disponibles en código abierto. Actualmente, la confluencia de estos modelos con tecnologías de la información geográfica, como los SIG, y su progresiva integración con las mismas, está ampliando sus capacidades de análisis espacial y mejorando las ya existentes.

En esta tesis doctoral se desarrolla el prototipo de un MBA explícitamente espacial para simular el crecimiento urbano en un ámbito supramunicipal, probado en un sector de la región urbana de Madrid, el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid). A la hora de simular los cambios territoriales, la simulación es tratada desde ambas perspectivas, *bottom-up* y *top-down*, esta última, típica de la planificación tradicional.

En primer lugar, se han elaborado submodelos independientes que simulan el comportamiento de agentes identificados a esta escala como motores de la expansión urbana: planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Los dos primeros, representantes de los procesos de expansión territorial y, el último, de la ocupación residencial, que resultan finalmente en la generación de demanda de nuevas viviendas y suelo urbanizable, y el consiguiente crecimiento urbano. Una vez que los planificadores urbanos hayan establecido el suelo a convertirse en urbanizable en los próximos años, los promotores inmobiliarios impulsan la construcción de diferentes tipos de viviendas en el mismo. Por último, la población, según su poder adquisitivo y preferencias, selecciona las nuevas residencias a ocupar. Los tres submodelos

han sido integrados en un cuarto modelo final (AMEBA) que simula los comportamientos individuales y reacciones de los tres agentes de forma integrada.

Los resultados obtenidos muestran la validez de los MBA para simular el crecimiento urbano a escala supramunicipal. Aunque ha sido testado en el Corredor del Henares, se considera que puede servir de apoyo a la toma de decisiones relacionadas con la planificación y ordenación territoriales en otras zonas similares.

Palabras-clave: Modelos Basados en Agentes, crecimiento urbano, escenarios, planificación urbana, Corredor del Henares, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT

The complexity that characterizes urban phenomena, together with many associated dimensions (territorial, environmental, social, economic, etc.), has increased in the last decades. The need to promote a coordinated and respectful urban growth, that assures acceptable conditions and a proper quality of life to the population, is evident. Spatial models have emerged as an attempt to understand the dynamics and urban processes, as well as to represent, facilitate their comprehension and project past and present changes into the future.

In this sense, prospective modeling is widely applied, and commonly presented as a useful instrument to support the planning process through the modeling and visioning of a given phenomenon under different scenarios.

Agent-based Models (ABM) stands out among them. They are able to consider the behavior of autonomous agents represented by both bottom-up and top-down approaches, the first indicating that results at an aggregated level derives from the collective behavior of many individuals. Other distinguished properties of ABM applied to solve urban issues are: (i) to be able to translate behavior into decision rules, (ii) to consider the mobility of agents that are not limited to neighborhood analysis, (iii) to simulate social relations when population is usually chosen as an agent, (iv) to dispose of many open source platforms. Currently, the synergies of ABM with the geographic information technology, such as GIS, are improving existing capabilities regarding spatial analysis, and creating new ones.

This PhD thesis presents a spatially explicit prototype of ABM, developed in order to simulate urban growth in a subregional area, and tested at Corredor del Henares, Region of Madrid. The simulation is here accounted for both bottom-up and top-down perspectives, the latter typical of traditional planning in Spain.

In the first place, independent submodels have been developed to simulate the behavior of those agents considered the conductors of urban growth at subregional scale. By one side, urban planners and housing developers that represent the territorial expansion process, and by the other, the population, that represents the residential occupation. Once urban planners have established the land to convert into potentially urban, developers select the proper areas and constructs different typologies of housing. Finally, the population reacts and choses new housing to settle, according to their purchasing power and spatial preferences. A fourth and final model (called AMEBA), conceived to integrate the three submodels and properly simulate their reactions.

The results show that ABM could therefore be useful as a successful model to simulate urban growth at a subregional scale. Although tested for the *Corredor del Henares*, they can definitely support decision-making processes of territorial and urban planning at similar areas.

Keywords: Agent-Based Models, urban growth, scenarios, urban planning, Corredor del Henares, Geographic Information Systems.

INTRODUCCIÓN Y ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

INTRODUCCIÓN

Un informe reciente de la Comisión Europea indica que un 54% de la población mundial, un 72% de la población europea y un 78% de los españoles viven actualmente en áreas urbanas (Comisión Europea y UNHabitat, 2016). Las proyecciones estadísticas indican que estos porcentajes crecen a todas las escalas. Consecuentemente, las ciudades que reciben dicha población tienden a seguir expandiéndose continuamente con el fin de acogerla; a su vez afrontan un reto importante al tener que soportar los efectos inherentes de los procesos urbanos que en ella actúan (Batty, 2005, Fernández Güell, 2011, Batty, 2012, White *et al.*, 2015). La concentración y simultaneidad de diferentes tipos de procesos urbanos en una ciudad, a nivel ambiental, económico, social, institucional y cultural la convierten en un ambicioso objeto de estudio.

Es importante destacar que estos procesos, continuos e incesantes, confirman que las ciudades se encuentran en constante estado de desequilibrio, entendiendo equilibrio como sinónimo de estabilidad (Batty, 2017). En este sentido, cualquier cambio en el contexto urbano, ya sea por la instauración de un nuevo paradigma económico, la emergencia de nuevas teorías científicas, la aparición de nuevos estilos de expresión y comunicación o desarrollo de nuevas pautas de comportamiento social, pueden producir una turbulencia que, a su vez, genera una transformación que es difícil, por no decir imposible, de administrar o modificar (Fernández Güell, 2011). Además, estos procesos poseen la típica característica de fenómenos emergentes en los que, de forma similar a un `efecto mariposa´, dadas unas condiciones iniciales de un sistema determinado, la más mínima variación en ellas puede provocar que el sistema evolucione en formas completamente diferentes. Estas premisas son la base de la teoría del caos enunciada por el meteorólogo Edward Lorenz en 1972 (Lorenz, 1972).

Los cambios urbanos, caracterizados por su multiplicidad y multidimensionalidad, pueden ser objeto de rechazo por parte de la población, pero también pueden provocar el efecto contrario y ser experimentados como un elemento de atracción. Dependiendo de cómo sean gestionados o abordados en la normativa vigente, y lógicamente del grado de cumplimiento de la misma, estos cambios serán bien asimilados o bien rechazados por los ciudadanos.

Los planes de ordenación urbana son los instrumentos destinados, en teoría, a plantear posibles soluciones territoriales a los problemas ambientales o los conflictos debido a la segregación social resultante de la valorización económica del suelo, que caracterizan actualmente a nuestras ciudades. También es a través de la planificación urbana que el proceso de crecimiento, considerando los fenómenos de expansión y ocupación del suelo, puede ser analizado y controlado, principalmente al estar estrechamente vinculados con la elaboración de políticas públicas.

En el planeamiento urbanístico español las intervenciones no se proponen a nivel global, sino más bien a escala municipal[1], y en algunos casos, subregional o supramunicipal[2], el ámbito territorial por excelencia cuando se trata de una planificación estratégica. En todas las escalas la preparación del plan representa un trabajo exhaustivo y costoso en términos de tiempo de ejecución. En cualquier caso, el documento de trabajo es desarrollado por un equipo de profesionales contratados por la Administración Pública, cuya principal función es elaborar, informar, interpretar y controlar la ordenación territorial para un determinado ámbito espacial (Rébora, 1993). En este sentido, en cierto grado recae en los planificadores urbanos la responsabilidad de definir las directrices que conduzcan a un proceso de crecimiento sostenible y ordenado, principalmente al considerar la delimitación de la zonificación, es decir, indicar cómo, dónde y en qué grado se permite a cada actor realizar intervenciones en el suelo urbano y urbanizable.

Aunque muchas decisiones tomadas a lo largo de ese proceso obedecen a los criterios técnicos del equipo redactor, en consonancia con las debidas consultas a expertos y a la comunidad, otras están inevitablemente relacionadas con las directrices establecidas según una determinada filosofía política del gobierno. Representa un típico proceso donde predomina el enfoque *top-down* (desde arriba hacia abajo), es decir, un proceso de toma de decisión a nivel institucional, que parte de información a un nivel agregado, y que influye en la población a nivel individual (Batty, 2008, Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010, Pissourios, 2014).

[1] Los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU) son instrumentos realizados a nivel municipal.

[2] En esta investigación se utilizan ambos términos indistintamente, los cuales se entienden por un nivel que baja la escala de la región, pero que está por encima de la municipalidad, que es la unidad mínima espacial para planificar en España.

Para que un planificador urbano ejecute su función con excelencia, se supone que, entre otras cosas, debe poseer capacidad de entender el territorio, tratar de conocer su pasado y poder identificar cambios y relacionarlos con sus posibles causas. Al mismo tiempo, es deseable que también cuente con una visión de futuro que, siguiendo las directrices políticas marcadas, le permita trazar metas adecuadas y plantear soluciones a problemas acordes a una realidad cercana, proponiendo una mejor propuesta en cuanto a la ordenación del territorio y al bienestar de la población.

Es incuestionable el importante papel que tiene la dimensión temporal en el proceso planificador, teniendo en cuenta el pasado (conocimiento de la evolución histórica), el presente (indicación de la situación actual e identificación de tendencias) y el futuro (proyección y visualización de situaciones futuras posibles) (Aguilera Benavente *et al.*, 2010a). De ahí lo conveniente de disponer de herramientas y técnicas de simulación que permitan elaborar distintos escenarios sobre la evolución de los sistemas y, así, planificar de una forma racional y sostenible futuros desarrollos urbanos (White *et al.*, 2015).

Actualmente existe una serie de herramientas que permiten al individuo lograr perspectivas a futuro bien fundamentadas, considerando simultáneamente el estado actual del fenómeno, las tendencias y la percepción de los diferentes actores involucrados en el proceso de planificación. Entre estas herramientas destacan los estudios prospectivos que, a través de la modelación de un determinado fenómeno, permiten proyectar una situación a futuro creando diferentes escenarios. Estos estudios se han visto enormemente beneficiados del rápido y reciente avance tecnológico que permitieran el desarrollo de modelos computacionales de última generación, capaces de procesar una cantidad considerable de datos e información. En especial, cabe destacar la evolución de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), imprescindibles para cualquier estudio donde se elaboren análisis espaciales, y que en el presente caso permite la incorporación y facilita el procesamiento de la información geográfica para que esté en consonancia con la modelación.

El desarrollo y aplicación de estos modelos prospectivos en la planificación urbana y estratégica española es prácticamente nulo. En algunas publicaciones especializadas es posible encontrar referencias a medios de compilar información sobre necesidades futuras a través de técnicas como la agrupación de diagnósticos, entrevistas a entidades locales, aplicación de método DELPHI, estudio de percepción ciudadana (Merinero Rodríguez, 2010), o también a partir de tormenta de ideas, análisis estructural, juego de actores, matrices de impacto, etc. (Gómez Orea, 2008). Sin embargo, en ningún momento se plantea complementarlos mediante modelos informáticos de simulación del crecimiento urbano. Las razones que se argumentan son diversas y tienen que ver con el elevado nivel de complejidad, escepticismo por parte de los planificadores y tomadores de decisiones, la insuficiente comprensión de modelos informáticos, falta de referencias en cuanto a ejemplos aplicados y reconocidos para replicarlos, falta de conocimiento,

falta de interés a nivel institucional, falta de presupuesto, etc. En el ámbito práctico de la planificación tradicional, se considera que aún hay un largo camino por recorrer para que estos modelos sean ampliamente utilizados en un contexto real de forma que los productos puedan traer beneficios no sólo para los planificadores, sino también para la comunidad en general.

Dentro del ámbito de la investigación científica la modelación es, sin duda, más valorada, reconociendo que la inevitable complejidad de las decisiones tomadas en un contexto urbano conlleva la creación de modelos también muy complejos (Heppenstall *et al.*, 2016). Las tendencias inciertas e inexactas que implican todos estos procesos maximizan la dificultad de simularlos y con ello, también de incentivar que su utilización se traslade al ámbito práctico. No obstante, al poner en evidencia resultados positivos y favorables en el marco de la modelación prospectiva, se reconoce ampliamente que el trabajo generado por un equipo de perfil 'político-académico', que posibilite una relación de complementariedad, podría significar un paso importante en la utilización de la modelación como apoyo real a la toma de decisiones.

En la academia, el abanico de aplicaciones existentes en cuanto a la simulación urbana es amplio, y es posible hallar una cantidad sustancial de posibilidades centradas en simular escenarios de futuro a través de modelos prospectivos (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008, Carsjens, 2009, Hansen, 2010, Santé *et al.*, 2010). Estas se presentan como potentes herramientas para analizar y evaluar cuestiones ambientales y territoriales y también cuestiones relacionadas con los procesos de toma de decisiones en planificación. Por ser un tópico muy recurrente en artículos académicos, se observa un desarrollo importante en cuanto a la cantidad de nuevas técnicas y metodologías de modelación urbana y, consecuentemente, también del número de publicaciones disponibles a lo largo de los últimos años.

En este contexto, entre los modelos prospectivos más comúnmente aplicados a estudios del crecimiento urbano, habría que destacar los basados en Autómatas Celulares (AC). De forma resumida, se pueden definir como un mecanismo que reproduce procesos cuyas características cambian en el tiempo en función del estatus, reglas y datos de partida (Benenson y Torrens, 2004). Se trata de un modelo matemático donde el estado de cada celda depende del estado previo de las celdas de su vecindad inmediata, de acuerdo a una serie de reglas de transición (White, 1998). Se han aplicado reiteradamente para estudios en el ámbito urbano, relacionados principalmente con los cambios de usos del suelo. A día de hoy, es posible encontrar numerosos ejemplos destinados a simular el proceso de expansión urbana (Batty, 2005, Norte Pinto, 2007a, Santé *et al.*, 2010, Triantakonstantis y Mountrakis, 2012).

No obstante, en el mundo de la modelación hay una nueva modalidad de simulación que están fundamentados en los AC y cuya aplicación a estudios territoriales es relativamente reciente. Se trata de los Modelos Basados en Agentes (MBA), que son modelos también celulares capaces de simular fenómenos emergentes a través del comportamiento de agentes autónomos que actúan teniendo en cuenta su estado y características propias, la percepción de su entorno, así como sus

propios intereses (Batty, 2005). Estos comportamientos se reproducen a través de una serie de reglas de decisión que les permiten alcanzar un objetivo o meta, provocando los consecuentes cambios en la estructura inicial del sistema.

Una ventaja importante a la que sacar partido es que tienen la capacidad de simular fenómenos a partir de un enfoque *bottom-up* (desde abajo hacia arriba), es decir, cuyo resultado a un nivel agregado deriva del comportamiento colectivo de varios individuos. En este sentido, se puede considerar un MBA el modelo idóneo para tratar de entender un fenómeno generado a partir de relaciones sociales (Heppenstall *et al.*, 2016), y por ello la población suele ser el agente más ampliamente considerado por contar con un comportamiento racional, pasando de una situación de `estar´ de muchos modelos, a una situación de `actuar´ de los MBA.

En cuanto al fenómeno de crecimiento urbano, a pesar de que algunos agentes implicados en el proceso como los planificadores participan actuando en un sentido *top-down*, otros muchos actores igualmente participan del sistema decisorio al contribuir con sus elecciones a nivel individual, siendo el resultado generado analizado a escala agregada (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010, Pissourios, 2014). Los MBA ofrecen esta posibilidad de incluir en la simulación el proceso de toma de decisiones de varios agentes individuales y su interacción, y por ello su aplicación puede ser eficaz en estudios relacionados con la expansión urbana (Filatova *et al.*, 2009, Heppenstall *et al.*, 2016). Sería el caso de la población, que se reproduce, intercambia ideas, enriquece, empobrece, espera, se cambia de residencia, forma familias, etc. O el caso de los promotores inmobiliarios que compran, venden, construyen, se arriesgan, estudian el mercado, aguardan el momento adecuado para intervenir, etc. Y también el de otros muchos actores sociales que participan inevitablemente de este proceso de forma implícita.

En resumen, el principal valor añadido de los MBA respecto a otros modelos prospectivos consiste en considerar la interacción entre agentes con diferentes comportamientos definidos por las reglas de decisión en función de sus intereses particulares. En este caso, el cambio de estado de un individuo no está limitado a la vecindad como en los mencionados AC, sino que se realiza en función de la interacción entre agentes, independientes de su ubicación espacial (Torrens, 2007, Heppenstall *et al.*, 2012). Aunque se reconozca la evidente relación entre los MBA y los resultados de la toma de decisión por parte de unos determinados agentes, hasta el momento todavía no han sido suficientemente explorados o planteados como soporte tangible en la planificación urbana real.

En este contexto, esta tesis juega un importante papel al tratar de cubrir esta laguna científica, donde la estructura singular de los MBA, los procesos de planificación urbana y el comportamiento asociado a los agentes involucrados, se entremezclan y conjuntamente dan lugar al desarrollo de un prototipo de MBA capaz de simular el crecimiento urbano. Otra ventaja consiste en haber sido desarrollado para superar la escala de la municipalidad y aplicarse al ámbito supramunicipal, una vez que el prototipo se ensaya en el Corredor del Henares.

OBJETIVO GENERAL

Considerando que los Modelos Basados en Agentes están en pleno proceso de difusión en las ciencias sociales por ser una forma novedosa de simular el comportamiento de los actores o agentes implicados en determinados procesos espaciales, y para poder comprender mejor el futuro en relación a los cambios de los fenómenos urbanos, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación o hipótesis de partida:

¿Es posible desarrollar un Modelo Basado en Agentes capaz de simular el crecimiento urbano a una escala supramunicipal, que pudiera ser útil en el proceso de planificación urbana?

Para contestar a esta pregunta, se llevó a cabo un arduo trabajo de investigación donde se ha planteado la creación de un prototipo para este modelo, que a su vez lleva a la formulación de lo que se considera su *objetivo principal*, y que se define como:

Desarrollar un prototipo de un Modelo Basado en Agentes que sea capaz de simular el sistema de crecimiento urbano, utilizando como zona de ensayo el Corredor del Henares (Madrid).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Con el fin de cumplir satisfactoriamente el objetivo principal de esta investigación, se optó por desagregarlo en procesos intermedios para los que también se establecen metas concretas. Así, se listan a continuación los cuatro objetivos específicos (OE) de esta investigación, que se pretenden cumplir a lo largo de este trabajo.

OE-1) Evaluar si es posible y acertado desarrollar un MBA teniendo en cuenta que se pretende realizar una simulación del crecimiento urbano a nivel supramunicipal (testado en el Corredor del Henares) para ser usada en el contexto de la planificación urbana. Para eso, será necesario:

a) Realizar una revisión bibliográfica relativa a los MBA, introduciendo sus principales conceptos y evaluando las posibles formas de aplicarlo a la simulación de la planificación urbana a nivel supramunicipal.
b) Contextualizar el área de estudio en términos de planificación y ocupación urbana, con el objetivo de identificar los principales actores implicados en el proceso de expansión urbana y así respaldar la futura elección de los agentes, entorno y reglas de decisión del modelo.

c) Crear una base de datos coherente y compatible (en términos de cobertura geográfica y especificaciones técnicas), para su utilización en el modelo, considerando la disponibilidad de datos y la escala de aplicación.
d) Elegir la plataforma apropiada para el desarrollo del MBA, de acuerdo a su capacidad informática, difusión científica, compatibilidad con los SIG, y que posibilite establecer una interfaz accesible y fácil de utilizar.

OE-2) Identificar los principales actores inductores del crecimiento urbano y traducirlos en agentes y sus respectivos comportamientos, a través de variables, factores y parámetros que se puedan incorporar a la programación del modelo. Para eso, será necesario:

a) Identificar las limitaciones y necesidades en cuanto a la planificación urbana en el área de estudio – extensible a otras subregiones españolas similares, y en algunos casos, también europeas –, teniendo en cuenta la aplicación de nuevas herramientas, como la utilización de modelos prospectivos.
b) Diseñar un modelo conceptual para la simulación del crecimiento urbano a nivel supramunicipal, describiendo su arquitectura, donde se explicitarán los agentes elegidos, entorno, reglas de decisión, formas de comportamiento, etc., en consonancia con el área de estudio y los datos existentes.

OE-3) Desarrollar los prototipos de los submodelos independientes para reproducir el comportamiento de cada agente implicado en el proceso, cuyos resultados nos permitan comprender y considerar su complejidad individual y simular sus comportamientos. Para eso, será necesario:

a) Desarrollar un planteamiento suficientemente flexible para recrear distintos comportamientos y escenarios globales.
b) Producir resultados coherentes, comparables, e interoperables con los SIG.
c) Realizar un ensayo en el Corredor de Henares y producir resultados coherentes con su objetivo, verificando su consistencia en cuanto al desarrollo conceptual, técnico e informático.

OE-4) Desarrollar el prototipo de un modelo final integrado, que agrupe los submodelos previamente elaborados, considerando sus diferencias en cuando a la resolución temporal, comportamiento de los agentes, etc., posibilitando crear escenarios y simular el proceso de expansión y ocupación urbanas. Para eso, será necesario:

a) Elaborar una propuesta de integración conceptual basada en las características y resultados individuales de los submodelos.
b) Desarrollar informáticamente el prototipo según el modelo conceptual definido en la etapa anterior.
c) Ensayarlo en el Corredor de Henares y producir resultados coherentes con el objetivo del modelo, verificando su consistencia en cuanto al desarrollo conceptual, técnico e informático.
d) Redactar un documento con la descripción pormenorizada del modelo.

ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

Con la intención de estructurar más claramente esta tesis, se ha dividido en *tres bloques*, cada uno desagregado en capítulos:

I. Marco de Referencia y Modelo Conceptual;
II. Desarrollo del Modelo Basado en Agentes;
III. Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.

El primer bloque, dedicado al *Marco de Referencia y Modelo Conceptual*, se divide en tres capítulos. En el *Capítulo 1* es donde se presenta qué son y cómo se estructuran los Modelos Basados en Agentes, además de discutir su aplicación a procesos urbanos. Este capítulo presenta el fundamento teórico necesario para desarrollar lo que se presentará a lo largo de esta investigación, reforzando la hipótesis establecida como objetivo general de este trabajo.

El *Capítulo 2* se centra en la descripción del área de estudio elegida para ensayar todos los modelos desarrollados. Se presenta, por tanto, el Corredor del Henares cuyo importante proceso de expansión urbana la convierte en un atractivo objeto de estudio. Para poder conceptualizar su modelación en el futuro, se hace especial hincapié en entender la dinámica territorial asociada, centrada mayoritariamente en la planificación y ocupación urbanas. Asimismo, es también en este capítulo donde se describen las especificaciones técnicas relacionadas con la base de datos y las soluciones y procesamiento de datos geográficos que se hizo necesario realizar para su configuración final.

El primer bloque culmina con un tercer capítulo (*Capítulo 3*) dedicado a la presentación del modelo conceptual del MBA, mezclando las referencias teóricas presentadas en el primer capítulo con la justificación de la elección del área de estudio del segundo. Es en este capítulo donde se detalla cada elemento del modelo, teniendo en cuenta los agentes, entorno, atributos y reglas de comportamiento, así como la plataforma elegida y su respectivo desarrollo informático.

El segundo bloque aborda el *Desarrollo del Prototipo del Modelo Basado en Agentes*, derivado de la revisión y análisis realizado en el primer bloque. El contenido consiste en la elaboración de cuatro modelos, es decir, tres submodelos y un modelo integrado, distribuidos en cuatro capítulos independientes. La presentación de los submodelos (capítulos 4, 5 y 6) consta en todos los casos de una presentación de los términos conceptuales en cuanto a la definición de agentes y reglas de comportamiento, seguido de la descripción del desarrollo informático y es finalizado con la elaboración de escenarios, presentación de resultados y verificación. Resulta fundamental insistir en que el desarrollo de estos tres modelos no solamente consiste en un paso intermedio para la ejecución del siguiente, sino que conforman modelos completos en sí mismos.

Por último, en el capítulo 7 se presenta el modelo final en el que se integran los tres submodelos desarrollados en los capítulos previos. En este apartado, además de introducir la estructura informática y de interfaz del modelo integrado (como en los casos anteriores), también es donde se presenta la dinámica de ejecución, formas de interacción, ritmo de cambio y condiciones de saltos de un submodelo hacia el otro con vistas a generar diferentes escenarios de evolución del sistema de crecimiento urbano como un todo.

El tercer y último bloque, no menos importante, está dedicado a las *Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación*, y presenta los principales hallazgos de este trabajo, así como sus limitaciones. Por supuesto, al derivarse de un trabajo tan exhaustivo, estas limitaciones son valiosas científicamente, pues abren nuevas oportunidades de investigación que pueden generar posibilidades de dar continuidad al trabajo presentado.

Finalmente, en el apartado de anexos se encuentra la documentación que complementa algunos fragmentos expuestos a lo largo de la tesis. En el Anexo 1 se ha añadido el protocolo estándar que describe en detalle la arquitectura del modelo y su funcionamiento. El Anexo 2 presenta parcialmente el código de la programación informática del modelo integrado, mostrando su estructura y cómo está planteada su secuencia de ejecución. Por último, y con carácter meramente informativo, el Anexo 3 está dedicado a la compilación de los artículos científicos más significativos resultantes de esta investigación, cuyo listado completo de las referencias se presenta a continuación.

PUBLICACIONES RESULTANTES DE ESTA INVESTIGACIÓN

A continuación, se presenta un listado de la producción científica resultante del desarrollo de esta investigación. Otros documentos publicados por la autora, así como información adicional sobre sus actividades profesionales, se pueden encontrar en su página web personal[3].

Aguilera Benavente, F.; Gómez Delgado, M. y **Cantergiani, C.C.** (2010) "Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano". *Ciudad y Territorio-Estudios Territoriales*, nº42 (165-166), pp. 481-195.

Cantergiani, C.C. (2011) "Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica". *Serie Geográfica*, nº17, pp. 29-43. ISSN 1136-5277 (Disponible en: http://dspace.uah.es/dspace/handle/10017/14343, último acceso: abril/2017)*

Cantergiani, C.C. (2011) "Identificación de componentes espaciales en un Modelo Basado en Agentes". En: *Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Cities and Territories,* pp. 65-69. Universidad de Coimbra. Lisboa, Portugal. ISBN 978-972-96524-6-2

[3] www.carolcanter.weebly.com (último acceso: abril/2017).

Cantergiani, C.C. (2013) "El uso de los Modelos Basados en Agentes para simulación del crecimiento urbano". En: Tejedor, C.; Pascual, F.J.; Ros, G.; Guerrero, A.; Aguado, J. y Hidalgo, M.Á. *Cuartas Jornadas de Jóvenes Investigadores de la Universidad de Alcalá*, pp. 357-361.

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2014): "Desarrollo de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano: Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable", *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica (Teledetección y SIG en los estudios de paisaje y medio ambiente),* Universidad de Alicante, 25-27 junio 2014. (Disponible en: http://congresotig.ua.es/index.php/tig/tig2014/paper/view/12/92, último acceso: abril/2017)*

Cantergiani, C.C.; Barros, J. y Gómez Delgado, M. (2014). "How real estate agents behavior affects urban growth: an Agent-Based Model approach". En: Miguel, F.J., Amblard, F., Barceló y Madella (Eds.) *Advances in Computational Social Science and Social Simulation.* Proceedings of the Social Simulation Conference. Barcelona, Cataluña (España), Septiembre 1-5 septiembre 2014. (Disponible en: http://ddd.uab.cat/record/125597, último acceso: abril/2017)*

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2016). "Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid)". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 70, pp. 259-283. (Disponible en: http://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/2236/2124, último acceso: abril/2017)*

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2016): "Desarrollo de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano: submodelo de ocupación residencial". *XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica (Aplicaciones de las TIG para el desarrollo económico sostenible).* Málaga, 29-30 junio/01 julio 2016. (Disponible en: https://drive.google.com/open?id=0B5A4B7gZ8NU-MW5uRWlscFpwWU0, último acceso: abril/2017)*

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (*en revisión*) "A prototype of an Agent-Based Model of Urban Growth: simulating Urban Planners' and Housing Developers' behavior". *Computers, Environment and Urban Systems*.

* Artículos científicos adjuntos (Anexo 3)

MARCO DE REFERENCIA Y MODELO CONCEPTUAL

CAPÍTULO 1.

MODELOS BASADOS EN AGENTES PARA LA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

1. Introducción

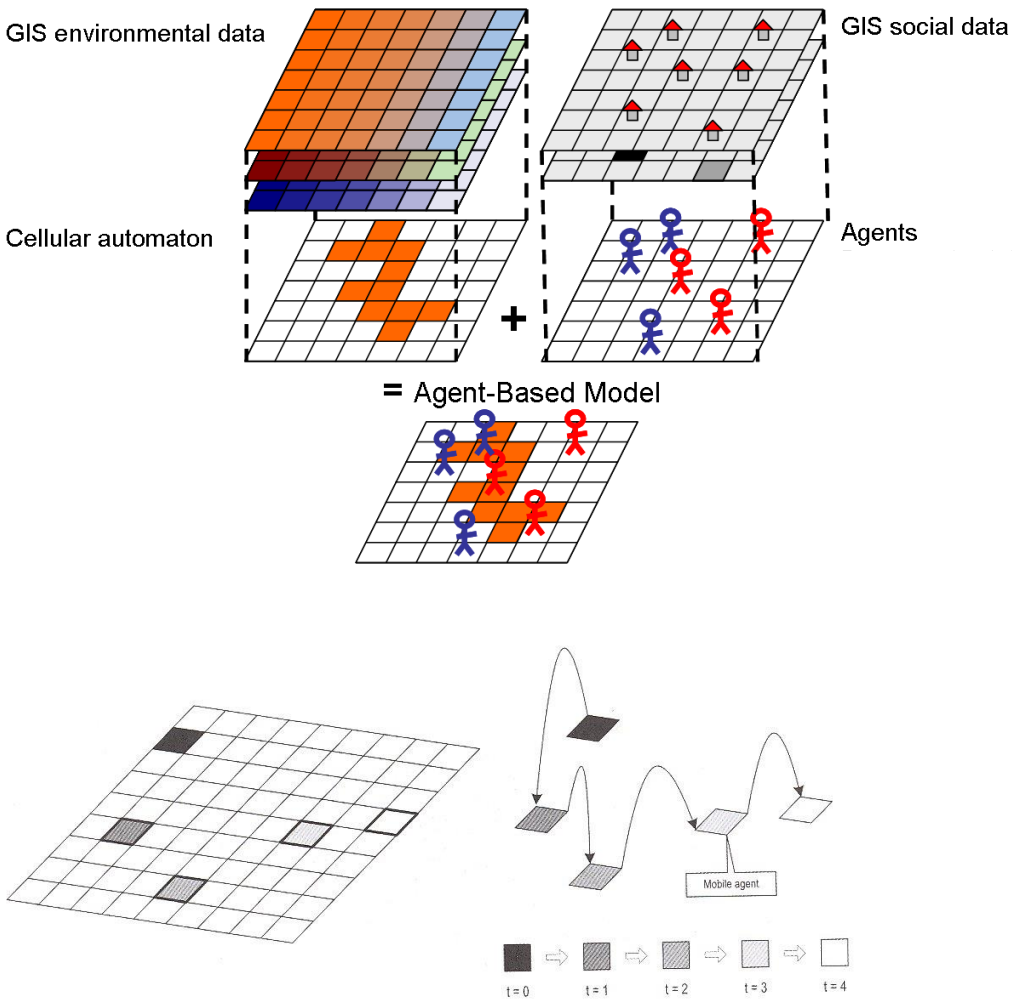
Los procesos urbanos son fenómenos de gran relevancia en la coyuntura actual de desarrollo territorial en el mundo. Su complejidad reside, principalmente, en el intento de controlar su expansión y buscar un equilibrio entre las relaciones territoriales y las ambientales, culturales, sociales, económicas, etc. Para ello, es necesario conocer los procesos que inducen estas dinámicas. No obstante, es en ese punto donde se presenta la principal dificultad para llegar a conclusiones precisas sobre fenómenos urbanos, ya que el conocimiento necesario sobre tales dinámicas resulta ser bastante aproximado y muy complejo (Balducci y Fedeli, 2008, Brandão Estêvão, 2015).

Entre las muchas formas disponibles para intentar comprender las dinámicas urbanas y los procesos territoriales, destacan los modelos espaciales, que de alguna manera representan el territorio y permiten estudiar algunos procesos, aproximándonos al entendimiento de los cambios observados entre el pasado y el presente, o incluso permitiendo proyectar otros hacia el futuro (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008, Carsjens, 2009, Hansen, 2010, Santé *et al.*, 2010).

Entre el conjunto de modelos de simulación de cambios de usos de suelo y crecimiento urbano más avanzados en la actualidad (y también entre los más complejos), se encuentran los Modelos Basados en Agentes (*Agent-Based Models*), o MBA. Como se verá más adelante, se trata de un modelo híbrido que abarca algunas características de los modelos celulares, pero también pueden incorporar propiedades de modelos de dinámicas de sistemas, estadísticos o de flujos económicos.

De forma general, aunque los modelos celulares se introdujeron ya en los años 60, siguen siendo actualmente muy utilizados, y su evolución a lo largo de estos años ha generado una nueva visión de la simulación (Benenson y Torrens, 2004, Batty, 2005) que se ha traducido en el desarrollo de una multitud de herramientas para este fin (White *et al.*, 1997, López *et al.*, 2001, Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005, Paegelow y Camacho Olmedo, 2008, Aguilera Benavente *et al.*, 2010b, Plata Rocha *et al.*, 2011, Triantakonstantis y Mountrakis, 2012). Quizás los modelos celulares más conocidos en las ciencias sociales, por su amplia aplicación a estudios espaciales, sean los modelos basados en Autómatas Celulares (AC).

Los AC son, en cierta forma, el fundamento de los mencionados MBA, que igualmente presentan un elevado potencial de simulación urbana y alta capacidad de modelación. Aunque ambos partan de la misma estructura (celular), se basen en reglas de decisión y sean modelos altamente dinámicos, los MBA están poco a poco ocupando un vacío dejado por los AC al agregar agentes en su configuración, así como permitir su movilidad (figura 1.1). A través de estos agentes, los MBA incorporan un aspecto de comportamiento, teniendo en cuenta su estado y características propias, la percepción de su entorno, así como sus propios intereses, reflejados en una serie de reglas de decisión que les inducen a alcanzar un objetivo concreto. A su vez, estos agentes son los actores responsables de promover los cambios que se pretenden simular. Las características de algunos de los agentes como la intuición, el aprendizaje o la deducción, no se consideran en los mencionados AC (Cantergiani, 2011b). Además, es un modelo que permite a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009), o entender cómo el propio sistema afecta al individuo (Grimm y Railsback, 2005).



Fuente: (Benenson y Torrens, 2004, Rebaudo *et al.*, 2011).

Figura 1.1. Representación esquemática de la estructura de un modelo basado en agentes.

Los MBA tienen un amplio rango de aplicaciones; además de la ecología, otras disciplinas tratan sistemas complejos compuestos de entidades autónomas, incluyendo las ciencias sociales, economía, demografía, geografía y ciencias políticas (es posible encontrar un número importante de ejemplos en Grimm *et al.* (2006)). Coincidimos con O'Sullivan y Haklay (2000), que mencionan que los geógrafos y los planificadores están bien posicionados en el campo de investigación de MBA, tanto en el plano teórico como en el práctico, contribuyendo principalmente al desarrollo y aplicación de los aspectos espaciales de estos modelos.

Sin embargo, las aplicaciones en el ámbito urbano están todavía poco exploradas si consideramos su elevado potencial de modelización. Dada la escasa literatura que existe sobre estos modelos hoy día en español, los productos científicos resultantes de la presente investigación (publicados en castellano) pretenden también aportar a la comunidad hispana un mayor conocimiento sobre los MBA y fomentar su investigación y desarrollo.

A continuación se presentan los principales conceptos y características de un MBA, abarcando sus componentes, estructura y funcionamiento, partiendo de la literatura existente y de reflexiones propias. Destacamos que su aplicación ofrece muchas posibilidades para simular la expansión urbana, tema objeto de interés de esta tesis.

2. Modelos Basados en Agentes aplicados al crecimiento urbano

2.1. Características generales de un Modelo Basado en Agentes

Los MBA, en su concepto general, surgen en la década de los años 60, época de exploración de modelos de simulación territoriales, y más concretamente en el seno de las ciencias de la computación y ligados a la investigación de la inteligencia artificial de los años 70. Sin embargo, en este momento la atención se centró en otro tipo de modelos, principalmente debido a las todavía escasas capacidades informáticas y un escepticismo generalizado en cuanto a simulaciones espaciales. Así, este y otros modelos no fueron ampliamente desarrollados hasta muchos años después. A lo largo de las décadas de los 80 y 90, se redescubrieron los modelos individualistas y de pensamiento – en contraposición con el enfoque estructuralista y Marxista del período anterior (O'Sullivan y Haklay, 2000). En este momento se desarrollaron numerosos modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, aunque en su mayoría con perfiles prácticamente estáticos y con énfasis principalmente en la transición de estado entre celdas vecinas, abarcando la micro-simulación, las redes neuronales y los AC. A partir de los 90, inmersos ya en la sociedad del conocimiento y de la información (Castells, 1996, 1997, 1998[4]), los MBA ganaron popularidad en las ciencias sociales, en el intento de reproducir aspectos espaciales y demográficos para la mejor comprensión de la evolución de la sociedad. En la última década la oleada de estudios de modelos basados en agentes se ha fortalecido, y con ella muchas plataformas y grupos de investigación dedicados a estos temas.

Como se ha mencionado, la simulación basada en modelos celulares, entre ellos los MBA y los AC, ha generado una nueva visión de la modelación. La introducción de los modelos celulares tiene su origen en los estudios de Von Neumann y Ulam, ambos matemáticos que investigaban las celdas y sus relaciones de vecindad. A partir de su trabajo, estos modelos evolucionaron, dando lugar a los autómatas celulares, cuya principal representación se plasma en el Juego de la Vida de Conway. Este modelo sencillo funciona de forma que, a partir de una secuencia de celdas, con un estado determinado, unas reglas de transición y en función del comportamiento respecto a la vecindad inmediata, cada unidad se comporta dinámicamente

[4] Citado en O´Sullivan y Haklay (O'Sullivan y Haklay, 2000).

cambiando su estado inicial y conformando patrones espaciales. Entre otros muchos documentos, se encuentran numerosas revisiones sobre el tema (Couclelis, 1997, Wagner, 1997, White, 1998, Norte Pinto, 2007b, Santé *et al.*, 2010, Norte Pinto *et al.*, 2012).

Estos modelos evolucionaron (y siguen evolucionando) hacia otros tipos que incorporan nuevos desafíos en cuanto a la modelación. Es el caso de los MBA, que reúnen aspectos de movilidad, comportamiento e interacciones entre agentes y el entorno. Respecto a su utilización en las ciencias sociales, destaca uno de los primeros modelos – la *Segregación en la Ciudad* –, desarrollado por Thomas Schelling en la década de los 70 (1971). Dicho modelo demuestra cómo la segregación puede emerger de elecciones individuales, aun cuando todos los individuos sean razonablemente tolerantes.

Entre los primeros modelos multi-agentes merece también especial atención el *Sugarscape* desarrollado por Epstein y Axtell (1996) a mediados de los 90 para estudios de fenómenos sociales. Este es un buen ejemplo de MBA que, aunque cuente con agentes relativamente simples (hormigas), produce un rango de resultados interesantes sobre la emergencia de redes sociales, comercio y mercados, y diferenciación cultural y evolución del volumen de agentes. El *Sugarscape* modela una sociedad artificial donde los agentes se mueven en una malla regular, y donde cada celda dispone de una cantidad de `azúcar´ que se renueva gradualmente, y con la que, además, los agentes ubicados en dichas celdas pueden alimentarse. Sin embargo, las cantidades de esta componente varían espacialmente en cada localización y de acuerdo a la cantidad de azúcar ingerida previamente. Los agentes tienen como objetivo sobrevivir y para ello han de moverse en búsqueda de más alimento. Si cosechan más azúcar de lo que pueden comer inmediatamente, pueden guardar para más adelante o, en variaciones más complejas y sofisticadas del modelo, pueden comerciar con otros agentes (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Nigel Gilbert sería otra referencia importante por revolucionar este campo de estudio y proporcionar la difusión de MBA a través de sus libros *Social Simulation: Simulation for the Social Scientist* (Gilbert y Troitzsch, 2005) y *Agent-based Models* (Gilbert, 2008), así como por la creación del *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS),* referencia mundial actualmente en temas de simulación en ciencias sociales.

2.1.1. Estructura básica de un Modelo Basado en Agentes

El principal elemento de un MBA, y como su propio nombre indica, son los agentes; pero también lo es el entorno en el que se ubican, así como la relación entre estos agentes, o entre ellos y su entorno, plasmados a través de reglas de comportamiento. En este apartado se presentan algunos de los principales conceptos de cada componente de los MBA, cómo funcionan e interactúan estos elementos y cuál es su rol dentro del modelo.

Aunque pueda resultar sencillo visualizar un agente y comprenderlo dentro del contexto de los modelos de simulación, conceptualizarlo es un tema bastante complejo. Muchos investigadores han presentado distintas definiciones, sin llegar todavía a un consenso de cómo definir un agente. Algunos modeladores consideran que un agente puede ser cualquier tipo de componente independiente (ej. programa, modelo, individuo, etc.); otros insisten en que su comportamiento debe ser adaptativo para que sea considerado un agente, refiriéndose a aquellos componentes que pueden, de alguna forma, aprender de su entorno y cambiar su conducta conforme a éstos (Castle y Crooks, 2006). En ese segundo grupo se encuentra Gilbert, que considera que el objetivo del diseño de un agente es crear programas que interactúan de forma `inteligente´ con su entorno (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Ciertamente la `inteligencia´ es un elemento común en todas las concepciones de agentes, pero también lo es su rol en el modelo en cuanto a su comportamiento y su relación con otros agentes y su entorno. Así, para Batty (2005), los agentes son objetos que no tienen ubicación fija, pero que actúan e interactúan uno con el otro, así como con el entorno sobre el cual se desarrollan, de acuerdo a un determinado propósito.

De todas formas, estas y otras características son comunes a los agentes que protagonizan los MBA, y en las cuales, con pequeñas variaciones, coinciden la mayoría de los modeladores (Wooldridge y Jennings, 1995, Franklin y Graesser, 1996, Epstein, 1999, Macal y North, 2005, Torrens y Benenson, 2005, Crooks y Heppenstall, 2012). A continuación se presenta una serie de características que deben poseer los agentes, a partir de la compilación y conclusiones de estos autores:

- **Autónomo**: gobierna sin influencia de control centralizado, es capaz de procesar información e intercambiarla con otros agentes para tomar decisiones independientes;
- **Heterogéneo**: no existe un individuo `medio´, aunque pueden existir grupos de agentes que se generan desde abajo hacia arriba (fenómeno *bottom-up*), resultando una fusión de individuos autónomos similares;
- **Activo**: ejerce influencia independiente en una simulación. Aun así, puede ser activo de las siguientes formas:
  - proactivo/orientado a metas (reacciona según un objetivo a alcanzar), reactivo/perceptivo (percibe su alrededor y otros elementos);
  - racional limitado (capacidad de solucionar problemas por deducción para mejorar su situación, aunque con percepción limitada);
  - interactivo/comunicativo (se comunica con otros agentes)
  - móvil (pueden recorrer el espacio en un modelo);
  - adaptativo (puede cambiar su estado dependiendo de su estado actual, adaptándolo a partir de una forma de memoria o aprendizaje).

Además, los agentes, cuando representan personas, transmiten la naturaleza propositiva de las actividades humanas, atribuyéndoles con frecuencia cierto grado de intencionalidad (creencia, motivos, emociones, etc.), libre arbitrio y poder para alcanzar sus propios objetivos (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Finalmente, Franklin y Graesser (1996) formalizan la definición de agente autónomo como "un sistema situado en un entorno del que forma parte, el cual lo siente y sobre el que actúa a lo largo del tiempo en función de su propio interés, y así lograr lo que pretende en el futuro".

Por otro lado, y no menos importante, el **entorno** sobre el cual se sitúan los agentes tiene especial relevancia en los MBA, ya que define el espacio en que estos operan, sirviendo de soporte a su interacción con ese entorno y otros agentes (Castle y Crooks, 2006). Según Epstein (1996), el entorno es un elemento técnicamente separado de los agentes, en el cual éstos operan y con el cual ellos interactúan. Sin embargo, el entorno también puede actuar como un agente más, cuyos cambios de estado – como es el caso de los usos del suelo, por ejemplo – se producen según factores externos o dinámica interna. En el caso de estudios territoriales el entorno se plasma a través de una base con información geográfica, y es comúnmente considerado como el **espacio geográfico** sobre el cual actúan los agentes, aunque tengan su información asociada y cambien de estado según sus propias reglas de comportamiento.

Los agentes en un MBA interactúan entre ellos, y con el entorno, a partir de unas **reglas de transición**, en función de su comportamiento, su estado y sus intereses. Conforme señala Epstein y Axtell (1996), las reglas que motivan el comportamiento de los agentes se plasman en las variaciones de relaciones entre los agentes y el entorno. Aquellas relaciones *agente-entorno* determinan el movimiento; las reglas *entorno-entorno* pueden definirse a través de procesos de autómatas celulares, considerando la vecindad; y finalmente las *agente-agente*, pueden ser clasificadas de acoplamiento, combate o negociación, por ejemplo.

Al entender qué son los agentes, cómo pueden interactuar con otros agentes y con su entorno, y qué determinan las reglas de comportamiento, resulta más fácil comprender el concepto de **Modelos Basados en Agentes**. En primer lugar, la mayoría de los autores está de acuerdo en que los MBA están compuestos de múltiples agentes interactivos ubicados en un entorno simulado o modelado. En estos modelos, es necesario especificar una relación entre agentes, conectándoles unos a los otros y/o con otras entidades del sistema, y cuyas características se definen en función de sus percepciones del exterior y del estado de su conocimiento, con el objetivo de alcanzar sus propios intereses. Estas relaciones pueden ser definidas de varias formas, desde una reacción simple hasta aquellas orientadas a metas (dependiendo del tipo de agente y sus características). Independiente del tipo de agentes que componen el modelo, estas relaciones también se pueden clasificar según su dinámica temporal, sincronizada o descompasada (Ferber, 1999, Aguilera Ontiveros, 2000, Axelrod, 2005, Castle y Crooks, 2006), influyendo en la dinámica del sistema y quizás también en los resultados.

Técnicamente, el término Modelos Basados en Agentes se refiere al uso de métodos computacionales para investigar procesos y problemas que se consideran sistemas dinámicos de agentes interactivos (Smith *et al.*, 2009). Respecto al término MBA, existe toda una variedad de acrónimos en la literatura, y que en la mayoría de los casos tienen idéntico significado o aluden a conceptos bastante similares. Así, encontramos denominaciones tan variadas como *Agent-Based Computational Modelling (ABCM), Agent-Based Social Simulation (ABSS), Agent-Based Computation Simulation (ABCS), Agent-Based Modelling and Simulation (MBAS), Individual-Based Models (IBM),* este último más utilizado en ecología.

Quizás merecería la pena destacar el término Sistemas Multi-Agentes – SMA (o *Multi-Agent Systems - MAS),* porque se confunden mucho con los MBA y no coinciden del todo en su concepto. El campo de los MAS (apenas aplicado a las ciencias sociales) es bastante reconocido en investigaciones basadas en Inteligencia Artificial y, aunque los MBA también presenten raíces en ese campo, no están limitados al diseño y comprensión de agentes artificiales. Los MAS no son modelos como tal, sino sistemas creados para la resolución de problemas, donde los agentes aprenden nuevas formas de alcanzar su objetivo (O'Sullivan y Haklay, 2000). Por lo tanto, la diferencia entre estos dos modelos va más allá de una forma diferente de denominarlos (información detallada en Conte *et al.*, 1998[5]).

2.1.2. Comprobación de los Modelos Basados en Agentes

Por definición, un modelo es una versión simplificada de parte de la realidad, y por ello sabemos que ningún modelo puede representarla fielmente. No obstante aquellos modelos descriptivos y detallados pueden ser útiles para el aprendizaje sobre el funcionamiento del sistema, así como pueden producir un salto cualitativo para el mejor entendimiento del sistema el cual pretende modelar (Bharathy y Silverman, 2013).

Una vez desarrollado, todo programa computacional debería ser comprobado para saber si el modelo está correctamente construido e implementado y si se comporta conforme lo esperado. Junto con el comportamiento de los agentes, conocer la precisión en cuanto a los resultados de estos modelos de simulación está entre los desafíos – y a su vez también entre las críticas –, más importantes apuntados por los investigadores (Crooks *et al.*, 2008, Ligtenberg *et al.*, 2010, Heppenstall *et al.*, 2012, Truong *et al.*, 2014, Heppenstall *et al.*, 2016), y según la mayoría, es donde reside uno de los principales obstáculos para que los MBA sean modelos más

[5] Citado en Castle y Crooks ((Castle y Crooks, 2006)).

ampliamente difundidos y aceptados. Sin embargo, en el mundo científico es evidente el alto interés por encontrar fórmulas de comprobar un MBA, cuya constatación está respaldada por los numerosos artículos publicados en los últimos años tratando este tema (un amplio listado se encuentra disponible en la página web de Tesfatsion[6]). Aun así, es cierto que no existe la estrategia one size fits all (esto es, a todo aplicable), ya que los MBA suelen ser muy diferentes entre sí, variando temas, entidades, escalas y objetivos (Heppenstall *et al.*, 2016).

En términos generales, podemos afirmar que existen algunos tipos de procesos importantes a considerar al tratarse de un modelo de simulación celular, como los son la calibración, la validación o la verificación (Donigian, 2002, Ngo y See, 2012, Truong *et al.*, 2014, Lee *et al.*, 2015). Sus diferencias aunque parezcan sutiles, hacen referencia a objetivos diferentes en cuanto a sus contextos, hecho maximizado por los diversos términos y matizaciones encontradas en la literatura (Bharathy y Silverman (2013) destinan un capítulo a esta revisión). Mencionaremos a continuación las principales características de cada término como lo entendemos y que consideraremos a lo largo de esta investigación.

La calibración consiste en comprobar si la configuración de la estructura y de los valores de los parámetros del modelo reflejan correctamente el mundo real, lo que normalmente requiere datos de procesos a micro-nivel (Castle y Crooks, 2006). Según Truong (2014), es usado para ajustar o estimar factores para datos que no se encuentran disponibles.

Por otro lado, con la validación se pretende asegurar si la estructura del modelo está bien construida (conceptual y operacionalmente), y si su comportamiento corresponde al objetivo para el que fue diseñado (Qureshi *et al.*, 1999, Gilbert y Troitzsch, 2005). Por tanto, se debe considerar un mínimo de precisión en las simulaciones que, en el caso de modelos predictivos y explicativos, se suele realizar a través de la comparación de los resultados obtenidos con datos semejantes del mundo real (Qureshi *et al.*, 1999, Castle y Crooks, 2006). Aquí consideramos abrir un paréntesis para adelantar (ya que se describirá en detalle más adelante en el apartado 4.1) que los MBA son eminentemente exploratorios y, en un principio, no están diseñados para ser modelos predictivos. Por lo tanto, respecto a la validación, en resumen se trata de construir el modelo correcto, comprobando la existencia de similitudes entre el modelo y el fenómeno real (Qureshi *et al.*, 1999, Truong *et al.*, 2014). De todas formas, entendemos que un modelo no puede simplemente clasificarse como válido o no válido, sino que existen distintos grados de validez (Law y Kelton, 1991[7]), y asimismo hay que considerar que los MBA tienen estructuras complejas que lo hacen difícil de validar (Acosta-Michlik *et al.*, 2014).

[6] http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/empvalid.htm (último acceso: abril/2017).

[7] Citados en Castle y Crooks (Castle y Crooks, 2006).

Ambas la calibración y la validación son dos herramientas de control muy discutible para aplicarse sobre un MBA, y su naturaleza compleja las convierten en un importante desafío (Bert *et al.*, 2014). Aunque pueda haber correspondencia entre el resultado del modelo y el mundo real, eso no supone una condición suficiente para concluir que el modelo está correctamente elaborado (Gilbert, 2005). Además, hemos de tener en cuenta que en un MBA se modelan situaciones en base a una serie de variables de entrada que pueden alterarse según un escenario deseado y que posiblemente no existen datos reales con los que comparar los resultados cuando se realizan simulaciones a futuro, así que esta comprobación resulta bastante inverosímil en la mayoría de los casos.

A su vez, a lo que llamaremos *verificación* también se encuentra en la literatura como *validación interna*[8] (Axelrod y Tesfatsion, 2006, Amblard *et al.*, 2007). Consiste en asegurar que el modelo está correctamente desarrollado (Qureshi *et al.*, 1999, Truong *et al.*, 2014), lo que puede ser llevado a cabo a través del análisis de los resultados en distintas situaciones. En general podemos decir que su dificultad reside en que un programador no puede conocer si los resultados inesperados son reflejo de un error en el programa computacional (un *bug*), errores lógicos del modelo, o una consecuencia de una característica emergente del propio modelo (Gilbert y Terna, 2000). Además, hemos de tener en cuenta que la ejecución repetida del modelo puede producir resultados diferentes, lo que complica aún más el proceso de verificación (Gilbert y Troitzsch, 2005).

No obstante, aun siendo escasas las metodologías robustas de comprobación que se pueden utilizar para replicar a los modelos, podemos destacar trabajos que de alguna forma tratan de verificar sus MBA, entre los cuales dedicaremos especial atención a aquellos que lo resuelven a través de análisis de sensibilidad. Esta técnica proporciona información sobre qué variables de entrada tienen mayor influencia en los resultados de los modelos (Gómez-Delgado y Tarantola, 2006).

Vale destacar que estos análisis de sensibilidad son deseables para aportarnos información sobre la robustez de los resultados (Castle y Crooks, 2006), y puede comprobar la estabilidad del modelo y su comportamiento predictivo, chequeando las variaciones de los resultados tras ejecuciones sistemáticas (Qureshi *et al.*, 1999). El objetivo de este proceso es saber hasta qué punto el modelo es sensible a pequeños cambios en los parámetros y condiciones iniciales, permitiendo volver a analizar los resultados después de cambiar sutilmente los datos de entrada (Gilbert y Troitzsch, 2005). Sin embargo, es importante tener en cuenta que los sistemas complejos pueden exhibir cambios bruscos y repentinos en el comportamiento del sistema como resultado de ligeras perturbaciones en los datos de entrada (Manson, 2007).

[8] Por *validación externa* se entendería lo que mencionamos como simplemente *validación*.

Los estudios de análisis de sensibilidad son más frecuentes que la aplicación de otras herramientas de calibración o validación, y son considerados útiles y necesarios cuando se trata de modelos que simulan situaciones futuras que no pueden ser contrastadas con datos reales. Aunque todavía esta práctica no es muy habitual y se trata de un tema todavía pendiente, encontramos ya en la literatura documentos que citan diferentes métodos de aplicarla (Ligmann-Zielinska y Sun, 2010, Lee *et al.*, 2015, ten Broeke *et al.*, 2016). Respecto a su aplicación en MBA con base geográfica e información espacial, destacamos algunos trabajos, como es el caso de Acosta-Michlik (2014), que analiza las variaciones que un modelo de cambios de usos del suelo podría sufrir al variar algunos de los parámetros globales de entrada y de las reglas de decisión de los agentes (en este caso agricultores). También el trabajo de Barros (2012) genera una serie de resultados producto de un análisis de sensibilidad para los distintos módulos de su modelo de periferización. Otros autores ejecutan o versan sobre los análisis de sensibilidad como forma de validar MBA (Magliocca *et al.*, 2014, Thiele *et al.*, 2014, Malik *et al.*, 2015).

Según Broeke (2016), el análisis de sensibilidad aplicado a MBA no es trivial debido a algunas de sus propiedades, tal como pueden ser las interacciones no lineales y de propiedades emergentes. Por lo tanto, estos métodos son identificados por algunos autores (Crooks *et al.*, 2008, Filatova *et al.*, 2013, Thiele *et al.*, 2014) como un desafío clave para los MBA.

Por último, destacar que la creación de diferentes escenarios y la evaluación empírica de los resultados no pueden dejar de ser considerados una forma de verificación del modelo, aunque quizás parcial. Según Qureshi (1999), cuando no se dispone de observaciones del sistema real, una evaluación visual sobre su validad realizada por individuos familiarizados con este sistema puede ser lo único posible. Al considerar diferentes parámetros de entrada al modelo, y al ejecutarlo de forma repetida, la simulación puede mostrar un producto medio con mayor o menor desvío, que se puede tener en cuenta al analizar luego los resultados.

Tras esta revisión respecto a la comprobación de MBA, refrendamos lo mencionado por Heppenstall (2016), haciendo alusión a sus conclusiones que también son las nuestras: "(…) a pesar del intento de valorar de algún modo la mayoría de los modelos, no hay manuales o estándares publicados a los cuales los investigadores puedan recurrir para evaluar un MBA. El tipo de evaluación depende mucho de la naturaleza de la aplicación; no sorprende que no haya consenso sobre cómo se debería verificar, calibrar o validar un modelo."

Vale destacar que el MBA desarrollado en esta investigación, al tratarse un modelo con resultados espaciales, contará con una verificación de cada submodelo y del modelo integrado –que se introducen y presentan al final del correspondiente capítulo –, siguiendo algunos aspectos metodológicos y técnicos encontrados en la literatura. No consideramos en esta etapa la realización de calibración o validación. Así como Barathy y Silverman (2013), para asegurar una evaluación del modelo, tratamos de construir modelos ricos en factores causales que pueden ser examinados para verificar qué es lo que conduce a sus resultados particulares.

3. Aspectos técnicos: protocolo de descripción y plataformas

En cuanto a los aspectos técnicos de los MBA, sus estructuras son más complejas que las de modelos analíticos tradicionales, y como consecuencia, son más difíciles de analizar, entender y comunicar. Además, tampoco están adecuadamente descritos en las publicaciones existentes, o son difíciles de leer, incompletos o ambiguos y por eso, menos accesibles. Eso hace que la mayoría de los modelos publicados no sea fácilmente reproducible (Grimm *et al.*, 2006).

Por esa razón, Grimm y colaboradores (2006) decidieron proponer un protocolo para resolver los principales problemas en cuanto a la descripción de los MBA, al cual llamaron *ODD* (*Overview, Design concepts and Details*). Esta puede ser considerada la primera iniciativa para establecer un protocolo de descripción de un MBA, lo que es un paso prometedor en cuanto a la aplicación de estos modelos a las ciencias sociales y otros campos afines (Polhill, 2010). A lo largo de los últimos años se realizaron una serie de revisiones ampliando o modificando la estructura del protocolo ODD original (Polhill, 2010, Müller *et al.*, 2013). La versión más actualizada incorpora elementos principalmente en cuanto a la toma de decisiones humanas, y la denominan Protocolo ODD+D (*Overview, Design concepts, Details and Human Decision-Making*) (Müller *et al.*, 2013). Asimismo, Polhill (2010) realiza una revisión exhaustiva de las publicaciones disponibles en la plataforma *Web of Science* que mencionaron el protocolo ODD hasta diciembre de 2009, presentando estadísticas respecto a su uso y comprensión de los términos originales, en muchos de ellos malinterpretados.

La estructura original del Protocolo ODD, se divide en tres apartados principales: Vista General, Conceptos de Diseño y Detalles. El primero describe cuestiones generales del modelo y se despliega en tres secciones: su propósito, definición de variables y escala, y el proceso de visualización y cronograma de desarrollo. El apartado de Conceptos de Diseño se describe en una sección única, donde se presenta una serie de conceptos que se podrían discutir en el modelo, como por ejemplo: emergencia, adaptación, predicción, interacciones, entre otros. Por último, la parte de Detalles también se descompone en tres: la forma de inicialización, la información de entrada disponible y los posibles submodelos. Buenos ejemplos de modelos descritos con el protocolo ODD son aquellos publicados por Polhill, como el SLUDGE (Polhill *et al.*, 2008) u otros tres modelos de simulación de cambios en el uso del suelo (Polhill *et al.*, 2008), el MBA para aplicación de análisis de sensibilidad de Broeke (ten Broeke *et al.*, 2016) o el modelo de descripción de decisiones humanas de Müller (Müller *et al.*, 2013).

Habitualmente su descripción se incorpora a las publicaciones en la forma de anexo al final de las mismas, o en otros casos, publicadas en páginas web destinadas a la divulgación de MBA, como lo es el Consorcio de Modelación Basada en Agentes (*Open Agent Based Modeling*

Consortium – CoMSES)[9]. En el caso del modelo propuesto en esta investigación, se hizo un esfuerzo por completar el protocolo con sus especificidades (Anexo 1). Hemos de destacar que, como suele ser habitual por la variedad de modelos existentes, no todos los campos pudieron ser debidamente completados debido a que algunos apartados contienen tópicos que no se contemplan en esta investigación.

Además de la correcta y clara descripción del modelo, también es fundamental conocer la *plataforma* sobre la cual se desarrollan. Los MBA requieren una base informática para asociar los agentes, reglas, relaciones, y permitir la correcta ejecución del modelo. Actualmente existen distintas plataformas sobre las cuales se pueden desarrollar, basadas en diferentes lenguajes de programación, interfaz o sistemas operativos.

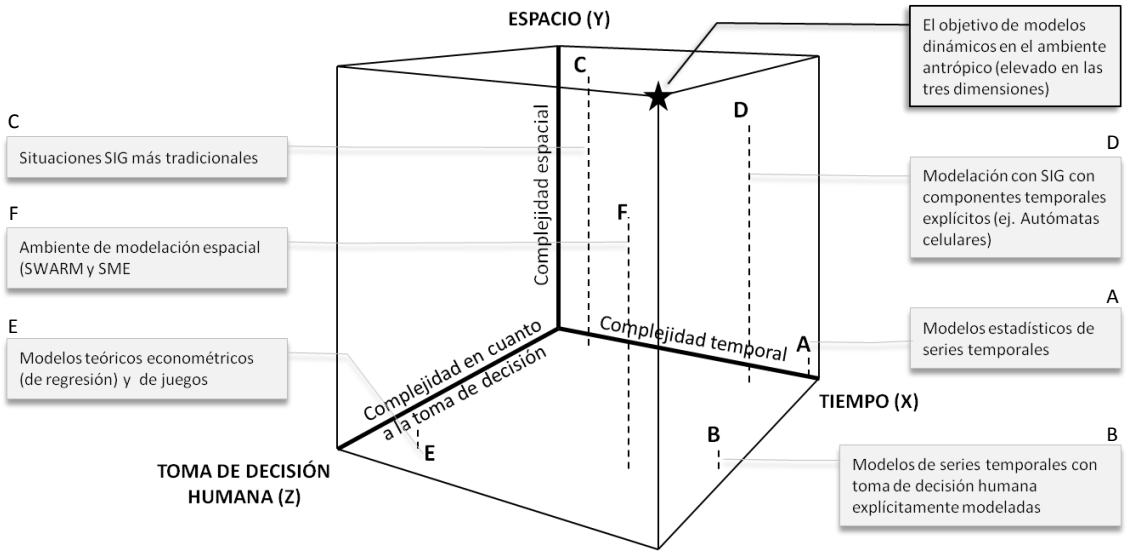
Algunos autores han elaborado estudios donde se analizan los programas según algunas características útiles para apoyar la elección de la plataforma más adecuada, identificando los criterios clave a ser consultados para tomar esa decisión (Parker *et al.*, 2001, Serenko y Detlor, 2002, Tobias y Hofmann, 2004, Castle y Crooks, 2006, Railsback *et al.*, 2006, Smith *et al.*, 2009). Las plataformas más citadas en estas compilaciones son: *SWARM, RePast, NetLogo* y *StarLogo, AgentSheet, OBEUS, MASON, AsCape, AnyLogic, CORMAS*. En su mayoría provén licencia con código abierto, permitiendo a los modeladores iniciar una nueva propuesta sobre el trabajo previo de otros investigadores. Esto minimiza el tiempo y coste en el desarrollo de nuevos modelos (Parker, 2005), lo que, sin duda, siempre resultará enriquecedor desde el punto de vista científico. Sun (2014) muestra un listado con detalles de una selección de las plataformas de modelos basados en agentes más comúnmente utilizados, centrándose principalmente en aquellas sobre las cuales se desarrollan aplicaciones territoriales de cambios en los usos del suelo.

Aunque existan amplias opciones en cuanto a plataformas, Castle y Crooks (2006) resaltan que existe una serie de limitaciones en cuanto al uso de estos sistemas de modelación o simulación. Entre ellos (i) el esfuerzo sustancial para comprender cómo diseñar e implementar un modelo en algunos programas; (ii) la dificultad de comprensión o aplicaciones diferentes del código de programación de modelos producidos por otros investigadores; (iii) la exigencia de tener un conocimiento previo del lenguaje de programación requerido; o (iv) la posible falta de funcionalidades deseadas/requeridas.

Además de las desventajas presentadas, podemos afirmar que la relación entre el poder de simulación de los programas existentes y la dificultad para desarrollarlos suele ser directamente proporcional, principalmente por el alto nivel de complejidad en cuanto al comportamiento humano en modelos (Kennedy, 2012). Según Agarwal y colaboradores (2002), en la modelación, las dos dimensiones básicas que definen un estado inicial sobre el cual los procesos biofísicos y

[9] https://www.openabm.org/comses (último acceso: abril/2017).

humanos acontecen son el tiempo (ejecución a corto o largo plazo) y el espacio (representación espacial de los datos). Pero en los modelos que incorporan procesos humanos, como es el caso de los MBA, aparece una tercera dimensión, presentada como `toma de decisiones humana´ (capacidad en cuanto al tratamiento de procesos de decisión humanos). La complejidad del modelo está en directa relación a las posibles combinaciones de los diferentes niveles que representa en las tres mencionadas dimensiones, donde los valores máximos en cada una indican la mayor complejidad temporal, espacial y en cuanto a la toma de decisiones. El siguiente esquema (figura 1.2) explica los niveles de complejidad de algunos tipos de modelos de estudios de cambios de ocupación del suelo.



Fuente: Adaptado y traducido de Agarwal (2002).

Figura 1.2. Nivel de complejidad de modelos de cambios de usos del suelo según los tres niveles de complejidad.

Según la clasificación presentada, los MBA encajarían en el punto coincidente de los niveles máximos de los tres ejes, con alto nivel de complejidad espacial, temporal y de toma de decisión humana. En este gráfico esquemático de los diferentes tipos de modelos, destacar que en algunos casos se menciona la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son "un conjunto de herramientas (informáticas) que sirve para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetivos" (Burrough, 1986), y en este sentido, son apropiados para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos a fin de aportar información útil para las decisiones territoriales (Tomlinson, 1984). Un desafío bastante destacable en cuanto a la modelación consiste en integrar los SIG con los MBA.

Detalles sobre la compatibilidad de los SIG con la plataforma elegida se presentará más adelante en el capítulo 2. Adelantamos que, de forma general, ambos pueden estar vinculados de diferentes formas y a diferentes niveles. Los modelos pueden leer los datos espaciales del mundo real a través de un SIG o también potencialmente publicar resultados en un formato legible por éste. Si las funcionalidades SIG son solicitadas en tiempo de ejecución, se pueden crear modelos integrados, que pueden ser: (i) programas SIG y MBA independientes que se comunican vía archivos independientes; (ii) modelos que utilizan programas independientes pero que se comunican a través de base de datos compartidas o memoria virtual y; (iii) modelos *stand-alone* que implementan funcionalidades SIG dentro del propio modelo MBA (Parker, 2005). De todas formas, pocos MBA poseen una interacción completa entre el proceso de simulación y la representación en un SIG. Entre ellos un modelo que destaca en cuanto al desarrollo de herramientas que permitan esa conexión es el LUXE (*Land Use in an eXurban Environment*), que usa la plataforma *RePast Symphony* con el apoyo de SIG (a través de la extensión *Agent Analyst* de ArcGIS) (Sun *et al.*, 2014)[10].

4. Aplicación de Modelos Basados en Agentes a estudios urbanos

La simulación en las ciencias sociales se ha visto influenciada de forma significativa por el desarrollo de la teoría de los AC (en la física y matemática) y de la ciencia de la computación (inteligencia artificial distribuida y tecnología de agentes) (Gilbert y Troitzsch, 2005). En el caso de simulaciones aplicadas a fenómenos urbanos, las capacidades de ambos se pueden unir para así disponer de una poderosa herramienta de modelación, como son los MBA creados para simular el crecimiento urbano.

A lo largo de este apartado se introducen diferentes tipos de escenarios y sus aplicaciones con relación a estudios de fenómenos urbanos, así como las ventajas y desventajas de los MBA aplicados a este ámbito. Por último, se presenta de forma breve las experiencias existentes más afines a esta investigación.

4.1. Tipos de escenarios de simulación urbana

En general, los modelos utilizados en simulaciones urbanas suelen producir diferentes tipos de análisis y escenarios prospectivos, que pueden ser desagrupados en predictivos (carácter descriptivo), exploratorios (carácter explicativos), o en algunos casos, normativos (deseado)

[10] Para conocer más sobre el modelo LUXE e información asociada, ver http://www.openabm.org/model/3942/version/2/view (último acceso: abril/2017).

(Parker *et al.*, 2001, Aguilera Benavente *et al.*, 2010a). Para atender a los diferentes enfoques de estos tres grupos de escenarios, se pueden utilizar distintos tipos de modelos de simulación según la orientación deseada.

En la literatura encontramos algunas clasificaciones de escenarios de simulación según el tipo de resultado que se pretenda obtener. Partimos de la suposición de que los escenarios de simulación de crecimiento urbano son, en principio, prospectivos, correspondiendo generalmente con situaciones futuras probables, posibles o deseables. No obstante, en la tabla 1.1 se resumen algunas características de los tres grupos, compilados a partir de trabajos de varios modeladores.

Escenario	*Predictivos*	*Exploratorios*	*Normativos*
Pregunta	¿Qué pasará?	¿Qué puede pasar?	¿Qué debería pasar?
Escenarios futuros	Probable	Posible	Imaginario
Carácter	Descriptivo	Explicativo	Deseado
Objetivos	▪ Extrapolar tendencias ▪ Evaluar escenarios ▪ Predecir estados futuros ▪ Imitar el mundo real	▪ Explorar teorías ▪ Generar hipótesis ▪ Probar hipótesis	▪ Discutir metas deseables ▪ Imaginar el futuro ideal
Tipo	Pronóstico o *`what if?´*	Externos o estratégicos	De optimización o de transformación
Respuesta a la pregunta…	¿Qué sucedería si…?	¿Qué puede suceder…?	¿Cómo puedo alcanzar un objetivo concreto?
Énfasis	Resultados y validez	Decisiones a tomar	Planteamiento de transformaciones necesarias
Resultados	No hay control, hay la expectativa de que se cumplan las predicciones	Control parcial	Control total
Modelos más comúnmente utilizados	Modelos Basados en Agentes (solamente para tipo *`what if?´*, ya que los escenarios predictivos no suelen utilizar en simulaciones urbanas debido a su complejidad)	Modelos Basados en Agentes, Autómatas Celulares, Regresión logística	Autómatas Celulares, Evaluación Multi-criterio

Tabla 1.1. Resumen de las características de los distintos tipos de modelos prospectivos de simulación urbana, compilado a partir de (Börjeson *et al.*, 2005, Aguilera Benavente *et al.*, 2010a, Gómez Delgado y Rodríguez Espinosa, 2012).

El primer grupo representa escenarios probables, que tienen como objetivo conocer lo que es probable que suceda en un plazo de tiempo generalmente corto (Aguilera Benavente *et al.*, 2010a). Por ello, se entiende que los escenarios puramente predictivos no son adecuados para estudios urbanos, principalmente debido a la gran complejidad de este fenómeno y la dinámica acelerada de los cambios producidos en ese ámbito (Berdoulay, 2009). Por otro lado, hay una ramificación de los escenarios predictivos que se basan en las técnicas *`what if?`* (¿qué

sucedería?), y estos tienen aplicaciones más apropiadas a estudios urbanos, ya que generan escenarios futuros definidos en función de la presencia u ocurrencia de ciertas acciones o eventos relevantes (Börjeson *et al.*, 2005). Este grupo hace énfasis, principalmente, en los resultados y validez del modelo.

El segundo grupo, de escenarios exploratorios, muestra evoluciones posibles de crecimiento, y contesta a la pregunta ¿qué puede pasar?. Los dos ramos de este grupo son escenarios externos y estratégicos (Börjeson *et al.*, 2005). Mientras el primero se centra en las evoluciones de los sistemas como consecuencia de factores que escapan al campo de acción del planificador, como son los aspectos globales, económicos, etc. (Aguilera Benavente *et al.*, 2010a), los estratégicos describen una serie de posibles consecuencias en base a decisiones estratégicas. El principal enfoque de los escenarios exploratorios se centra en las decisiones a tomar.

Por último, los escenarios normativos consisten en generar escenarios óptimos según metas deseables. Este grupo responde a la pregunta ¿qué debería pasar?, y su enfoque está principalmente en el planteamiento de las transformaciones necesarias para alcanzar un estado determinado.

Por lo tanto, los tres grupos de escenarios, predictivos, exploratorios y normativos, tienen enfoques distintos y algunos modelos son más comúnmente usados en una u otra orientación. En el caso de los MBA, concretamente en aplicaciones urbanas, pueden encajar en uno o más de los enfoques presentados. Se consideran como un laboratorio en miniatura, donde los atributos y el comportamiento de los agentes y el entorno sobre el cual se establecen pueden ser alterados, y sus repercusiones pueden ser observadas a lo largo de la ejecución de varias simulaciones (Castle y Crooks, 2006). De esta forma encajarían en los escenarios de tipo `*what if?*`, por tratarse de un modelo que sirve, no solo para extrapolar tendencias, sino también para visualizar las probables modificaciones en el territorio a partir de cambios en las variables iniciales. Por otro lado, los MBA podrían utilizarse en el contexto de escenarios exploratorios estratégicos, por su capacidad para permitir plantear cómo sería la realidad bajo determinadas circunstancias, aunque no pretenda reproducir sistemas actuales (Parker *et al.*, 2003). En ambos casos, los resultados estarían enfocados en producir distintos futuros posibles. Los MBA en principio no encajarían en el enfoque de modelos normativos, por no plantear modelar los comportamientos de los agentes para inducir un determinado resultado deseable, ya que quizás no se podría asegurar cómo evolucionarán sus decisiones y su entorno. Es cierto que hay trabajos que, aunque no traten modelos normativos como tal, consideran agentes normativos en su concepción, es decir, cuyo comportamiento está gobernado por unas reglas que mezclan conceptos de norma con control social (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010, Hollander y Wu, 2011). La capacidad de identificar reglas para observar como los agentes toman sus decisiones es el mayor potencial de este tipo de modelos.

4.2. Potencialidades y deficiencias de los MBA

En el contexto de los modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, y más concretamente a los temas urbanos, los MBA son considerados modelos bastante útiles. Sus principales características son la posibilidad de considerar el comportamiento de los agentes al estudiar los cambios territoriales; permitir su movimiento libre en el área de estudio, no estando restringidos a una vecindad inmediata (y además, algunas veces los agentes pueden incluso ser entidades no espaciales); y la capacidad de capturar fenómenos emergentes, que reflejen el comportamiento individual en la aparición de patrones espaciales. Algunos autores consideran los MBA modelos idóneos para trabajar con fenómenos complejos (como las dinámicas urbanas) debido a la relativa facilidad que estos presentan para incorporar algunas de sus características, como auto-organización, caos, adaptación, entre otras (Bonabeau, 2002b, Gilbert, 2005).

De todas formas, los fenómenos complejos poseen algunas características que los hacen difíciles de modelar. La principal de ellas es la emergencia, que se caracteriza por patrones macroscópicos que surgen a partir de interacciones locales de entidades individuales (Epstein y Axtell, 1996). Los MBA son capaces de capturar estos fenómenos, pero también son bastante sensibles a las condiciones iniciales del sistema y a pequeñas variaciones en las reglas de interacción (Couclelis, 2001), resultando difícil la reproducción de productos idénticos a partir de la ejecución del mismo modelo.

Además de la capacidad de capturar fenómenos emergentes, otra de las principales ventajas que los MBA ofrecen en cuanto a las simulaciones espaciales, es que éstas se benefician de la movilidad que ofrecen. La movilidad de los agentes hace del MBA muy flexible en términos de utilización de variables y parámetros potenciales que pueden ser incluidos en el modelo. La implementación de las interacciones entre los agentes puede ser fácilmente gestionada según el espacio, redes o una combinación de estructuras. Los MBA pueden regular comportamientos basados en interacciones en una distancia y dirección específicas. Estos modelos disponen de un marco robusto y flexible para sintonizar la complejidad de los agentes (por ejemplo, su comportamiento, grado de racionalidad, habilidad de aprender y evolucionar, y la existencia de reglas de interacción). Sin embargo, es evidente que a pesar de las múltiples ventajas de los MBA, estos modelos también presentan limitaciones metodológicas y técnicas.

Es sabido que cada simulación está modelada de forma que responda a las necesidades particulares y los intereses del modelador o exigencia del usuario final, y lo mismo sucede con los MBA. Por su planteamiento inicial en cuanto a la selección de agentes, entorno y reglas de interacción, pero principalmente por los factores subjetivos a ellos vinculados, estos modelos son difícilmente replicables en otras áreas de estudio de forma directa, salvo con adaptaciones correspondientes. Por otro lado, entre las principales limitaciones técnicas, destacamos que, por definición, los MBA consideran sistemas a un nivel de detalle que normalmente involucra la

descripción de atributos y comportamientos de muchos agentes y sus interacciones con el entorno (Castle y Crooks, 2006), en contraposición al principio *KISS* (*Keep It Short and Simple*), que apoya la elaboración y diseño de modelos sencillos y de fácil comprensión. Según Axelrod (2005), la simplicidad es un factor positivo en el desarrollo de los MBA y su complejidad intrínseca no debiera encontrarse en las hipótesis del modelo, sino en los resultados simulados.

Se reconoce que cada vez se están desarrollando más investigaciones con aplicaciones de MBA en estudios en el ámbito urbano, aun teniendo en cuenta sus limitaciones. Las potencialidades que presentan, en contraposición a las deficiencias que se puedan identificar, los hacen bastante adecuados para estudiar el comportamiento de los agentes y los cambios territoriales resultantes de sus interacciones.

4.3. Aplicaciones existentes y experiencia en España

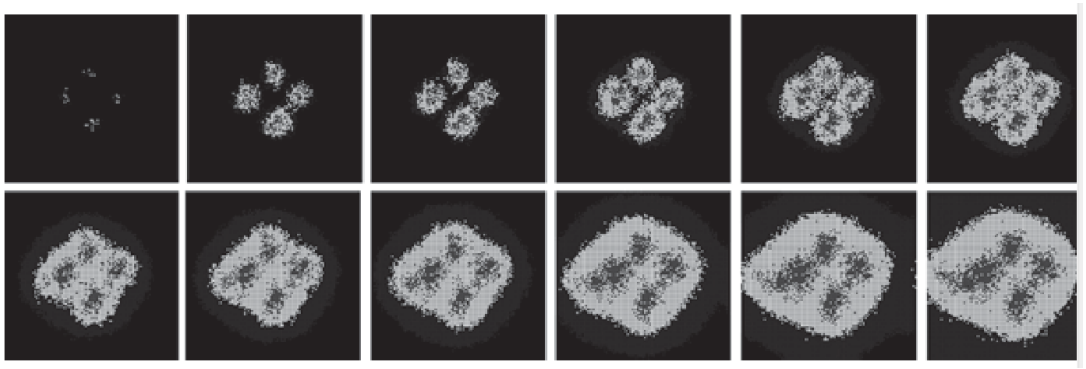
Como ya se ha mencionado, los MBA desde su aparición han sido aplicados a numerosos y variados campos. En geografía, sólo recientemente empezaron a ser considerados como un modelo de interés, especialmente al ser aplicables al estudio de dinámicas territoriales, integrando fenómenos sociales y económicos, aspectos clave de la geografía humana. Aunque encontremos algunas aplicaciones en este campo, si nos ceñimos a los estudios relacionados con el fenómeno de expansión urbana con enfoque territorial apenas encontramos en la bibliografía trabajos basados en MBA, principalmente al compararlo con su amplia y previa aplicación en otros campos. Revisando aplicaciones urbanas de MBA, encontramos algunos ejemplos que se han centrado en analizar elementos a escala local considerando los individuos como agentes.

En primer lugar habría que mencionar los trabajos del grupo de investigación de CASA (*Centre for Advanced Spatial Analysis – University College London*), dirigido por Prof. Dr. Michael Batty. Uno de ellos se centra en la simulación de la evacuación de peatones en la estación de metro *King´s Cross St. Pancras* en Londres (Castle, 2006), en el cual se definen movimientos y comportamientos individuales a partir del movimiento agregado en casos de emergencia. Otro de los trabajos se centra en el control y análisis del comportamiento de multitudes en el desfile de Carnaval de *Notting Hill* (Batty *et al.*, 2003) donde, a partir de información sobre el espacio disponible, se simula el movimiento de las personas en la calle, estudiando los cuellos de botella e intentando reducir la congestión hasta que se pueda planificar una solución segura en cuanto a las rutas establecidas. También destacamos el modelo STREETS (Schelhorn *et al.*, 1999), que simula el movimiento de peatones en un distrito urbano, que a su vez tienen actividades y destinos pre-definidos y programados. El objetivo del modelo es entender las rutas alternativas que trazan los agentes influenciados por su localización y elementos de atracción.

De modo general, hallamos trabajos que simulan los movimientos de vehículos y peatones en el tráfico urbano (Jiang, 2000, Aguilera y Ugalde, 2007, Torrens, 2012); las dinámicas de evacuación de emergencia en ambientes cerrados teniendo en cuenta rutas, tiempo, condiciones de los agentes, etc. (Castle, 2007, Crooks *et al.*, 2014, Moussaïd *et al.*, 2016); modelos de segregación social (Benenson *et al.*, 2002, Crooks, 2006, Feitosa *et al.*, 2011, Patel *et al.*, 2012, Malik *et al.*, 2015); modelos de asignación de empleo y residencias (Crooks, 2006). Otras aplicaciones se centran más en explicar fenómenos relacionados con la ciudad y la asignación de viviendas a un nivel intra-urbano (Dearden y Wilson, 2012, Jordan *et al.*, 2012). Sin embargo, es posible encontrar una serie de publicaciones muy recientes de MBA urbanos aplicados a nivel supramunicipal, a los cuales se les ha dado el enfoque económico considerando las dinámicas del mercado financiero, y que se centran principalmente en las relaciones de compra y venta de propiedades y comportamientos asociados por parte de población y entidades inmobiliarias (Parker y Filatova, 2008, Fontaine y Rounsevell, 2009, Gilbert *et al.*, 2009, Ettema, 2011, Magliocca *et al.*, 2011, Sun *et al.*, 2014, Filatova, 2015). En algunos casos, los trabajos están más bien asociados a los cambios de usos del suelo generados por los desarrolladores (Filatova *et al.*, 2009, Magliocca *et al.*, 2014).

Presentados los ejemplos, se constata que la mayoría de los trabajos de MBA en el ámbito urbano se aplica a escala de individuo, pero dado que tienen funcionalidades que permiten analizar fenómenos complejos, consideramos que podrían aplicarse también a escalas menos detalladas (el histórico de aplicación de los MBA en otros campos de estudio sostiene esta hipótesis), y partimos del supuesto de que también pueden ser útiles para simular el crecimiento urbano a escala supramunicipal.

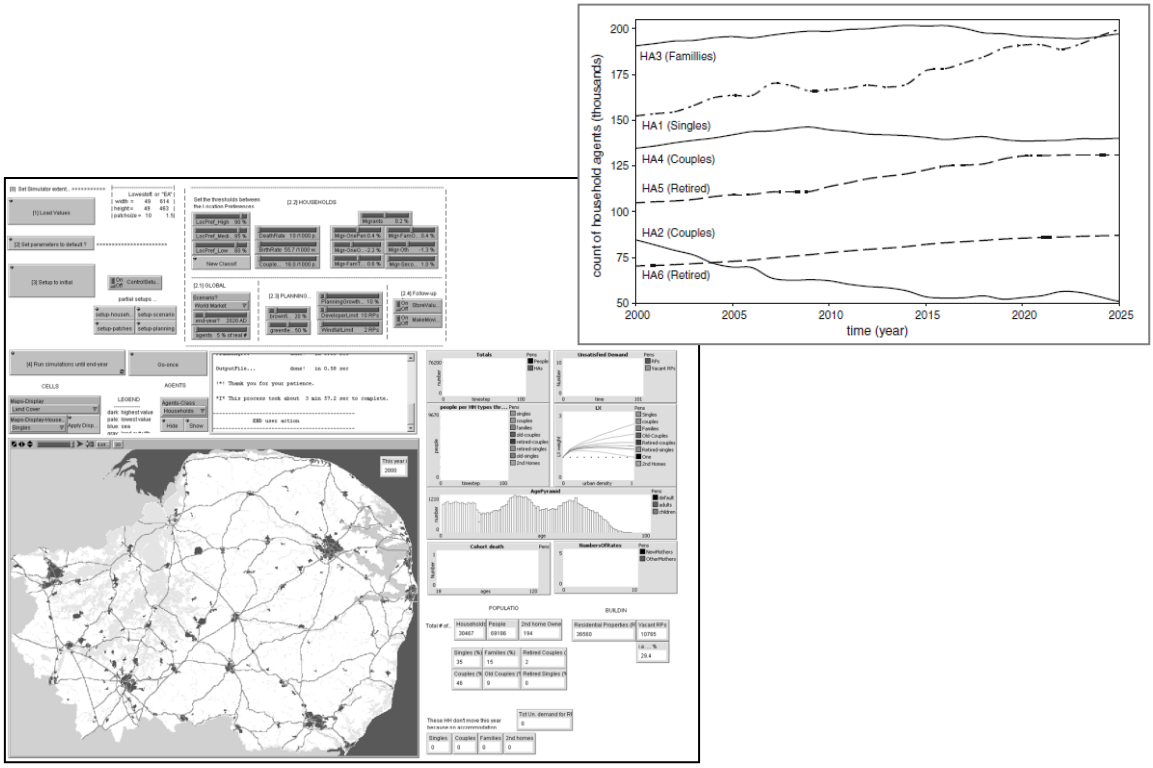
En algunos casos se han planteado MBA con estos objetivos, como es el modelo SIMPOP (Sanders *et al.*, 1997, Pumain, 2012, Pumain y Sanders, 2013), donde se presenta una aplicación de dinámicas urbanas a escalas intermedias, que viene siendo desarrollado y perfeccionado hace algunos años. Fue originalmente desarrollado a escala más global y diseñada para mejorar el entendimiento de los sistemas de ciudades y sus relaciones funcionales. El trabajo de Barros (2004) también es otro buen ejemplo, en el que se lleva a cabo una modelización del crecimiento urbano en diferentes ciudades latinoamericanas estudiando concretamente el fenómeno de periferización. Su modelo se estructura en cuatro módulos: periferización, crecimiento espontáneo, procesos de crecimiento interior en ciudades y crecimiento con restricciones espaciales. Los ejercicios de simulación realizados muestran una serie de proyecciones de crecimiento con diferentes dinámicas urbanas, resultando distintos patrones espaciales (figura 1.3).



Fuente: (Barros, 2012).

Figura 1.3. Ejemplo de patrones espaciales producidos por el módulo periferización, usando múltiples semillas como condición inicial.

Otro buen ejemplo de aplicación de MBA a escala regional lo constituye el modelo HI-LIFE (*Household Interactions through LIFE Cycle Stages*) (Fontaine y Rounsevell, 2009), cuyo objetivo principal es modelar la demanda residencial en la región policéntrica de *East Anglia* – Reino Unido. El objetivo es simular patrones urbanos de usos del suelo en una escala regional, integrando el conocimiento cualitativo de las preferencias de localización residencial de diferentes agentes con los análisis cuantitativos de las dinámicas de crecimiento urbano, para un período de 25 años. En este modelo, la preferencia de los agentes se define principalmente por la etapa de su ciclo de vida (infancia, familias con o sin hijos, vejez) y sus cambios, identificados como el factor predominante de decisiones de localización residencial, sorprendentemente superando incluso motivos económicos (Figura 1.4).



Fuente: (Fontaine y Rounsevell, 2009).

Figura 1.4. Interface del modelo HI-LIFE en *NetLogo* y proyección demográfica de agentes para simulación de 25 años.

Siguiendo la misma línea de modelización del crecimiento urbano, Benenson y Torrens (2004) presentan en su libro una introducción teórica sobre la aplicabilidad de modelos como los MBA en análisis de la dimensión urbana y publican una serie de artículos relacionados (Torrens, 2006). Es el caso del modelo OBEUS (*Object-Based Environment for Urban Simulation*), que ha sido una referencia importante en cuanto a MBA aplicados a escala regional, ya que fue diseñado específicamente para simulación de fenómenos urbanos. Este modelo pretende ser el nivel operativo de la teoría de los *Geographic Automata Systems*, o GAS (Benenson y Torrens, 2003), que sostiene que los conceptos de los AC y los MBA podrían estar idealmente combinados. Los GAS consideran que un sistema urbano está compuesto por objetos fijos (casas, carreteras) o no-fijos (personas, coches) relacionados. Un trabajo destacable es la simulación de la distribución de residencia étnica en Tel Aviv entre 1955-1995, que es ocupado conjuntamente por árabes y judíos. El modelo demuestra la importancia de aspectos cualitativos en la elección de residencia a través de MBA (Benenson *et al.*, 2002, Benenson y Torrens, 2005). Según estos autores, OBEUS y GAS pueden servir como un marco universal para simulaciones urbanas orientadas a objetos.

El modelo SLUDGE (*Simulated Land Use Dependent on Edge Effect Externalities*), creado por Parker (2005) y desarrollado en la plataforma *RePast*, es un ejemplo de modelo combinado de MBA y AC, y está diseñado para el estudio de la influencia articulada de externalidades y costes de transporte en función de la distancia, en los patrones de usos del suelo. Aunque se aplica principalmente a temas relacionados con la agricultura, sería posible, con algunos ajustes, replantear su aplicación a estudios urbanos. Destaca también el proyecto SLUCE (*Spatial Land Use Change and Ecological Effects*) y su modelo SOME (*SLUCE´s Original Model for Exploration*), desarrollado sobre la plataforma SWARM, tiene como objetivo explorar la dinámica de crecimiento en la franja urbano-rural, teniendo en cuenta la influencia de las amenidades del paisaje en el desarrollo de estas áreas. Objetivo similar tiene el modelo IMSHED (*Integrative Model for Simulating Household and Ecosystem Dynamics*), que estudia el nivel de impacto del crecimiento de la población en el medio ambiente, más concretamente al hábitat del oso panda (An *et al.*, 2005). Otros ejemplos que sirven de referencia se encuentran en el libro de Heppenstall y colaboradores (2012).

En España, existen numerosas investigaciones de MBA – o más bien MAS – aplicadas a áreas distintas a la urbana. Por ejemplo, el Grupo de Investigación en Sistemas Complejos (Universidad Politécnica de Cataluña), el Instituto para Sistemas Complejos y Físicos Cros disciplinares – IFISC (Universidad de las Islas Baleares y Consejo Superior de Investigaciones Científicas), el Centro de Ingeniería de Sistemas Sociales – INSISOC (Universidades de Valladolid y Burgos), el Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial – IIIA (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) o el Centro de Tecnología de Información Inteligente – CETINIA (Universidad Rey Juan Carlos) publicaron recientemente algunos documentos sobre estos temas.

También desarrollan investigación basada en Inteligencia Artificial utilizando agentes, el grupo de investigación Lógica, Computación e Ingeniería del Conocimiento, de la Universidad de Sevilla – Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial[11]. En el campo de la sociología, destacan los trabajos del grupo de Sociología Analítica[12] de la Universidad Autónoma de Barcelona – Departamento de Sociología. Destaca también el Grupo GRASIA, de Investigación en Agentes Inteligentes, desde el punto de vista de la ingeniería y sus aplicaciones, de la UCM[13]. Sin embargo, por el momento, desconocemos cualquier aplicación de MBA enfocado a estudios urbanos a escala supramunicipal en España.

[11] https://investigacion.us.es/sisius/grupo/TIC137 (último acceso: abril/2017).
[12] http://gsadi.uab.cat/ (último acceso: abril/2017).
[13] http://grasia.fdi.ucm.es/newmain/language/es/ (último acceso: abril/2017).

CAPÍTULO 2. EL ÁREA DE ESTUDIO Y LA GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN

El área de estudio elegida para desarrollar el Prototipo del MBA es el Corredor del Henares, localizado en el nordeste de la Comunidad de Madrid (CM). Para iniciar con una contextualización más amplia, destacamos que la CM, con sus casi 9.000 km^2, aglutina una población que se acerca a los 6,5 millones de habitantes, superando los 3 millones sólo en el municipio de Madrid, según datos del padrón de 2016 (INE, 2016). Debido a su posición estratégica a nivel nacional, concentra funciones importantes y es centro neurálgico de transporte, empleo, administración, entre otros. Estos factores, junto a la creación de nuevas infraestructuras, desarrollo de la planificación urbana y ampliación de un prometedor mercado inmobiliario, industrial y logístico (Rio Lafuente y Rodríguez Moya, 2009), propician una dinámica demográfica activa que, a su vez, refleja cambios territoriales muy significativos.

Esta dinámica se expande principalmente a los municipios que componen el área metropolitana de Madrid, y se refleja básicamente a través de las estadísticas de expansión de suelo urbano y urbanizable, definido por políticas territoriales. Según el Sistema de Información Urbana – SIU (SIU), en el área metropolitana de Madrid un 18,2% del territorio es ya suelo urbano consolidado, mientras que un 11,5% permanece clasificado como áreas en desarrollo.

No obstante, aunque las políticas territoriales sean un factor decisivo respecto a las dinámicas urbanas, no es el único responsable de la situación de impacto existente. La crisis económica que estalló en 2008 también es un factor que produce consecuencias territoriales

evidentes. En el caso de la CM, el ritmo frenético de la industria del ladrillo se ha minimizado, aunque los impactos generados en el período de expansión inmobiliaria se reflejan claramente en el número espectacular de viviendas vacías y no terminadas. Un ejemplo de ello es el aumento en más de un 200% del número de viviendas libres iniciadas en la CM entre 1994 y 2004, que pasó de 19.000 a más de 60.000 viviendas, para luego caer abruptamente a 4.600 en los 5 años siguientes (92,3%), según datos del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 2013).

Por otro lado, destacamos que este desarrollo urbano acentuado no se dio exactamente en formato tradicional de crecimiento compacto, más bien se distribuyó a lo largo de los ejes de transporte más importantes, principalmente de las carreteras nacionales A-2 y A-4 (que conecta Madrid con Cataluña y con Andalucía, respectivamente). Más recientemente, el eje de la A-6 (que conecta Madrid con Galicia) mostró una evolución urbana destacada de segunda residencia, atraída por la Sierra de Madrid. Los dos primeros ejes conforman lo que llamamos corredores de expansión urbana – hacia el municipio de Toledo y de Guadalajara (este último, denominado Corredor del Henares).

Para el desarrollo del prototipo propuesto se ha seleccionado una parte de la región madrileña como área de estudio, concretamente el Corredor del Henares. A continuación se exponen algunas características importantes a tener en cuenta sobre esta área, que ha experimentado una intensa y compleja dinámica de cambios de usos del suelo en las últimas décadas, que justifican luego las decisiones tomadas.

Por lo tanto, en los siguientes apartados se presentan las principales características del Corredor del Henares, centrado primariamente en sus dinámicas territoriales en cuanto a la planificación urbana, ocupación del suelo y movimiento demográfico, por ser los temas clave considerados en la elaboración del modelo. En este capítulo también se expone la información alfanumérica y geográfica necesarias y disponibles para el desarrollo del prototipo, finalizando con una breve reflexión sobre las potencialidades y deficiencias en cuanto a la obtención de datos espaciales y su adecuación a la propuesta presentada.

1. Contextualización geográfica y delimitación

La caracterización del Corredor del Henares es fundamental para reflexionar sobre las variables necesarias a incluir en el MBA, principalmente, y no solo debido al impacto de la burbuja inmobiliaria, sino también por la gran extensión de terreno expectante, fruto de la planificación del suelo vigente. La dinámica de ocupación urbana, tema clave del modelo propuesto, depende de una serie de factores provenientes de la forma de ocupación en el área de estudio y, por lo tanto, es necesario un análisis pormenorizado de estos elementos con el objetivo de definir los atributos que al final se usarán en el MBA.

Antes de introducir los temas específicos de planificación y ocupación urbana, se hace necesario contextualizar el área de estudio geográficamente, ya que su ocupación y desarrollo urbano dependen indirectamente de algunos factores morfológicos. Conforme ya se ha mencionado, el Corredor del Henares se encuentra al nordeste de la CM apoyado en tres elementos lineales importantes de conexión: la carretera A-2, la línea de ferrocarril Madrid-Barcelona y el río Henares, este último un elemento característico que identifica la conexión natural entre los cuatro municipios del eje central, y que a su vez da nombre a este corredor. Además, en general es considerado un eje de actividades predominantemente industriales, aunque también presenta rico patrimonio cultural, lo que lo califica como un importante núcleo de atracción turística.

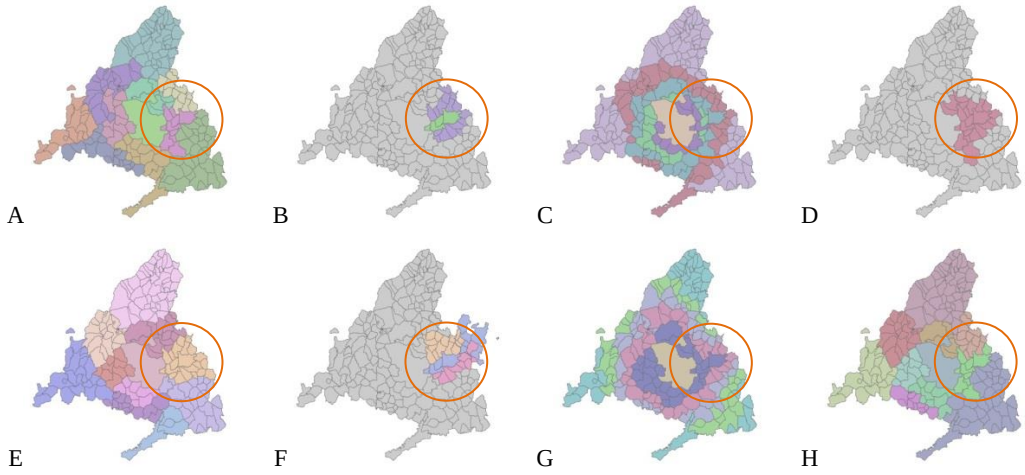
Siguiendo la definición clásica dentro de la teoría espacial, un corredor sería un sistema lineal de núcleos urbanos vinculados por poderosas vías de comunicación (Gómez Mendoza, 1977), p.20). Originalmente, los municipios que forman el Corredor del Henares se limitan al eje central de los cuatro que se extienden a lo largo de la autopista A-2 y el cauce del río Henares –entre Madrid y Guadalajara –, que vienen a ser: Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares.

El Corredor del Henares ha sido objeto de estudio por parte de investigadores y organismos públicos, y dado que la dinámica territorial observada en las últimas décadas provocó cambios profundos en esta región, esta primera delimitación se amplía notablemente. Así pues, se han establecido diferentes configuraciones en cuanto al conjunto final de los municipios que lo conforman (tabla 2.1); algunas se basan en análisis puramente temáticos (movilidad, estadística, calidad del aire), mientras otras presentan un perfil más territorial.

Perfil	*Referencia*	*Unidad Corredor del Henares*	*Objetivo*	*Representación espacial*
Temático	Instituto de Estadística de Madrid	Dividida en 11 unidades territoriales (NUTS4*), el Corredor del Henares compone la NUTS4 con código 3	Dar uniformidad a las estadísticas comunitarias, y se estructuran jerárquicamente según escala. Las NUTS 4 corresponden a la agregación territorial inmediatamente superior a la municipal	Figura 2.1.A
Temático	Díaz Muñoz y Jiménez Gigante (2002)	Estudio específico del Corredor del Henares. Integran los municipios periféricos al mismo, justificados según la adaptabilidad a la zonificación de la Encuesta Domiciliaria de Movilidad de 1996	Dentro del estudio de movilidad urbana, pretendían conocer cuál es el papel que el Corredor del Henares juega en el conjunto de la organización territorial regional en términos de relaciones funcionales para poder delimitarla	Figura 2.1.B
Temático	Consorcio Regional de la Comunidad de Madrid	Zonificación de transporte. El Corredor del Henares integra parcialmente diferentes zonas de transporte según distancia a Madrid	Estudio de movilidad y accesibilidad en la CM	Figura 2.1.C

Perfil	*Referencia*	*Unidad Corredor del Henares*	*Objetivo*	*Representación espacial*
Temático	Red de Calidad del Aire de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la CM	Dividido en 7 zonas. Destaca la polémica ampliación de la zona del Corredor del Henares hacia los municipios del sur, como Rivas-Vaciamadrid, Arganda del Rey y Morata, más relacionados, en realidad, con el eje de la A-3 (Autovía Madrid-Valencia)	Sigue la disposición de características medioambientales similares	Figura 2.1.D
Territorial	Plan Regional de Estrategia Territorial (PRET) de la Comunidad de Madrid (Valenzuela y Soria, 2011)	Propuesta de división en 11 comarcas, contenida en el Documento Preparatorio de las Bases (Consejería de Política Territorial, 1995). Aunque se haya quedado en formato de borrador, proponía una comarcalización	Utilizar la escala territorial como ámbito privilegiado para la actividad planificadora	Figura 2.1.E
Territorial	Gómez Delgado (Gómez Delgado, 1998),	La delimitación del corredor avanza más allá de los límites administrativos de la CM, llegando hasta el municipio de Guadalajara, que ya en estas fechas se conforma como un corredor continuo	La descripción realizada profundiza en la relación existente entre estos municipios y su contexto Propone dividir por sectores el Corredor del Henares: Eje Central, Margen Norte y Margen Sur, según su diferenciación socioeconómica	Figura 2.1.F
Territorial	"Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI", elaborado por la Consejería de Economía e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid en 2002	División más genérica de la región configurada en Unidades Territoriales de la CM, en forma de coronas metropolitanas concéntricas	Espacios claramente diferenciados por sus características funcionales y la condición socioeconómica de sus habitantes	Figura 2.1.G
Territorial	López de Lucio (López de Lucio, 2003)	Delimitación de regiones homogéneas– que denomina comarcas. El Corredor del Henares se encuentra en gran parte en la comarca núm. 10.	Entender los procesos relacionados con la dinámica territorial de la CM. Divide la región madrileña en subsistemas territoriales con una clara identidad geográfico-funcional. Los municipios se agrupan de acuerdo a un conjunto de criterios, tales como: características geográficas de sus territorios, su perfil funcional, los tipos y formas edificatorias principales y las características socioeconómicas comunes.	Figura 2.1.H

Tabla 2.1. Diferentes configuraciones de municipios que componen el Corredor del Henares.

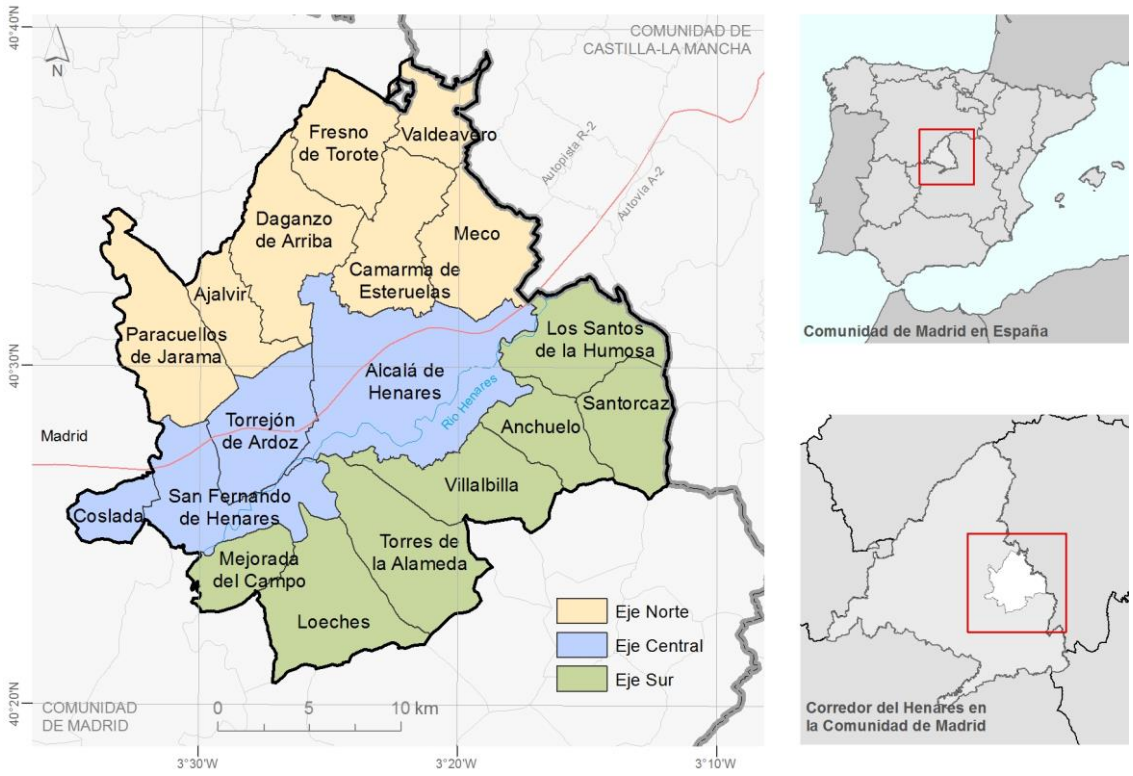


Fuente: (A) Atlas Estadístico de la CM, 2010; (B) (Díaz Muñoz y Jiménez Gigante, 2002); (C) Consorcio de Transporte de la CM; (D) Red de Calidad del Aire de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la CM (2012); (E) Plan Regional de Estrategia Territorial de la Comunidad de Madrid, 1995; (F) (Gómez Delgado, 1998); (G) Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI, 2002; (H) (López de Lucio, 2003). * Adaptado para coincidir con las divisiones administrativas actuales.

Figura 2.1. El Corredor del Henares en diferentes agrupaciones municipales de la Comunidad de Madrid.

Tras un análisis detallado de las propuestas expuestas, realizamos una nueva selección basándonos en un análisis de localización espacial, dinámica urbana y algunas características de interés (aspectos funcionales, relación con la capital y entre ellos mismos, crecimiento urbano reciente, accesibilidad, etc.). La propuesta final de la delimitación del área de estudio quedó en 18 municipios (figura 2.2), cuya superficie es de 624 km^2, y cuya población asciende a 569.021 habitantes, según los datos continuos del padrón municipal a enero de 2015 (INE, 2016).

Aunque es sabido que el Corredor del Henares funcionalmente sobrepasa el límite autonómico y presenta una dinámica común y continuada hasta el municipio de Guadalajara, ya en otra Comunidad Autónoma (Castilla-La Mancha), nos limitamos a utilizar exclusivamente los municipios de la Comunidad de Madrid, principalmente debido a la disponibilidad de información necesaria para el desarrollo del modelo (datos estadísticos y espaciales).



Fuente: Elaboración propia a partir de BCN-25 (IGN).

Figura 2.2. Situación y delimitación del Corredor del Henares y representación de los ejes: central, norte y sur.

En general, el desarrollo del Corredor del Henares varía según el período temporal de expansión, y por ello conviene analizarlo por ejes. El eje central siempre ha sido el inductor de básicamente todas las actividades generadas en el área de estudio, y consecuentemente ha atraído población y desarrollo urbanístico. Por ende, está naturalmente dividido en otros dos ejes, norte y sur, que presentan características particulares que se verán a continuación.

2. Dinámica territorial

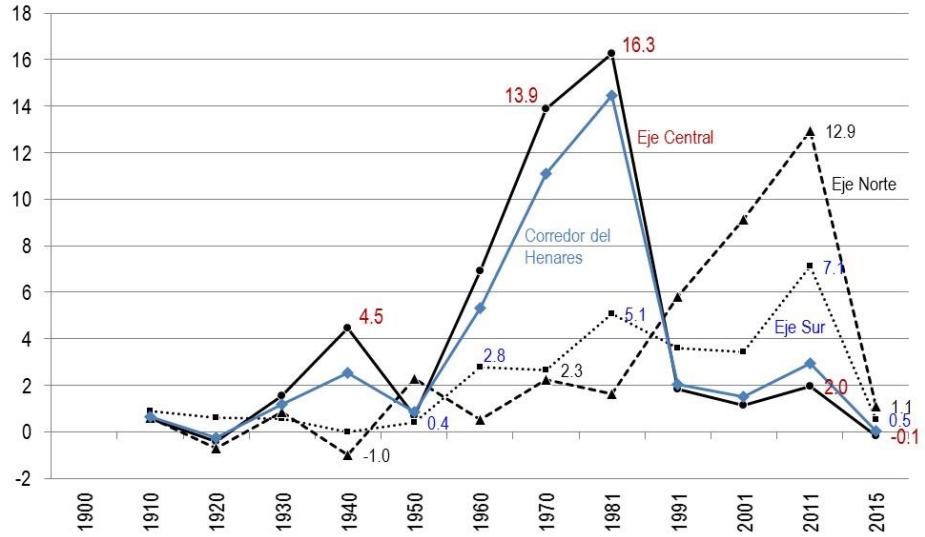
Según las estadísticas del INE, la población de la CM ha estado en constante crecimiento, destacando algunos saltos evidentes en épocas de ascenso económico, como fueron la década de 1960 por la expansión industrial, y hacia finales de la década de los 90 por el ciclo inmobiliario expansivo. El primer gran salto demográfico, en la década de 1950, se encuentra relacionado con el fuerte éxodo del mundo agrario hacia las áreas urbanas en búsqueda de mejores condiciones y cubriendo las ofertas de empleo del sector industrial y de servicios que se encontraba en pleno crecimiento, asociado a la modernización económica. En ese período, la población de la CM

aumentó en aproximadamente un 50%, pasando de 2,5 a 3,8 millones de habitantes, siendo un gran porcentaje de inmigrantes de origen rural en búsqueda de una mejor situación económica. En la década de 1970, más en concreto entre 1974 y 1982, dicho crecimiento se estanca por el estallido de una fuerte crisis económica y energética.

El segundo salto demográfico está relacionado con el boom inmobiliario que se inició a finales de los años 90, y que generó una extensa oferta de empleo, siendo cubierta en gran parte por inmigrantes. La CM, por sus características físicas y administrativas, acogió gran parte de las nuevas viviendas construidas en esta etapa de expansión inmobiliaria, y la dinámica en el Corredor del Henares no fue diferente.

Históricamente, y debido a sus condiciones de accesibilidad, el Corredor del Henares se constituye en los años cuarenta del pasado siglo, una de las áreas prioritarias para la descentralización productiva y residencial de Madrid (Díaz Muñoz y Jiménez Gigante, 2002). El crecimiento demográfico explosivo de los años cincuenta se incrementa continuamente hasta los setenta, básicamente en los cuatro municipios del eje central del corredor, mientras los demás apenas presentan desarrollo demográfico. En este período, el Corredor del Henares se convierte en un eje importante de expansión urbana, presentando crecimiento demográfico continuado, y con actividades de servicios, comerciales y principalmente industriales, fuertemente asociadas al municipio de Madrid. A partir de 1998, durante el nuevo período de bonanza y en el contexto del boom inmobiliario, los demás municipios del corredor empiezan a desarrollarse demográficamente.

La figura 2.3 muestra las tasas de crecimiento demográfico en el área de estudio, indicando el contraste entre los municipios del eje central y los demás. Aunque se observa un aumento casi constante, tres momentos destacan en el corredor en general: entre 1950 y 1981, con crecimiento continuo de población, pasando de 37 mil a 315 mil habitantes; a partir de 2001, como consecuencia del boom inmobiliario, con un aumento de un 30% hasta 2011; y luego desde 2011 hasta recientemente, coincidiendo con la crisis económica que indica estabilización demográfica (INE).



Fuente: Elaboración propia sobre datos de la serie histórica del Padrón Municipal (INE, 2016).

Figura 2.3. Tasa de crecimiento demográfico en los municipios del Corredor del Henares, y agrupados por ejes central, sur y norte.

No sólo los aspectos en cuanto a la distribución demográfica y flujos de población afectan a un territorio, de hecho los aspectos económicos inducen en gran medida la movilidad de la población y promueven nuevos desarrollos territoriales. En este sentido, podemos afirmar que la crisis económica que estalló en 2008 en España produjo consecuencias graves en lo que se refiere al mercado inmobiliario, gastos públicos, tasas de desempleo, etc. Las cifras son importantes, y revelan una situación sin precedentes en cuanto a la economía en general, que influye directamente sobre los demás aspectos territoriales. Este cambio de ciclo económico dejó huellas importantes en la CM, de las cuales hacemos especial hincapié en el componente especulativo, inmobiliario y edificatorio del ciclo previo, que agravan aún más las ya delicadas consecuencias de la crisis.

En términos económicos, la CM genera un PIB de 189.432 millones de euros al año, equivalente a 29.731 mil euros per cápita, casi un 30% por encima de la media nacional (INE). En efecto, también es la comunidad que más sufre con la actual crisis económica, presentando tasas de desempleo elevadas. Desde 2006, el número de desempleos aumenta seriamente, registrando un incremento importante en los últimos años, pasando de 211.558 en diciembre de 2006 a 544.484 en el mismo mes de 2012, representando un 38,8%. Sólo en el Corredor del Henares, el paro era de 20.602 a finales de 2006 (un 70,6% en el sector servicios, un 13,7% en el sector industria y un 9,1% en sector de la construcción). Dichos valores aumentan, totalizando 56.084 desempleados en diciembre de 2012.

Estos cambios de condiciones económicas y de trabajo pueden ser una de las causas de cambios significativos en la estructura territorial del área de estudio, principalmente respecto al mercado inmobiliario, comprobado al analizarse, por ejemplo, estadísticas de compraventa de viviendas o del número de viviendas vacías. Dichas dinámicas territoriales, a su vez, están directamente asociadas a la legislación incidente en el suelo, así como a la ocupación urbana, ambos temas tratados en detalle en los siguientes apartados.

2.1. Planificación urbana: marco legal

El modelo territorial producido por la ocupación urbana y la distribución poblacional en la CM está muy relacionado con el marco legal y las respuestas políticas de ordenación del territorio y urbanismo existentes en España a distintos niveles competenciales. Las Leyes de Suelo, de Urbanismo, de Paisaje, de Ordenación Territorial, los Planes y Normas Subsidiarias, las subvenciones para vivienda, al mismo tiempo que funcionan como limitantes, también actúan como estímulo a la ocupación y desarrollos urbanos. Incluso el marco educacional, de renta, de inmigración, entre otros, pueden influenciar en la distribución espacial de la población, dado que producen cambios indirectos en el territorio. En este capítulo se analizan aquellas políticas explícitamente territoriales, y aunque asumimos que otras influyen y son influidas por estas, no serán tratadas o mencionadas.

Además de la Ley de Suelo (Ley 8/2007, de 28 de mayo) aplicada a nivel estatal, los dos principales instrumentos políticos de ordenación del territorio en una comunidad autónoma son, a nivel regional, el Plan de Ordenación Territorial, que reglan por encima de los no menos importantes Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU), a nivel municipal.

Se puede considerar insipiente la situación española en materia de cooperación territorial para la definición de estrategias territoriales subregionales (Farinós Dasi *et al.*, 2005). Un buen ejemplo de ello es la CM que, hasta el momento, no ha desarrollado su plan regional (Valenzuela Rubio, 2010), lo que es una situación alarmante por la insuficiencia de instrumentos legales, dada la elevada extensión de suelo disponible para urbanizaciones especificada en la Ley del Suelo, aunque la legislación sectorial reserve un volumen más que considerable de terrenos protegidos (46%). Por otro lado, al considerar el nivel municipal, hay todavía un vacío importante en cuanto a PGOU aprobados y actualizados. Según el Ministerio de Vivienda (2015), de los 179 municipios de la Comunidad de Madrid, solamente 46 tienen Planes Generales de Ordenación Urbana aprobados (24,7%), de los que solamente 16 lo hicieron después de 2005.

Aunque se señale esta carencia de planes regionales y PGOU, siguen siendo, junto a las leyes de suelo, herramientas fundamentales que se encuentran a disposición de la administración y de la comunidad, y a su vez elementos esenciales para estudios de crecimiento, tendencias, evolución e impactos sobre el territorio. A continuación se presenta brevemente la evolución en

cuanto a la legislación de suelo y planificación urbana en la CM, donde se nota claramente su fuerte relación con la ocupación masiva del territorio.

A nivel estatal, la Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre Régimen del Suelo y Valoraciones, liberaba suelo de forma significativa, y por ello es conocida por ley del `todo urbanizable`, pues en ella todo el suelo es urbanizable salvo si es clasificado específicamente como de protección. El objetivo de esta ley era el relanzamiento del sector de la construcción para mejorar la economía, facilitando las condiciones a los operadores, única cuestión que estaba en manos de la legislación, ya que las otras cuestiones pertenecían principalmente al marco macroeconómico, como la financiación barata y abundante y el soporte del euro, entre otros (Delgado Jiménez, 2013). En 2007 se publica la Ley 8/2007, de 28 de mayo, de Suelo y el Real Decreto legislativo 2/2008, de 20 de junio, del texto refundido de la Ley de Suelo. Aunque la competencia de urbanismo al final es de las Comunidades Autónomas, las modificaciones de esta ley a nivel estatal son bastante innovadoras. Una de ellas es la caracterización del suelo como recurso a proteger, evitando una clasificación desmedida. También intenta desvincular el valor del suelo del planeamiento urbanístico para reducir la especulación, basándose más en la situación del suelo que en su clasificación. Además de estos, incorpora estándares mínimos de transparencia, participación ciudadana, evaluación y seguimiento de los efectos de los planes sobre economía y medio ambiente, entre otras mejorías. Más recientemente, se aprueba la Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, que en cierta forma pretende reactivar el sector de la construcción y fomentar la sostenibilidad en cuanto a eficiencia, ahorro energético y lucha contra la pobreza energética. Hay que destacar que a nivel autonómico, la Ley de Suelo en vigor en la CM es la Ley 9/2001, de 17 de julio, que sufrió más de 10 modificaciones hasta 2010, siendo su mayoría posteriores a 2007, año en el que comienza la crisis económica.

Como se ha señalado previamente, en España la elaboración de los Planes Generales de Ordenación Urbana es competencia única y exclusivamente municipal. Según la normativa urbanística, el PGOU es definido como instrumento básico de ordenación integral del territorio de uno o varios municipios, a través del cual se clasifica el suelo, se determina el régimen aplicable a cada clase de suelo, y se definen los elementos fundamentales del sistema de planeamiento urbanístico o planificación urbana. En los municipios pertenecientes a la CM, las fechas y tipología del planeamiento (Plan General o Normas Subsidiarias) son bastante heterogéneas, estando pocos planes revisados recientemente (sólo los de Moraleja de Enmedio, Pedrezuela, Brunete, Valdilecha, Estremera y Fuente el Saz de Jarama son posteriores a 2009), estando fechados otros en la década de los noventa.

Asimismo, entre los municipios del Corredor del Henares la situación de la planificación urbana es bastante heterogénea. La tabla 2.2, con datos del Portal del Sistema de Información Urbana (SIU) de 2015, indica que solamente 8 municipios de los 18 presentan PGOU aprobado, siendo sólo 5 posteriores a 2000. La mayoría presenta planes o normas subsidiarias antiguas, lo

que indica una necesidad de revisión, si además tenemos en cuenta la intensa dinámica urbana experimentada durante el período de la burbuja inmobiliaria.

Municipio	*Población (2011)*	*Superficie (km^2)*	*Tipo de planeamiento*	*Año de publicación*
Ajalvir	4.126	19,88	Normas Subsidiarias	1991
Alcalá de Henares	200.505	87,88	Plan General	1991
Anchuelo	1.167	22,36	Normas Subsidiarias	1990
Camarma de Esteruelas	6.776	35,64	Normas Subsidiarias	1997
Coslada	89.155	12,12	Plan General	1995
Daganzo de Arriba	9.472	43,88	Normas Subsidiarias	1995
Fresno de Torote	2.051	31	Plan General	2006
Loeches	7.919	44,76	Normas Subsidiarias	1997
Los Santos de la Humosa	2.307	34,6	Normas Subsidiarias	1998
Meco	12.671	35,06	Plan General	2009
Mejorada del Campo	22.641	16,82	Plan General	1997
Paracuellos de Jarama	19.507	43,84	Plan General	2001
San Fernando de Henares	40.733	39,28	Plan General	2002
Santorcaz	816	28,01	Normas Subsidiarias	1994
Torrejón de Ardoz	123.213	32,53	Plan General	1999
Torres de la Alameda	7.822	43,51	Normas Subsidiarias	1993
Valdeavero	1.382	19,11	Normas Subsidiarias	1996
Villalbilla	10.897	33,98	Normas Subsidiarias	2001

Fuente: Planeamiento Urbanístico 2015, Ministerio de Vivienda (acceso junio/2013). Censo 2011, INE.

Tabla 2.2. Datos de planeamiento urbanístico de los municipios del Corredor del Henares.

Teóricamente, el planeamiento urbanístico consiste en un conjunto de instrumentos técnicos y normativos que se redactan para ordenar el uso del suelo y regular las condiciones para su transformación o, en su caso, conservación. Comprende un conjunto de prácticas de carácter esencialmente proyectivo con las que se establece un modelo de ordenación para un ámbito espacial. En estos mencionados planes, se definen elementos importantes para la planificación como la clasificación y calificación del suelo. El objetivo es disponer de un desarrollo ordenado y fundamentado bajo ciertas directrices, y por ello las decisiones de los planificadores urbanos sobre dónde asignar nuevas áreas urbanizables puede comprometer el futuro desarrollo de un territorio.

La clasificación del suelo en la Región Urbana de Madrid (tabla 2.3) indica proporciones curiosas, ya que el porcentaje de suelo urbanizable (12,76%) equivale a dos tercios del suelo clasificado como urbano consolidado, donde ya viven más de 5,9 millones de habitantes. De los 18 municipios del Corredor del Henares, 10 participan de la delimitación del Ministerio de Vivienda para la Región Urbana de Madrid, que son aquellos más desarrollados urbanísticamente y que posiblemente comparten proporción similar. Estos municipios son: Ajalvir, Alcalá de

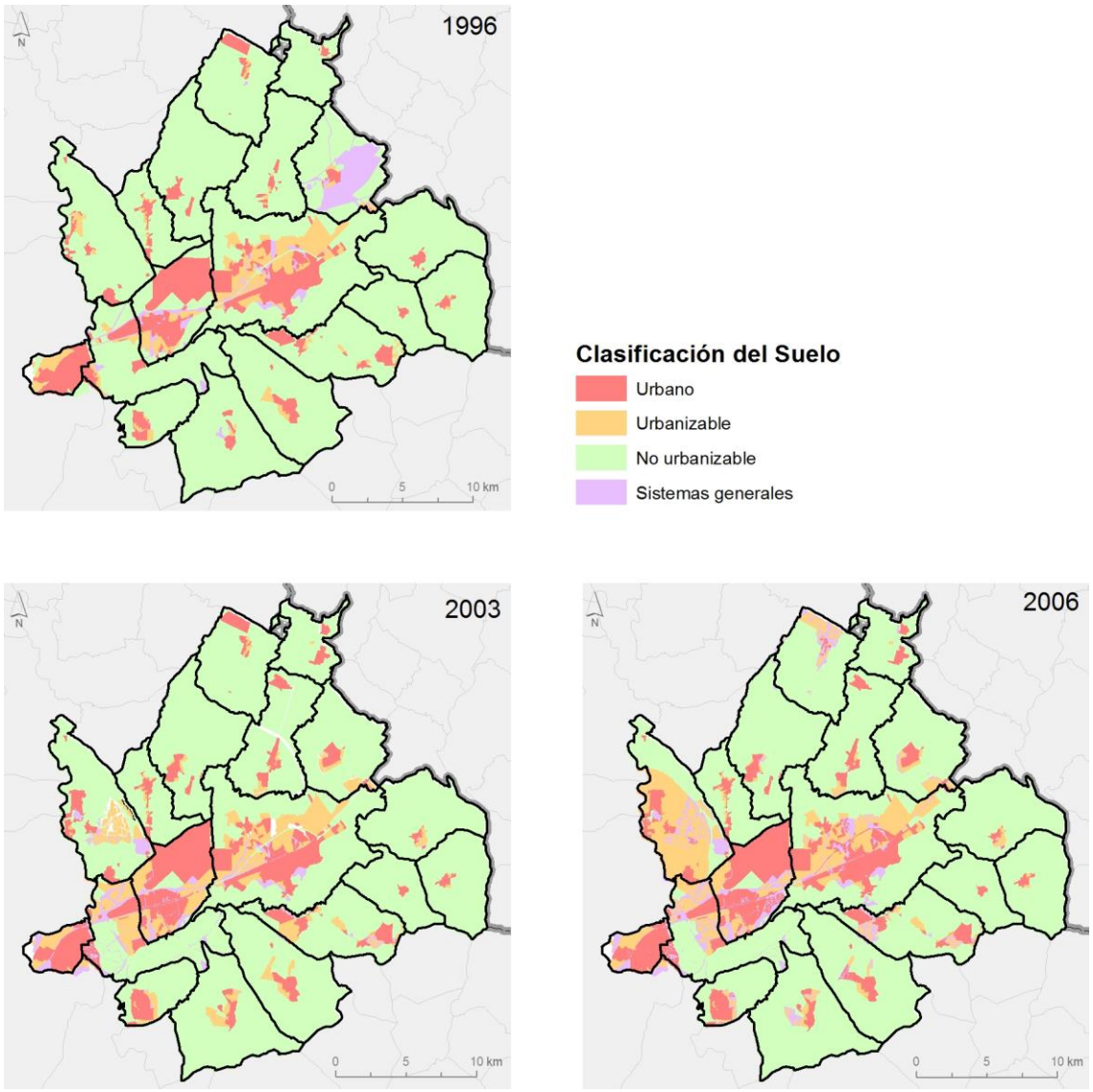
Henares, Camarma de Esteruelas, Coslada, Daganzo de Arriba, Meco, Mejorada del Campo, Paracuellos de Jarama, San Fernando de Henares y Torrrejón de Ardoz. Los ocho restantes quedan fuera de esta selección.

	*España**	*Región urbana Madrid ** *	*Corredor del Henares ****
	%	%	%
Urbano consolidado	9,05	17,67	8,64
Urbano no consolidado	1,14	1,51	0,01
Urbanizable delimitado o sectorizado	4,32	8,67	4,60
Urbanizable no delimitado o sectorizado	2,42	4,09	0,18
No urbanizable	79,59	60,15	81,72
Sistemas generales	3,48	7,89	4,85

* Distribución media en áreas urbanas españolas.
** Formada por 52 municipios, entre ellos, 10 del área de estudio.
*** considerando los 18 municipios del área de estudio.
Fuente de información: Informe anual del OSE (OSE - Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2010).

Tabla 2.3. Clasificación del suelo en la Región Urbana de Madrid, 2003.

Con respeto a la distribución de las clases de suelo presentes en los planes de los municipios del área de estudio, contamos con datos de 2003 y 2006 que, nos permite hacer un análisis comparativo del diseño de la estructura del suelo planificada. Basándose en esta información, se identifica un crecimiento de áreas urbanizables en el Corredor del Henares del 27,3%, equivalente a 14,4 km2. En el mismo período, el suelo clasificado como no-urbanizable perdió 22 km2 de su área, esto es, casi un 5% fue reconvertido a otras clases. En la figura 2.4 es posible contemplar las diferencias más importantes en cuanto a la clasificación del suelo entre 1996 y 2006.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de clasificación del suelo (Sistema de Información Urbana – SIU, Ministerio de Fomento / Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la CM).

Figura 2.4. Clasificación del suelo en el Corredor del Henares, 1996-2003-2006.

La clasificación del suelo para los municipios del Corredor del Henares en 2006 indica una superficie de 368,48 km^2 de área urbanizable delimitada, mientras que hay 692,56 km^2 de áreas urbanas consolidadas. Esto significa que el territorio está legalmente preparado para recibir un 53% más de la ocupación urbana existente, duplicando su superficie.

Al relacionar esta clasificación con la nueva ley de suelo aprobada en 2007, es posible encontrar una serie de coincidencias y explicaciones en cuanto a lo mencionado. Se destaca que esta ley cambiaba básicamente la consideración residual del suelo no urbanizable (o rústico). De esta forma, muchos de los municipios que aprobaron sus PGOU antes de esta nueva ley presentan aún vigentes extensas superficies de suelo urbanizable, por lo que su expansión urbana excesiva no incumple la legalidad.

Por ejemplo, el plan del municipio de Alcalá de Henares, que data de 1991, se encuentra en fase de revisión de la propuesta, cuyo avance se presentó en 2012. Sin embargo, en 2014 vuelven a interrumpir su tramitación por motivo de elecciones municipales, y ya en 2017 sigue en desarrollo por el nuevo equipo de gobierno. Otro ejemplo similar es Torrejón de Ardoz, que publicó los avances de modificación de su plan de 1999 (texto refundido de 2001) en junio de 2013, pero que todavía no se encuentra aprobado por la CM. En igual situación se encuentra el Municipio de Mejorada del Campo, que están a la espera del parecer de la CM sobre la modificación del PGOU de 1997 presentada en 2012.

Tras todo lo dicho respecto a la legislación de usos del suelo, planes urbanísticos, mercado de viviendas y factores económicos asociados, cabe aún una breve reflexión sobre los aspectos de legislación ambiental del área de estudio, que delimita áreas de protección bajo los instrumentos correspondientes.

Aunque presente características predominantemente urbanas, la CM es un territorio rico y diverso en ecosistemas naturales. La distribución de espacios protegidos es bastante significativa (sumando un 40% de su territorio) si consideramos además de los Espacios Naturales Protegidos (ENP) oficiales, también la Red Natura 2000 (RN2000), que es una propuesta de áreas de conservación constituida por LIC (Lugar de Interés Comunitario) y ZEPA (Zonas de Especial Protección de Aves). Estas áreas de protección actúan a su vez como una limitación importante para el crecimiento urbano, dado que la ocupación normalmente está limitada bajo estricta legislación. Uno de los objetivos de las restricciones en cuanto a la ocupación urbana es evitar la fragmentación del territorio, y así proteger la fauna, flora y los corredores ecológicos por donde circulan. Aun así, la presión de la urbanización en las zonas limítrofes a los espacios naturales es intensa debido, entre otras cosas, a la calidad paisajística generada por su proximidad.

Los ENP oficiales, que son gestionados por la Consejería de Medio Ambiente y se encuentran bajo diversas categorías de protección (Sitio Natural, Parque Regional, Parque Natural, Paraje, Monumento Natural, Reserva Natural), abarcan un 13% del territorio de la CM, gran parte limitando con áreas urbanas consolidadas. Entre ellos se encuentra el Parque Nacional Cumbres del Guadarrama, situado a noroeste de la CM y aprobado en septiembre de 2012.

Ya el Corredor del Henares cuenta con 196,05 km^2 de ENP, destacando el Parque Regional del Sureste (clasificado como Zona de Reserva Natural) que ocupa gran parte del municipio de San Fernando de Henares. La superficie dedicada a la RN2000 es de 869,68 km^2, y ocupa, además del ENP, también la porción norte del corredor – abarcando las estepas cerealistas de las riberas de los ríos Jarama y Henares. Este último conforma una ZEPA (Zona de Especial Protección de Aves), que en un primer momento fue aprobado como suelo urbano y urbanizable en la propuesta preliminar del PGOU de Meco (2005), pero modificado en seguida como zona de protección, resultado de manifestaciones populares y solicitudes de revisión del plan. Destaca que

su modificación culminó con la publicación del nuevo PGOU en 2009, el más reciente del Corredor del Henares.

Las herramientas de planificación expuestas, aunque consisten en un importante instrumento que interviene en el fenómeno de expansión urbana, no son las únicas. Como se verá a continuación, también la dinámica de la ocupación real a lo largo de un territorio ejerce fuerte influencia en este fenómeno.

2.2. Dinámica de la ocupación urbana

El crecimiento de la población naturalmente presenta implicaciones significativas en cuanto a la expansión de la ciudad, no sólo por el desarrollo de suelo urbano en sí, sino también por el desarrollo de otros usos asociados, como el industrial, comercial, de infraestructuras, espacios verdes, áreas públicas de ocio, etc.

En términos generales, la CM presenta un importante crecimiento de áreas artificiales entre 1990 y 2006 (según el proyecto CORINE Land Cover, o CLC), pasando de 604,4 km2 en 1990, a 938,6 km2 en 2000 y llegando a 1.102,5 km2 en 2006. El crecimiento relativo y absoluto de estas superficies han sido espectaculares en los dos períodos, 49,2% y casi 300 km2 (1990-2000) y 18,1% y casi 170 km2 (2000-2006). Es una situación sorprendente, que cambia de un escenario relativamente equilibrado y razonablemente estable, hacia unas condiciones casi inmanejables de población y ocupación artificial, coincidiendo con el auge del boom inmobiliario. El Corredor del Henares, de hecho, presenta las mismas características de expansión explosiva, principalmente y como ya se ha mencionado, por tratarse históricamente de un eje de desahogo para el desarrollismo madrileño.

La cartografía de usos del suelo de Madrid, MLU (Madrid Land Use), cedida por la UCM y creada en el marco de la investigación desarrollada en el Departamento de Geografía Humana (Díaz Pacheco y García Palomares, 2014), proporciona información sobre la ocupación del suelo urbano en los años 2000, 2006 y 2009, a escala aproximada 1:10.000, lo que nos permite realizar un análisis en detalle en cuanto a la distribución de usos urbanos[14] y los cambios observados entre estas fechas. Además, ampliamos los análisis a un estudio más concreto de la evolución de los usos residenciales en el área de estudio.

La tabla 2.4 indica la dinámica de crecimiento de área urbana en los períodos mencionados, donde se identifican valores muy elevados de crecimiento de superficies urbanas, que se analizarán a continuación.

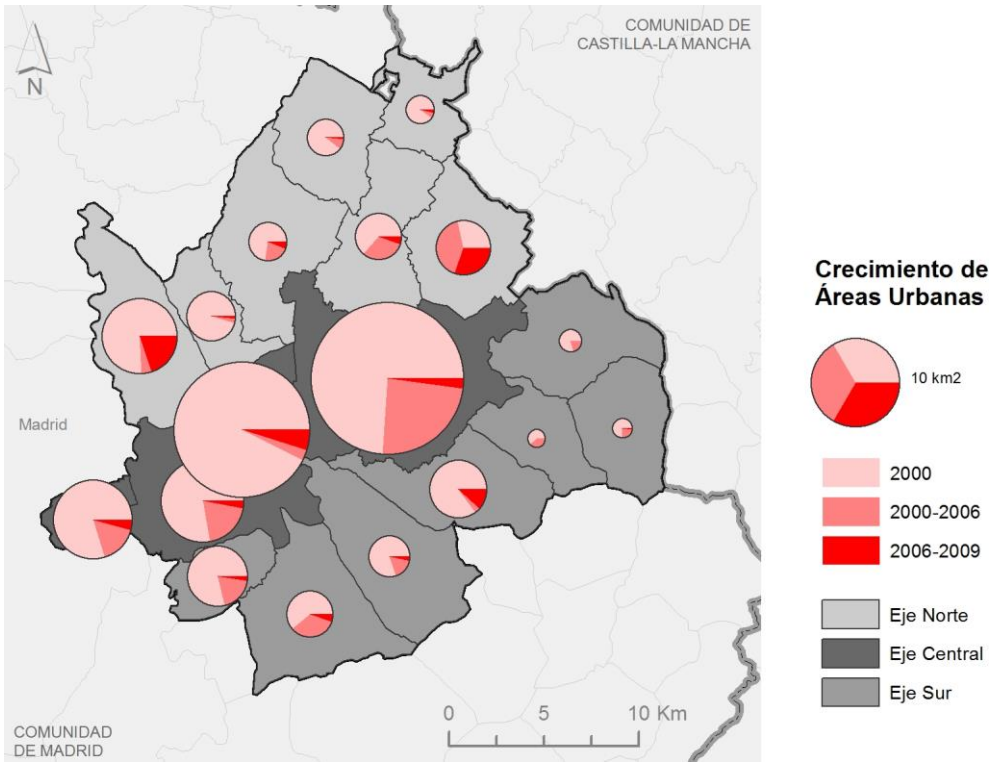
[14] Clasificados según los siguientes usos: aeropuerto, equipamientos, industrial, infraestructuras, no urbano, comercial, residencial unifamiliar y multifamiliar, servicios y verdes urbanos.

	Área Urbana	Crecimiento		Área Urbana	Crecimiento		Área Urbana	Crecimiento	
	2000	2000-2006		2006	2006-2009		2009	2000-2009	
	km2	km2	%	km2	km2	%	km2	km2	%
EJE CENTRAL	**58,75**	**11,03**	**18,78**	**69,78**	**2,41**	**3,46**	**72,19**	**13,44**	**18,62**
Alcalá de Henares	21,53	6,99	32,47	28,53	0,60	2,09	29,12	7,59	35,24
Coslada	7,34	1,49	20,29	8,83	0,38	4,34	9,21	1,87	25,51
San Fernando de Henares	7,84	1,94	24,73	9,78	0,30	3,06	10,08	2,24	28,55
Torrejón de Ardoz	22,03	0,61	2,77	22,65	1,13	5,00	23,78	1,74	7,91
EJE NORTE	**19,23**	**4,46**	**23,18**	**23,68**	**3,62**	**15,27**	**27,30**	**8,07**	**29,58**
Ajalvir	3,82	0,11	3,00	3,93	0,06	1,52	3,99	0,17	4,56
Camarma de Esteruelas	2,26	1,10	48,62	3,35	0,20	5,86	3,55	1,29	57,33
Daganzo de Arriba	1,88	0,55	29,07	2,43	0,16	6,79	2,59	0,71	37,83
Fresno de Torote	2,16	0,22	10,42	2,38	0,03	1,37	2,42	0,26	11,93
Meco	1,36	1,99	146,78	3,35	1,45	43,33	4,81	3,45	253,71
Paracuellos de Jarama	6,37	0,38	5,99	6,75	1,66	24,63	8,42	2,04	32,09
Valdeavero	1,39	0,10	7,07	1,48	0,05	3,19	1,53	0,15	10,49
EJE SUR	**15,36**	**3,62**	**23,54**	**18,98**	**1,08**	**5,69**	**20,06**	**4,69**	**23,41**
Anchuelo	0,40	0,25	62,67	0,66	0,00	0,30	0,66	0,26	63,16
Loeches	2,23	1,22	54,68	3,44	0,20	5,67	3,64	1,41	63,45
Los Santos de la Humosa	0,80	0,22	26,83	1,02	0,00	0,40	1,02	0,22	27,34
Mejorada del Campo	4,51	1,07	23,79	5,58	0,14	2,57	5,72	1,22	26,96
Santorcaz	0,59	0,20	34,38	0,79	0,01	1,64	0,81	0,22	36,58
Torres de la Alameda	2,32	0,50	21,51	2,82	0,09	3,29	2,91	0,59	25,51
Villalbilla	4,51	0,16	3,44	4,66	0,63	13,48	5,29	0,78	17,38
TOTAL	**93,34**	**19,10**	**20,47**	**112,44**	**7,11**	**6,32**	**119,55**	**26,21**	**21,93**

Fuente de información: MLU, 2010.

Tabla 2.4. Áreas urbanas y evolución en el área de estudio, 2000-2006-2009.

La distribución espacial de los diferentes usos urbanos en el área de estudio confirma a rasgos generales: la dominancia en cuanto a la ocupación urbana en los cuatro municipios centrales, el crecimiento urbano en municipios periféricos en diferentes momentos, la influencia del crecimiento según las infraestructuras de transporte existentes (carretera A-2, M-50, carreteras secundarias). Respecto al aspecto temporal, y con apoyo de los datos presentados, se identifican tres momentos claros de desarrollo urbano en la región, destacando la diferenciación entre los tres ejes analizados (figura 2.5).



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MLU, 2010.

Figura 2.5. Superficie urbana y crecimiento, 2000-2006-2009.

El *eje central*, presenta su ocupación inducida por la expansión de Madrid, en gran parte anterior al año 2000, y por lo tanto su crecimiento no destaca en la figura, aunque sí se observa crecimiento importante en el primer período (2000-2006), coincidiendo con el boom inmobiliario. Durante este período, entre los que más crecieron en superficie destacan San Fernando de Henares, que amplió su red de infraestructura considerablemente; y Alcalá de Henares, con la nueva distribución de área industrial al norte del municipio.

Ya en el *eje norte*, es notable el crecimiento urbano de Meco en primer lugar, contando con casi un 150% de crecimiento, seguido de Camarma de Esteruelas y Daganzo de Arriba, también con altos porcentajes (48,6% y 29,1%, respectivamente). En el segundo período, ya en fase de descenso de la burbuja inmobiliaria, destaca de nuevo Meco, cuya área urbana sigue ascendiendo (43%), y Paracuellos de Jarama, que creció un casi 25% entre 2006 y 2009, con apenas crecimiento en el primer período.

Por último, ya totalmente vinculado a la burbuja inmobiliaria, el *eje sur* indica crecimiento significativo y homogéneo en prácticamente todos los municipios durante el primer período (2000-2006), destacando especialmente Anchuelo (62,7%) y Loeches (54,7%), que superan el 50%. De forma general, todos decayeron en el segundo período, con apenas crecimiento. La excepción es Villalbilla, que presenta un orden inverso, con bajo crecimiento en el primer período y un 13% en el segundo.

En un análisis de una serie temporal más amplia (2000-2009) destaca que solamente cinco municipios del área de estudio (Torrejón de Ardoz, Ajalvir, Fresno de Torote, Valdeavero y Villalbilla) crecieron menos del 20% en superficie urbana, lo que, junto a lo expuesto, puede explicar la dinámica urbana del territorio. En primer lugar, se nota una clara influencia de las infraestructuras de comunicación, confirmada por la importancia del eje central en un primer momento (A-2), y de la ampliación de superficie urbana en Paracuellos del Jarama (ampliación M-50), así como la mejoría en la accesibilidad en el eje sur tras la construcción de carreteras de conexión con el municipio de Madrid y demás municipios del Corredor del Henares (como la M-224, inaugurada en 2011). Este último anuló la limitante topográfica que de cierta forma aislaba el eje sur ralentizando su ocupación.

Por otro lado, es evidente la influencia de la cercanía a Madrid, justificada por la especial ocupación de los municipios de su entorno inmediato, y en menor proporción, otros más aislados, como Valdeavero, Anchuelo, Santos de la Humosa y Santorcaz.

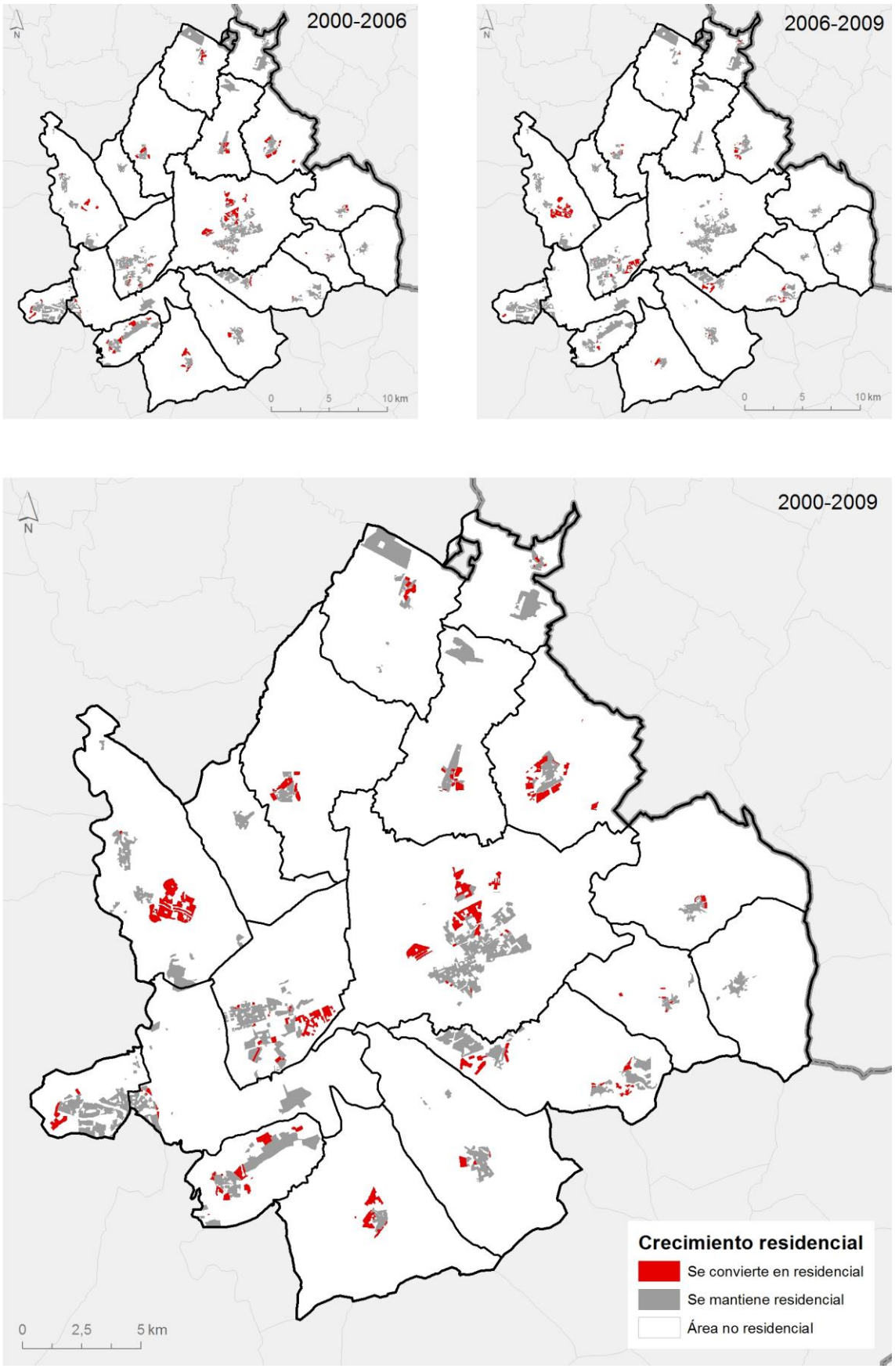
Al descender el nivel de detalle y seguir analizando el área de estudio, esta vez en función de las diferentes clases de usos del suelo urbano recién presentado, se observa la predominancia de suelo residencial, siendo en 2009 un alto porcentaje destinado a residencia unifamiliar (33,48%) y residencia multifamiliar (14,59%) seguido de áreas industriales (12,40%) (tabla 2.5).

Clase de usos del suelo	*Superficie (km^2)*	*Porcentaje respecto al total (%)*
Residencial unifamiliar	356,8	33,48
Residencial multifamiliar	155,5	14,59
Industria	132,1	12,40
Equipamientos	131,0	12,29
Infraestructura	116,1	10,89
Áreas verdes urbanas	86,4	8,11
Aeropuerto	56,5	5,31
Comercio	19,8	1,86
Servicios	11,6	1,08
Total urbano	**1.065,7**	**(13,28% del total)**
Total Corredor del Henares	**8.025,5**	

Fuente de información: MLU, 2010.

Tabla 2.5. Distribución de clases del suelo en el Corredor del Henares, 2009.

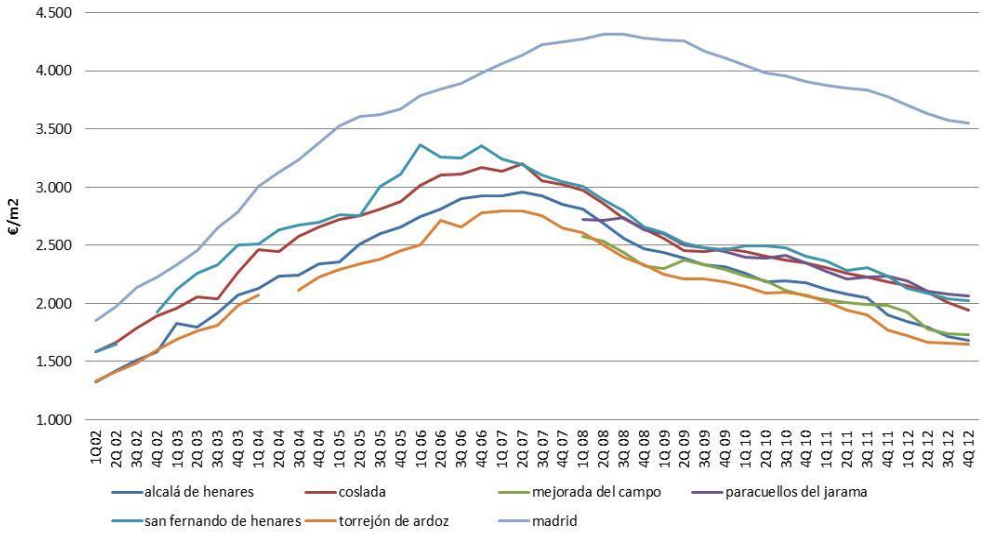
Si nos fijamos en los datos exclusivamente residenciales, se observa que el incremento de 71,8 km^2 de áreas residenciales se distribuye en las franjas periféricas de los centros urbanos de los municipios, con apenas crecimiento disperso (figura 2.6). El crecimiento residencial sigue patrones similares en ambos períodos estudiados, variando solamente su distribución espacial.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MLU, 2010.

Figura 2.6. Expansión de áreas urbanas, 2000-2006-2009.

Merece dedicar un par de párrafos para contextualizar brevemente la situación de la dinámica de compraventa de viviendas en los municipios del área de estudio. Es conocido que la burbuja inmobiliaria provocó un incremento importante del valor del suelo y del precio de la vivienda en los años de fuerte expansión. Los precios de compra de vivienda en este período aumentaron considerablemente, alcanzando los valores más elevados en el año 2006, cuando la curva alcanzó su tope para volver a bajar y el precio del metro cuadrado construido empezó a disminuir. La figura 2.7 ilustra estos cambios en algunos municipios del área de estudio (con curva similar), y en el municipio de Madrid.



Fuente: Idealista (www.idealista.com (último acceso: abril/2017).

Figura 2.7. Precio de compra de la vivienda entre 2002 y 2012.

Así como los indicadores mencionados de precio de vivienda y valor del suelo, la edificabilidad también acompaña la dinámica del mercado inmobiliario. Lo confirma la diferencia de número de licencias de obra nueva en el área de estudio, que fue de 5.390 en 1999 (año en el que se dio récord de construcción de viviendas) frente a solamente 1.697 en 2009 o 540 en 2010 (IESTADIS, 2014).

Concluimos que todo lo ilustrado y analizado en este apartado en cuanto a la ocupación del suelo, añadido a factores sociales y económicos (inmigración, oferta de empleo, coste de vida) se refleja directamente en el impacto urbano sobre el territorio. Para la gestión, adaptación y mitigación de estos impactos, hace falta crear instrumentos políticos eficientes en cuanto a la ordenación del territorio – o en su caso revisarlos o aplicarlos eficazmente – promoviendo una gestión más sostenible. Ambos, ocupación y planificación territorial, son temas clave para estudios de crecimiento urbano, objeto del modelo propuesto en esta tesis.

3. Gestión de la información espacial de referencia para la simulación

La selección de la información básica necesaria para el desarrollo de un MBA puede llegar a ser muy extensa, dependiendo del objetivo, de la escala o del comportamiento de los agentes que se quieran simular. Para desarrollar un modelo de simulación del crecimiento urbano en esta u otra área de estudio, serían necesarios datos actualizados, a detalle de sección censal o inferior. En términos generales, a grandes rasgos podríamos decir que la información mínima deseable y útil sería: población (volumen, poder adquisitivo, distribución), viviendas (cantidad, localización, precio, tipología), suelo (usos, clasificación valor, equipamientos, morfología) y otras complementarias (demandas por viviendas y suelo urbanizable, tendencias de ocupación, distribución de equipamientos, elementos protegidos, perfil político, aptitud para urbanizarse).

Sin embargo, la gestión de la información va más allá de la identificación de aquellas disponibles con sus características básicas, dado que debe considerar también una evaluación en cuando a su adecuación al modelo y su forma de integración, además de realizar los procesos correspondientes para su debida compatibilización a la plataforma elegida.

A continuación, describimos los procesos llevados a cabo, los inconvenientes que se han encontrado para nuestra área de estudio en concreto y las soluciones adoptadas, puesto que puede ser de utilidad para la aplicación de este modelo en otra área de estudio.

3.1. Plataformas para el desarrollo del Modelo Basado en Agentes

La plataforma de MBA que se utiliza en esta investigación es el *NetLogo*, versión 5.0.3 (Wilensky, 1999)[15], que dispone de una interfaz intuitiva y sencilla, y que a la vez permite la obtención de resultados muy visuales de los cambios producidos entre la situación inicial y la simulada. Entre sus principales ventajas, cabe destacar su distribución como software libre, el uso de un lenguaje de programación sencillo, y la existencia de una amplia comunidad de usuarios conectados y dispuestos a resolver dudas y compartir inquietudes.

Con respecto a las herramientas de tratamiento de la información geográfica, contamos con la potencialidad de los SIG, que están disponibles en una infinidad de programas, de la misma forma que contamos con diferentes plataformas de MBA. La capacidad de los Sistemas de Información Geográfica para gestionar y analizar información espacial es innegable. Destacan la recolección de datos, la compatibilización de formatos, la visualización simultánea de las diferentes capas de información y la posibilidad de consultar información asociada. La posibilidad

[15] https://ccl.northwestern.edu/netlogo/ (último acceso: abril/2017)

de aprovechar su capacidad de procesamiento para generar consultas y nuevas evidencias, producir resultados de segunda generación y realizar análisis espaciales lo convierte una herramienta de aplicación fundamental en estudios territoriales. El programa de utilizado en esta investigación es el *ArcGIS*, versión 10.3, que se encuentra entre los más populares y es considerado de los más completos de la gama de SIG.

No obstante, todavía es limitada su utilización en trabajos que cuentan con procesos dinámicos en el tiempo y en el espacio desde un enfoque *bottom-up*, que es, en esencia, lo que intenta modelar un MBA. Al mismo tiempo, las plataformas disponibles para desarrollo de MBA son todavía muy limitadas en cuanto a la representación y visualización de la información espacial. Por ello, todavía se hace necesaria la coordinación entre los programas específicos de visualización y procesamiento de datos (SIG) y aquellos de modelación (MBA) para potenciar las fortalezas y al mismo tiempo mitigar las debilidades de cada uno, y generar de forma conjunta un programa sólido donde se pueda contar con ambas funcionalidades.

La dinámica de utilización de ambos programas de forma coordinada se basa en contar con el *NetLogo* como referencia principal para la elaboración de los modelos que en sus últimas versiones permite intercambio directo con datos geográficos en formato SIG a través de una extensión específica. Con ellos es posible cargar, consultar y generar de datos espaciales desde el propio programa. Por otro lado, el *ArcGIS* se utilizaría no solo en etapas precedentes a la ejecución de modelo (para generar la información que exige procesamiento espacial previo) sino también en etapas sucesivas, cuando se hace necesario representar los resultados en mapas visualmente atractivos conteniendo todos los elementos cartográficos asociados, y cuya elaboración no puede ser fácilmente realizada con el *NetLogo*.

3.2. Datos espaciales de referencia

La creación de una base de datos de calidad tiene tanta importancia como el propio desarrollo conceptual del modelo, ya que sus características pueden influir en la calidad de los resultados. A continuación se presenta un listado de aquellos datos que jugarían un papel imprescindible en un prototipo de este estilo y las características y fuente de donde se podrían obtener (tabla 2.6).

DESCRIPCIÓN	ORGANISMO QUE ELABORA O SUMINISTRA	FECHA DE ELABORACIÓN	FORMATO	ESCALA	ATRIBUTO ASOCIADO
Delimitación administrativa municipal	Centro Nacional de Información Geográfica-CNIG	2008	vectorial (polígono)	1:3.000	Código y nomenclatura municipal
Delimintación de secciones censales	Instituto Nacional de Estadística-INE	2011	vectorial (polígono)	1:25.000	Código de la Sección Censal
Clasificación del suelo	Servicio Cartográfico Regional de la Comunidad de Madrid	2003, 2006	vectorial (polígono)	1:50.000	Clasificación del suelo
Cartografía de usos del suelo urbano de Madrid *(Madrid Land Use)*	Dpto. Geografía Humana - UCM (coordinación Prof. Dr. Javier Gutiérrez Puebla)	2010	vectorial (polígono)	1:10.000	Clasificación de usos del suelo urbano
Cartografía de usos del suelo (*CORINE Land Cover*)	Centro Nacional de Información Geográfica-CNIG	1990, 2000, 2006	vectorial (polígono)	1:100.000	Clasificación de usos del suelo
Productividad agrícola	Generación propia a partir del CLC2006	2013	raster	1:100.000	Clasificación propia*
Espacios Naturales Protegidos (ENP)	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)	2010	vectorial (polígono)	1:50.000	Figuras de protección
Red Natura 2000 (RN2000)	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA)		vectorial (polígono)	1:50.000	LIC, ZEPA
Infraestructuras Verdes (IV)	Unidad Docente de Geografía - UAH (Proyecto SIMURBAN)	2015	vectorial (polígono)	varias	Grado de protección
Modelo Digital del Terreno (MDT)	Centro Nacional de Información Geográfica-CNIG	2009/2010	raster	1:25.000	Altitud media del pixel
Mapa de pendientes	Generación propia a partir del MDT	2014	raster	1:25.000	Pendiente del pixel
Red hidrográfica	Centro Nacional de Información Geográfica-CNIG	2008	vectorial (linea)	1:25.000	Clasificación de la red hidrográfica
Red de carreteras	Centro Nacional de Información Geográfica-CNIG	2008	vectorial (linea)	1:25.000	Tipos de vías
Instalaciones peligrosas y no-deseables	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid / Base de Datos "NomeCalles"	2014	vectorial (punto)	BD de puntos (coordenadas geográficas)	Tipo de instalación no-deseable
Instalaciones educativas	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid / Base de Datos "NomeCalles"	2014	vectorial (punto)	BD de puntos (coordenadas geográficas)	Tipo de instalación educativa
Instalaciones sanitarias	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid / Base de Datos "NomeCalles"	2014	vectorial (punto)	BD de puntos (coordenadas geográficas)	Tipo de instalación sanitaria
Paradas de transporte público	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid / Base de Datos "NomeCalles"	2014	raster continuo	BD de puntos (coordenadas geográficas)	Tipo de medio de trasnporte
Portales	Sede Electrónica de la Dirección General del Catastro (SEC)	2013	vectorial (punto)	1:500/1:1.000	Número de edificación, número de viviendas
Ponencia de valores	Dirección General de Catastro, compilación propia	varias	vectorial (polígono)	1:500/1:1.000	Valor del suelo

* ver Tabla 4.1

Tabla 2.6. Listado de datos espaciales disponibles para la creación del prototipo

Cabe destacar que la mayoría de los datos de partida utilizados son obtenidos a partir de capas espaciales originadas en un SIG y expresados a nivel de pixeles (celdas de 50x50 metros), siguiendo el formato celular habitual de este tipo de modelos. En el caso del Corredor del Henares, el área de referencia suma 640 mil pixeles distribuidos en 800 líneas y 800 columnas.

No solo la información espacial, sino también la compilación de la información alfanumérica es esencial por estar estrechamente asociada a los datos espaciales que se utilizan, principalmente al tratarlos en un SIG. Aunque en su mayoría ya se encuentra integrada en formato de tablas de atributos vinculadas a la información espacial presentada, otros fueron proporcionados separadamente y asociados oportunamente. Es el caso de los datos de población del Censo de 2001 que se pueden encontrar relacionados con la capa de municipios, secciones censales o portales.

En nuestro caso concreto, de modo general, se puede afirmar que las bases de datos de referencia para la Comunidad de Madrid son relativamente amplias, y están, en su mayoría, disponibles a través de organismos oficiales estatales o autonómicos[16]. En este sentido, hemos de destacar el esfuerzo que la administración pública ha realizado en los últimos años para facilitar el acceso a una importante cantidad de información espacial y estadística.

3.3. Soluciones adoptadas para solventar las limitaciones de la información espacial disponible.

Se hizo necesario realizar una serie de procesamientos espaciales para llevar a cabo la adaptación y compleción de la base de datos definitiva, debido a las limitaciones en cuanto al acceso a la información, o a la diferencias de necesidad en cuestión de escala. Esta deficiencia se observa principalmente en respecto a los datos de carácter económico que nos serviría para caracterizar y simular apropiadamente la expansión urbana que depende de información como renta de población, precios de viviendas y valor del suelo. Tales datos no se encuentran disponibles por ser considerados sensibles desde el punto de vista de los organismos públicos que los elaboran. Dada la imposibilidad de agregar directamente esta información a las demás existentes, subsanamos esta laguna complementando parcialmente la base de datos tras una serie de procedimientos espaciales que presentamos a continuación.

[16] Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), Dirección General de Catastro, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

Precio de viviendas

Los datos de precios de viviendas no están disponibles por sección censal u otra unidad más detallada, ni en formato de acceso libre y tampoco bajo petición académica oficial; así que, dada la importancia de su incorporación al modelo, se hizo necesario proponer una adaptación espacial. En un primer momento, eran conocidos datos puntuales de valor de compra de viviendas por Idealista[17] para el año 2012, que tras consideraciones de mercado y variando porcentajes para simular situación a 2006, constituía una base de datos puntual con los atributos correspondientes. Debido a que es generada según demanda, los puntos no se distribuían a lo largo de todo el Corredor del Henares, sino cubrían principalmente aquellas áreas más dinámicas del eje. Se realizó una interpolación con esta información para toda el área de estudio, y al clasificar en tres umbrales, el resultado obtenido resultó ser demasiado grosero. Tras ejecuciones frustradas del modelo con esta información (los datos insuficientes generaban información sesgada), optamos por considerar como precio de vivienda (y así mencionado a lo largo de este documento) la información existente de valor del suelo, aunque se conoce la diferencia conceptual entre ambos conceptos.

Valor del suelo

Como norma general, el suelo urbano en España se valora aplicando un importe de repercusión a la superficie de construcción real (para suelo edificado) o potencial (para suelo sin edificar). Existen algunas capas espaciales disponibles que contienen información sobre los valores del módulo básico de repercusión del suelo[18] (en €/m2). Dicha información teóricamente debería ser de acceso público y estar disponible en formato digital, sin embargo, aunque lo primero sea cierto, el segundo no lo es. Para la mayoría de los municipios, se hizo necesaria una consulta presencial a la Dirección General de Catastro para compilar los datos de valor del suelo. Debido a su precariedad (datos analógicos mal conservados y constando de información incompleta o en algunos casos inexistente), se optó por realizar una digitalización aproximada de lo disponible, asociando polígonos (forzando su coincidencia con las secciones censales) a valores tabulares de referencia. Esta información adaptada al formato digital, la asociamos a las demás, generando una capa final correspondiente al valor del suelo. Visto que el objetivo no es la valoración en sí, sino la diferenciación de las viviendas en tres clases según su precio sea alto,

[17] Herramienta de búsqueda de viviendas para compra, con estadísticas disponibles al usuario general. www.idealista.es (último acceso: abril/2017).

[18] El Módulo Básico de Repercusión del suelo correspondiente a las distintas áreas económicas homogéneas (MBR). La Circular 01.04/13/P de la Dirección general del Catastro asignó, para el año 2013, valores de repercusión que van desde los 37,80 euros por metro cuadrado que corresponden al MBR-7 hasta los 1.700,00 euros por metro cuadrado que corresponden al MBR-1.

medio o bajo, utilizamos este nuevo dato para representar sus diferentes estándares – al cual también nos referimos como tipología de la edificación.

Las tres tipologías utilizadas se definen según lo siguientes umbrales: consideramos como alto estándar aquellos pixeles con valor superior a 600€/m2, medio estándar aquellos entre 300 y 600€/m2 y bajo estándar los inferiores a 300€/m2. Destacamos que se refieren a valores de referencia y no indica el precio real de la vivienda.

Poder adquisitivo de la población

La información sobre renta de la población tampoco se encuentra disponible al nivel de detalle necesario (sección censal). Es posible encontrar información, no obstante desactualizada y a nivel muy general y que, por lo tanto, no reflejan la situación económica que se desea representar. Considerando que la población se distribuye a lo largo de las viviendas existentes (clasificadas en tres grupos según su precio), se optó por considerar como nivel de renta la misma clase alta, media o baja de su vivienda habitual. Este recurso de suponer la coincidencia entre los precios de viviendas y las condiciones económicas de la población fue adoptado tras la imposibilidad de acceder a fuentes más específicas.

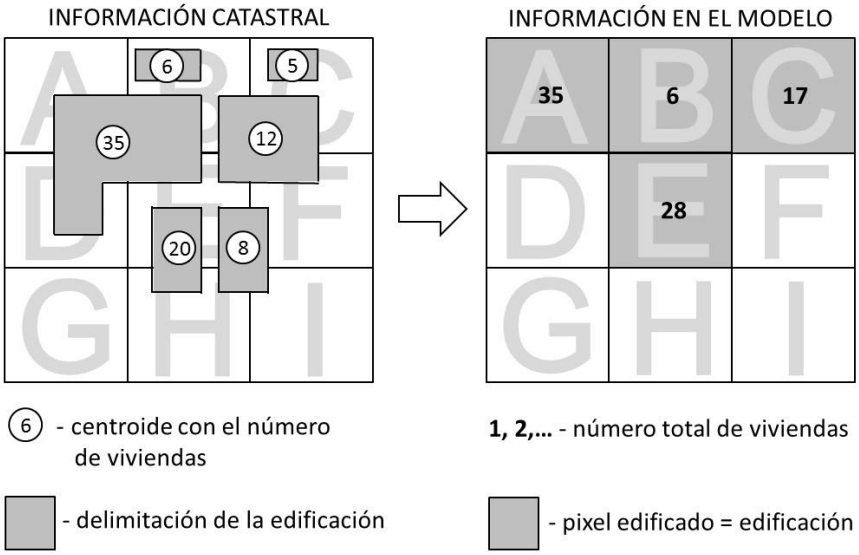
Es importante tener en cuenta que dichas soluciones influyen indirectamente en la caracterización de la información de salida de los modelos. En cualquier caso, con la colección definitiva de los datos de partida consideramos que es posible proponer un modelo que representa una herramienta práctica de simulación del crecimiento urbano en el Corredor del Henares.

Transformación de información vectorial poligonal a raster

Por otro lado y asimismo relacionado a la calidad y precisión de los datos de partida, vale mencionar la típica generalización o desagregación necesarias al convertir datos originalmente en formato vectorial a raster. Aunque pueda tratarse de una solución sencilla, en muchos casos supone un esfuerzo importante de geoprocesamiento. La pérdida de detalle en esta transformación es inevitable, y por ello muchos investigadores se dedican a desarrollar diferentes metodologías para realizar este tipo de procesos de forma rigurosa (Cocero Matesanz *et al.*, 2006, Diaz-Pacheco y Gutiérrez, 2014, Santos Preciado, 2015). Es el caso de la distribución de edificación, viviendas y población por pixel que se presenta a continuación.

El dato de partida en cuanto al número de viviendas son los polígonos que delimitan cada edificación en el área de estudio, obtenida de la Dirección General de Catastro, y que está clasificada según uso residencial, comercial, industrial u otros. En este caso, y siendo conscientes de las limitaciones, el primer paso fue pasar toda la información asociada al polígono correspondiente a las edificaciones residenciales a su centroide para obtener una capa vectorial puntual. Sabemos que la heterogeneidad en cuanto a la delimitación de las edificaciones puede generar pérdidas importantes de precisión al igualar su representación y reducirlos a un único

punto, aunque lleve asociada información que los diferencie. Es el caso del pixel D en la figura 2.8, que aunque contenga una extensión importante de edificación, no se considera como edificado en el modelo. También podría haber el caso de que el pixel B contuviera más de 6 viviendas (información no deducible), sin embargo no se considerarán en nuestro modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.8. Generación del dato de edificación y viviendas por pixel.

A partir de este procesamiento, se entiende que un pixel puede contener un determinado número de viviendas, así como un determinado número de edificaciones. Sin embargo, consideramos `con edificación´ todas las unidades que contengan al menos una vivienda, mientras las demás la entendemos como `sin edificación´. Conceptualmente se trata de una unidad de pixel edificada o no, más que la suma de edificaciones que contiene cada unidad, dado que esta información no es relevante para el modelo. A lo largo de este documento lo denominamos simplemente edificación. Por lo tanto, a lo largo de esta investigación, al mencionar edificación, se entiende que hace alusión a esta unidad edificada.

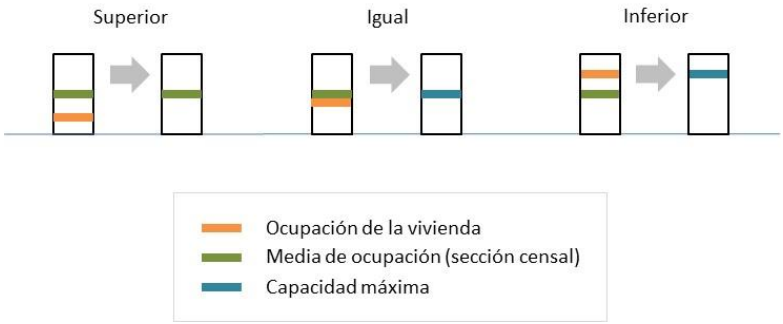
La distribución de la población, disponible originariamente por secciones censales es otro buen ejemplo de la transformación de polígonos a raster. El procesamiento espacial trata de sumar el número de viviendas de cada sección censal, para posteriormente distribuir la población de forma homogénea, resultando en un número diferente de población en cada pixel en función del número de viviendas existente en cada uno.

Transformación de información vectorial lineal a raster

Las transformaciones del formato lineal resultan ser menos conflictivas ya que los elementos como carreteras o red hidrográfica son usados únicamente como referencia espacial. Sin embargo, los mapas de proximidad a estos elementos lineales constituyen información fundamental sobre la cual los agentes toman decisiones, y cuyas capas se generan en formato raster considerando la menor distancia desde el centroide del pixel hasta el elemento de referencia.

Definición de la capacidad máxima de población por pixel

Otro proceso que merece la pena destacar es la solución encontrada para definir la capacidad máxima de población por pixel que será usada en uno de los submodelos que se presentarán más adelante. Para esto, se ha sumado el número de población y el número de viviendas en cada sección censal seguida de su división uno por el otro, lo que define la media de población por vivienda en cada sección censal. Se ha grabado esta información en cada pixel para proceder el cálculo de su capacidad máxima conforme esta media sea superior, igual o inferior a la ocupación, como indicado en la figura 2.9.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.9. Generación de la información sobre capacidad máxima de población por pixel.

Independiente si la razón es escasez de información, adecuación de formatos o necesidad de información de segunda generación, este apartado se dedicó a introducir la base de datos disponible y presentar algunos ejemplos de generación de información y principales procesamientos espaciales que se hicieron necesarios para alimentar el MBA con una base de datos suficiente e información relevante.

CAPÍTULO 3.

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO MEDIANTE UN MODELO BASADO EN AGENTES

1. Introducción

Esta investigación se centra en la aportación de los MBA a la exploración del fenómeno de crecimiento urbano a escala supramunicipal y al mejor entendimiento de esta dinámica, a través de la creación de un prototipo que pueda, entre otras cosas, apoyar y mejorar las tareas de planificación en los municipios. Como se ha mencionado, el ensayo se aplica sobre el Corredor del Henares, cuyo conjunto de 18 municipios presenta características singulares de planificación y ocupación urbana (detallados en el Capítulo 2), que la hacen atrayentes para proceder a su simulación.

La necesaria planificación del territorio del área de estudio puede fácilmente apoyarse en herramientas de simulación, especialmente en los MBA, por todo lo dicho anteriormente. El tipo de escenario planteado para ello es el de la simulación prospectiva de carácter exploratorio, idóneo para realizar análisis espaciales con enfoque urbano. Sin embargo, no está suficientemente explorada en el ámbito urbano como parte del proceso de planificación en España en general, y en la CM en particular (Fernández Güell, 2011). Aun así, podemos encontrar algunos estudios

que se centran en explicar la expansión urbana de la CM, en identificar sus principales factores o en definir patrones de crecimiento.

Algunos de ellos proponen proyectar posibles desarrollos futuros a través de la modelización urbana utilizando distintas metodologías. Por ejemplo, Barredo Cano y Gómez Delgado (2008) proponen tres escenarios urbanos futuros basados en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) aplicados a la región de Madrid, simulados a partir de un modelo basado en AC. Otro ejemplo son los resultados del proyecto europeo TiGrESS (Encinas *et al.*, 2006) que muestran un modelo conceptual de cambio de usos del suelo en la CM. En el proyecto SIMURBAN[19], se aplican técnicas de evaluación multicriterio y modelos basados en autómatas celulares para simular tres escenarios diferentes de crecimiento urbano de la CM (Plata Rocha *et al.*, 2010, Plata Rocha *et al.*, 2011). En su segunda edición la escala ha descendido y se están aplicando modelos a escala supramunicipal, siendo este modelo uno de ellos. Por otro lado, Gallardo y Martínez Vega (2012) aplican el modelo CLUE e IDRISI *Land Change Modeller* para estudiar y proyectar cambios de varios usos del suelo también en la CM. Asimismo, en el trabajo reciente de Van Delden *et al.* (2012) se emplean los AC con el modelo METRONÁMICA de RIKS (*Research Institute for Knowledge Systems*), para simular la expansión urbana regional. Estos son algunos ejemplos de aplicaciones que comparte características con el presente trabajo, y que además se aplican a prácticamente el mismo ámbito geográfico. Sin embargo, se desconoce la existencia de una aplicación específica de MBA para la simulación urbana en España.

Con vistas a suplir parcialmente esta necesidad y realizar una primera aportación en este sentido, se desarrolla a continuación el diseño conceptual de un MBA, que presenta el desarrollo de un modelo de la expansión urbana en el Corredor del Henares, intentando mostrar su utilidad como herramienta alternativa de apoyo a la planificación urbana.

En el prototipo que se propone, es fundamental considerar las características del área de estudio para justificar la definición de la estructura básica del modelo y, de esta forma, hacerlo fácilmente aplicable a cualquier otra área de estudio con características similares. Por lo tanto, este análisis trata de entender qué agentes son los más apropiados según el panorama de planificación urbana en España. El modelo conceptual considera entonces estos agentes y sus atributos asociados, los elementos de atracción del entorno, así como las reglas de comportamiento resultantes de su interacción. Se hace especial hincapié en la cuestión de la disponibilidad de datos teniendo en cuenta las necesidades del modelo, el área de estudio y la escala aplicada. Además, se presentan los componentes particulares que luego conforman el

[19] Proyecto SIMURBAN2: Instrumentos de geosimulación y Planificación Ambiental en la Ordenación Territorial de Ámbitos Metropolitanos. Aplicación a Escalas Intermedias. http://www.geogra.uah.es/simurban/ (último acceso: abril/2017)

modelo práctico, definidos a partir de la justificación de su elección, así como de la descripción de la relación que tienen con el desarrollo urbano en el área de estudio, que vendrán a ser las reglas de comportamiento concretas de los agentes. De forma transversal para todas las etapas, se hace necesaria una exhaustiva labor de análisis de datos, ya que la correcta elección y justificación de cada componente del modelo es fundamental para alcanzar resultados satisfactorios.

2. Diseño de un MBA para el Corredor del Henares: justificación y metodología

El diseño de un MBA debe tener en cuenta la dinámica urbana del área de estudio, que a su vez ayuda a identificar los principales agentes involucrados en el proceso de expansión, así como su comportamiento. De este modo, es posible definir una serie de reglas de decisión que se generarían a partir de información territorial, social y económica. En este sentido, se resumen a continuación los principales indicadores del proceso de crecimiento urbano experimentado en la Comunidad de Madrid – y por lo tanto también en el Corredor del Henares – extraídos a partir de los análisis realizados en el Capítulo 2, que nos ofrece los fundamentos necesarios para desarrollar una serie de suposiciones y evidencias territoriales que se exponen a continuación.

- *La disociación entre crecimiento demográfico y expansión urbana*. Aunque la evolución urbana en un territorio, en teoría, debe estar estrechamente relacionado con el crecimiento demográfico, generando una relación directa entre la oferta y la demanda, se observa que en España en general, y en la Comunidad de Madrid en particular, ambas líneas evolutivas divergen considerablemente, produciéndose un aumento del suelo urbano no justificado por el aumento de población registrado, sustentado, como todo apunta, por las elevadas ganancias económicas generadas con la burbuja inmobiliaria a finales de los 90 del pasado siglo y primera mitad de la década de 2000 (OSE - Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2010).
- *La dinámica acelerada de la promoción inmobiliaria.* La promoción de viviendas por parte de pequeños agentes inmobiliarios ha cedido el paso, con la concentración económica típica de los países de producción capitalista, a grandes empresas que necesitan realizar operaciones inmobiliarias importantes para rentabilizar al máximo la inversión de capital (Santos Preciado *et al.*, 2012).
- *La influencia del incremento de las infraestructuras de transporte* para atender a la población – o para suplir la necesidad generada por las nuevas viviendas en el proceso de crecimiento urbano – es otro de los grandes motivadores del desarrollo urbano. La demanda de transporte público está influenciada por las características de la oferta, sobre las cuales el gestor del transporte puede incidir (como las velocidades o nivel de servicio),

y por variables externas (distribuciones de población y empleo, mezcla de usos del suelo, diseño urbano, etc.) (Cardozo *et al.*, 2010). Por otro lado, también es sabido que la mejora y ampliación de infraestructuras son determinantes en la expansión de zonas urbanas (Serrano Cambronero *et al.*, 2002, López de Lucio, 2003, Plata Rocha *et al.*, 2010).

- *El diseño de nuevos planes generales de ordenación*, responsabilidad del sector público municipal y labor de planificadores urbanos, que, en teoría, trabajan con vistas a un crecimiento controlado y sostenible. Estos planes regulan la estructura y clasificación de los usos del suelo dominantes en la ciudad (residencial, industrial, comercial, etc.), así como los viarios fundamentales y la localización de las principales dotaciones urbanísticas (Santos Preciado *et al.*, 2012).
- *Los aspectos legislativos que actúan sobre el uso del suelo* son fundamentales para la inducción o retención de la expansión urbana desmedida. La anterior legislación de usos del suelo (Ley 6/1998), de carácter más permisivo, comprometía el territorio protegido, vacío, o con otros tipos de usos no urbanos. La actual ley del suelo (Ley 8/2007) introduce una serie de modificaciones, entre ellas la caracterización del suelo como recurso a proteger.
- *La apertura de medios legales para adquirir préstamos y la facilidad de disponer de créditos financieros*, sea por parte de la población o por los promotores inmobiliarios, induce a una fase desarrollista, frenada forzosamente solamente al estallar la crisis financiera.
- *El punto anterior se refleja directamente en la dinámica de subida de precios por la compra-venta de inmuebles y alquiler de viviendas*, incidiendo en una fuerte especulación inmobiliaria, que a su vez induce a un cambio de perfil de ocupación de alto nivel en regiones específicas, y al mismo tiempo la expulsión a la periferia de la población de rentas más bajas.
- *La heterogeneidad en cuanto a la geomorfología en la CM* produce intereses adversos en el proceso de expansión urbana. La sierra al noroeste de la región funciona como elemento de atracción y produce una concentración de segunda residencia y urbanizaciones, mientras las áreas más llanas del sudeste, aunque tengan características de calidad de suelo menos favorables, inducen la construcción de residencia popular con precios más accesibles, y consecuente ocupación por población de renta más baja.
- *La distribución equitativa de equipamientos púbicos de educación, salud y ocio* es un elemento que se tiene en cuenta por parte de la población para ubicar su residencia. La proximidad a estos equipamientos puede generar una mayor demanda en determinadas regiones más que en otras.

- *La evolución de la red de Espacios Naturales Protegidos* (ENP) en contrapunto a lo presentado previamente, restringe las áreas de crecimiento urbano, confirmando su rol y sirviendo de protección y conservación de patrimonio natural y paisajístico. Por otro lado, los ENP valorizan (y atraen) áreas urbanas en su vecindad inmediata.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se propone a continuación una estructura conceptual de MBA para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares, considerando la integración entre la caracterización del fenómeno, el área de estudio, así como los aspectos formales del modelo. Conforme se expuso en el marco teórico, los MBA se componen básicamente de tres elementos principales: agentes, variables y reglas de comportamiento, diseñados en función del área de estudio, del objetivo del modelo y de datos existentes. A continuación abordamos cada componente en un apartado independiente, con el objetivo de facilitar la comprensión de lo que son y cómo funcionan en el contexto del modelo propuesto, así como de entender mejor cuáles son sus aportaciones en general.

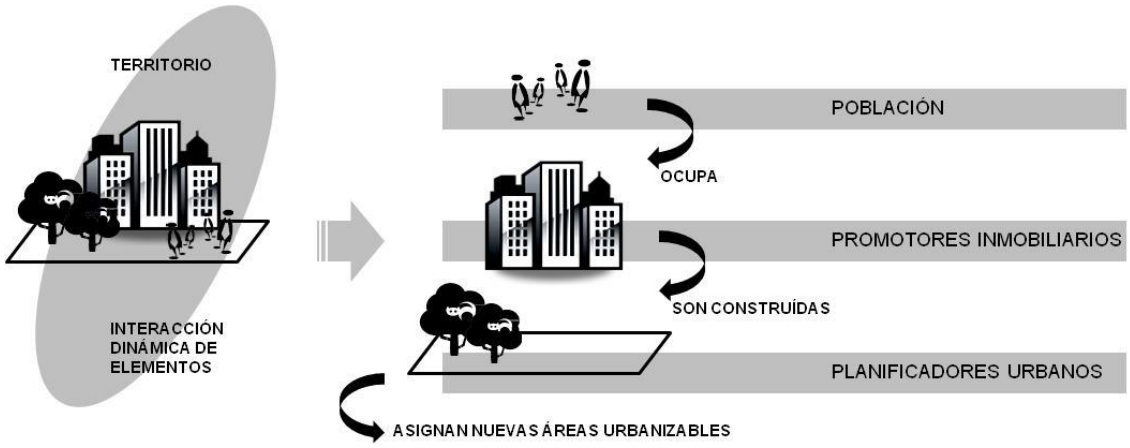
2.1. Agentes

Tras una reflexión sobre lo expuesto, y considerando que el primer paso para desarrollar el modelo es definir y concretar qué agentes son aquellos cuya toma de decisiones finalmente podrían producir un cambio real en el territorio en cuanto a la expansión urbana, se presentan las evidencias de su estructura funcional. Destacamos que la elección de los agentes considera, entre otras cosas, (i) el histórico territorial-cultural del área de estudio, que en este caso indica la fuerte relación con Madrid, (ii) el fenómeno estudiado de expansión urbana acelerada, (iii) la escala que toma como referencia el ámbito supramunicipal, así como, y principalmente, (iv) el enfoque que se quiere dar a la modelación, que viene a ser simulaciones que sirvan de apoyo a la planificación urbana, y como se ha presentado en la introducción de este documento, como una herramienta exploratoria para simular diferentes propuestas de futuro.

Al elegir una escala supramunicipal para aplicar el modelo, el abanico de opciones de tipos de agentes se restringe considerablemente. Por ejemplo, los agentes no se configuran como individuos independientes, sino como agregación de individuos con características similares. En este sentido, se definen finalmente los tres agentes del modelo: la población, los promotores inmobiliarios y los planificadores urbanos. En esta propuesta entendemos que los tres grupos estimulan simultáneamente el fenómeno de ocupación urbana de acuerdo a una serie de elementos que inducen o limitan esta ocupación sobre el territorio (Cantergiani, 2011a).

La influencia de estos tres agentes sobre el desarrollo urbano se basa en relaciones de oferta y demanda de áreas urbanizables, edificación residencial y cercanía o ampliación de otros elementos de interés como infraestructuras, equipamientos urbanos o áreas verdes. Sus acciones

se configuran en un ciclo que, aunque no genera elementos de competición directa, se retroalimenta según cómo reaccione uno u otro agente o grupo de agentes (figura 3.1). Esto es, los planificadores asignan nuevo suelo urbanizable (teniendo en cuenta aquel territorio que todavía no está urbanizado); los promotores urbanos buscan, dentro de las áreas clasificadas como urbanizables, áreas de interés para nueva construcción de viviendas (según los intereses del mercado); por último la población elige su lugar de residencia (considerando la oferta de viviendas nuevas y vacías).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1. Interacción de los agentes que inducen el crecimiento urbano.

En este sentido, la entidad *población* es uno de los principales motores del modelo, generando la demanda de nuevas viviendas y la consecuente expansión urbana. Estos agentes se distribuyen en tres grupos que difieren considerablemente en cuanto a las decisiones que subyacen la elección del nuevo lugar de residencia (en función de sus intereses y necesidades). Aunque puede haber diferentes agrupaciones de población por poder adquisitivo, ciclos de vida, rangos de edad, etc., elegimos la primera para la creación del prototipo por ser usado comúnmente en modelos celulares, definir claramente diferentes comportamientos y acotar el nivel de complejidad del modelo considerando solamente tres clases. Por lo tanto este agente se define según su poder adquisitivo familiar (nivel de renta alta, media o baja) que en el modelo propuesto reflejará la dinámica territorial de los cambios residenciales, y cuya agrupación también es compartida por otros autores (Aguilera y Ugalde, 2007, Barros, 2012). También se pueden encontrar en la literatura de modelación urbana ejemplos de las otras agrupaciones de agentes: de población según edad (Fokkema y VanWissen, 1997) o ciclos de vida (soltero, casado sin hijos, casado con hijos, jubilado, etc.) (Dieleman, 2001, Fontaine y Rounsevell, 2009, Jordan *et al.*, 2012), las cuales no se consideran en esta investigación.

Por otro lado, los *promotores inmobiliarios* son aquellos actores que promueven la construcción de nuevas viviendas, y que podrían actuar según la capacidad financiera de la empresa, estatus o experiencia de mercado, entre otros. Sin embargo, y para simplificar, en el modelo se asume que todos los promotores inmobiliarios presentarán idéntico comportamiento, y por ello se representan a través de un tipo único.

Por último, el tercer agente del modelo son los *planificadores urbanos* debido a su rol en la elaboración de Planes Urbanísticos y de Ordenación del Territorio. Su comportamiento podría diferenciarse según la orientación política o directrices urbanísticas, por ejemplo, sobre todo considerando el nivel municipal, pudiéndose presentar en cada municipio un comportamiento distinto. No obstante, así como para los promotores inmobiliarios y para este primer planteamiento, se asume que los planificadores urbanos presentan idéntico comportamiento, y por lo tanto también son de un único tipo.

2.2. Variables

Además de tener claro cuáles son los agentes que interactúan entre ellos y con el entorno, hace falta definir claramente una serie de reglas que guíen su comportamiento por agrupaciones. Estas reglas deben representar el proceso de toma de decisiones de cada tipo de agente según las suposiciones consideradas. Para ello, es fundamental tener en cuenta los principales intereses espaciales de cada uno y los factores que les motivan a actuar de una determinada forma.

A continuación, se presenta un listado (tabla 3.1) de lo que se considera que serían los principales elementos de atracción (espaciales y no espaciales) asignados a cada uno de los tres agentes planteados, teniendo en cuenta las características del área de estudio. Para la elaboración de este listado, que siempre resultará incompleto, se ha tomado como referencia la revisión de trabajos en los que se definen de alguna forma las variables de atracción para el crecimiento urbano teniendo en cuenta diferentes objetivos y enfoques (Plata Rocha *et al.*, 2009), así como el conocimiento del área de estudio por parte de los expertos involucrados en esta investigación (Proyecto SIMURBAN2).

Agente	*Elementos de atracción*
Población	▪ Existencia de viviendas libres y/o nuevas ▪ Cercanía a: o infraestructura viaria o accesibilidad al transporte público o centros comerciales o áreas urbanas consolidadas o equipamientos públicos de salud y educación ▪ Precio de la vivienda accesible de acuerdo a la renta de cada grupo ▪ Proximidad a grupos sociales semejantes ▪ Calidad de vida – cercanía a parques urbanos y espacios de ocio
Promotores inmobiliarios	▪ Disponibilidad de terrenos para urbanizar, obedeciendo a: o clasificación de suelo apropiada (según legislación vigente) o geotecnia adecuada para la construcción ▪ Configuración territorial atractiva para la población o accesibilidad y movilidad (infraestructuras y transporte público) o densidad de edificación ▪ Valoración del suelo accesible de acuerdo a los medios económicos ▪ Cercanía a áreas urbanas consolidadas
Planificadores urbanos	▪ Disponibilidad de terrenos no productivos ▪ Cercanía a: o áreas urbanas consolidadas o infraestructura viaria o equipamientos públicos de salud y educación ▪ Disponibilidad de áreas sin protección legal (ENP, redes hidrográficas) ▪ Lejanía a equipamientos molestos y peligrosos (no deseables) ▪ Geomorfología (pendientes no demasiado elevadas)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.1. Agentes y elementos de atracción espacial.

Aunque este listado estaría pensado para desarrollar el modelo en una situación hipotética ideal, es conveniente hacer alguna alusión a la dificultad que puede suponer reunir la información para el desarrollo práctico del modelo. La traducción del modelo conceptual al modelo práctico en la etapa de implementación sugiere una serie de reconsideraciones y acotaciones en cuanto a la definición de cuáles serían finalmente los elementos de atracción de cada tipo. Por supuesto que la selección de estos elementos seguirá los intereses particulares de los agentes en cada situación, conforme, no sólo las preferencias presentadas en la tabla, sino también la disponibilidad de la información necesaria para el desarrollo del modelo.

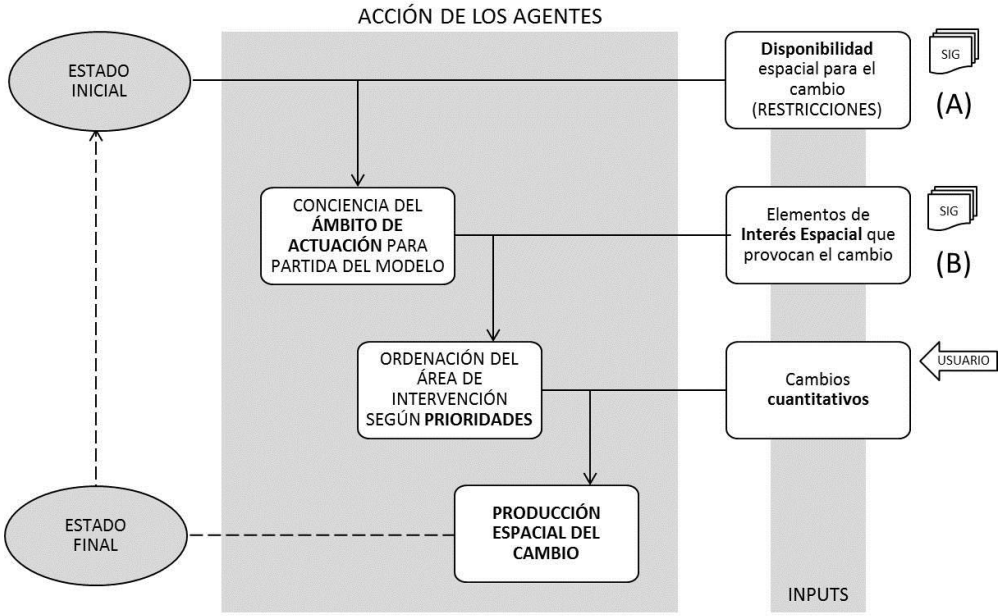
Para que se puedan realizar los análisis propuestos en base a las variables expuestas, es necesario un trabajo exhaustivo de compilación de esta información. A destacar la importancia de contar con datos espaciales y herramientas asociadas, debido a que el modelo es dinámico y se basa en la distribución de sus elementos y características en forma de celdas que interactúan entre ellas y generan una nueva respuesta espacial. Una vez más, reforzamos la idea de que los SIG son herramientas fundamentales para elaborar una base de datos de referencia para el modelo, que será consultada internamente por los agentes.

Sin embargo, es evidente que no todos los datos disponibles se adaptan perfectamente al modelo diseñado, por lo que es necesario un análisis escrupuloso y exhaustivo de los datos existentes en función del modelo propuesto y de los resultados esperados. También reiterar que existe una amplia cantidad de información oficial que no se encuentra todavía disponible para uso externo a los organismos productores, y cuya incorporación al modelo hubiera sido fundamental (ej.: información económica sobre renta).

2.3. Reglas de comportamiento

Tras definir los agentes, identificar su estado de insatisfacción, necesidades particulares o interés por el cambio (que induce el proceso a simular), reconocer la disponibilidad interna y externa para la materialización de este posible cambio, e identificar los elementos de atracción espacial y datos disponibles, faltaría definir las reglas de comportamiento para concluir el diseño del modelo teórico-conceptual. Todos estos elementos se complementan y actúan de forma integrada, a su vez reflejando el comportamiento de cada agente y del sistema, lo que produce finalmente los resultados de la simulación.

La traducción de la conceptualización del modelo presentado en los apartados anteriores, al modelo práctico, ya teniendo en cuenta su aplicación para el Corredor del Henares y considerando los datos disponibles, exige naturalmente una serie de pequeñas adaptaciones. De esta forma, se presenta a continuación para cada agente, la elección final de los elementos para la toma de decisiones particular de cada uno y de los componentes de atracción que se consideran en la implementación del modelo. Cabe destacar que la estructura de acción es la misma para todos (figura 3.2), partiendo de una situación inicial con unas determinadas restricciones espaciales (A), que a través de la interacción con el medio y de los intereses propios (B), alcanza un estado final donde se refleja el cambio producido. Por la dinámica intrínseca de los MBA, el estado final vuelve a actuar como estado inicial en la etapa subsecuente.

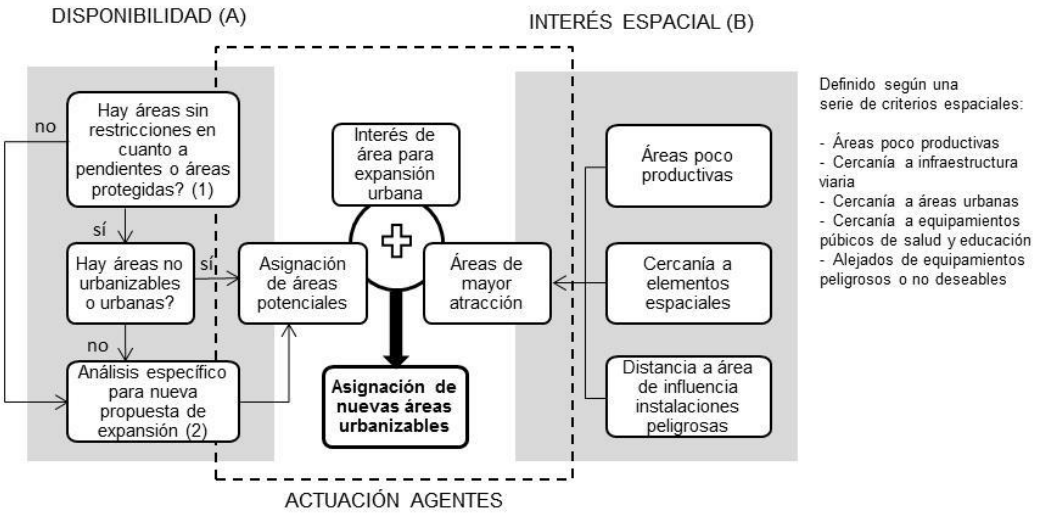


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2. Esquema del proceso de decisión de los agentes.

En el caso del proceso de los agentes **planificadores urbanos**, que optan por asignar nuevas áreas urbanizables a la clasificación del suelo, el agente parte de una clasificación inicial de usos del suelo (urbano, urbanizable, otros). Como restricción espacial (A), considera todo aquello que no se podrá asignar como nuevo suelo urbanizable (áreas protegidas como franja a lo largo de los ríos o Espacios Naturales Protegidos, carreteras, pendientes superiores a 10% y áreas ya urbanas o urbanizables). Los elementos de interés (B) para estos agentes son: cercanía a carreteras y equipamientos públicos, distancia a instalaciones no deseables y/o peligrosas (vertederos, gasoductos, cárceles, plantas de tratamiento de residuos, etc.), productividad del terreno (buscan no ocupar terrenos con alta productividad agrícola), existencia de áreas urbanas consolidadas (optimización de recursos públicos, por ejemplo: seguridad, transporte, equipamientos urbanos), que según la dinámica histórica del Corredor del Henares representa el comportamiento general de planificadores urbanos.

Para una mejor comprensión de cómo se producen las acciones de los planificadores urbanos, se adelanta un resumen del modelo conceptual de su dinámica de comportamiento (figura 3.3). Aunque se introduzca de manera resumida, el flujo detallado se presentará en los capítulos dedicados a la descripción y comportamiento específicos de este agente.

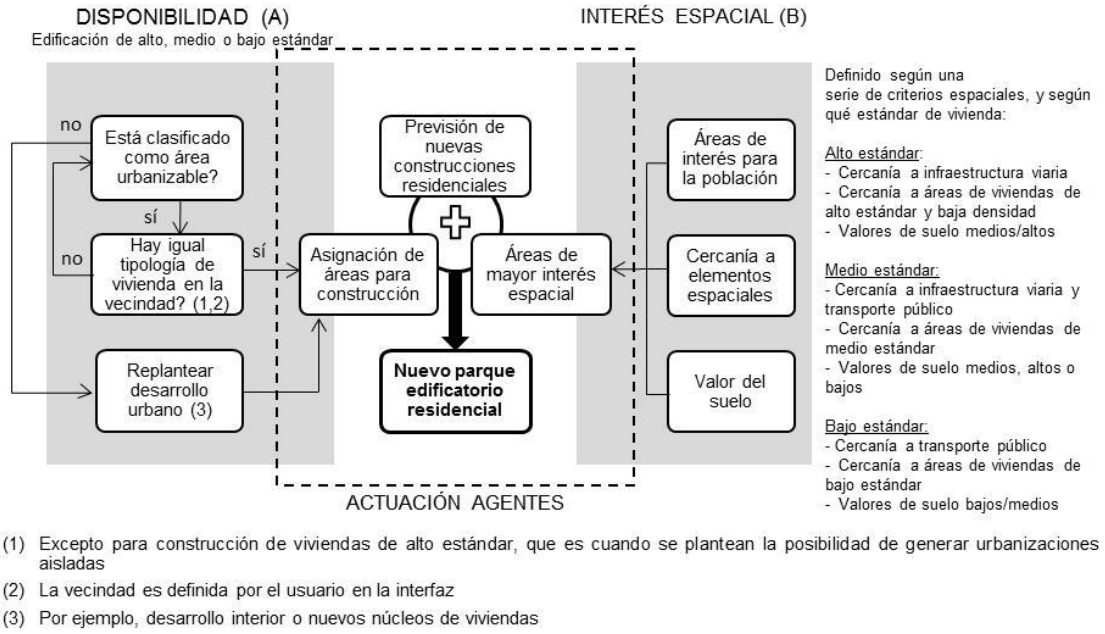


(1) Pendiente máxima del 10% y Espacios Naturales Protegidos
(2) Nuevas propuestas de ampliación de áreas urbanizables en regiones no inicialmente planteadas (ej. Creación de núcleos aislados, ocupación de áreas con determinada restricción)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3. Modelo conceptual de decisión del agente planificador urbano.

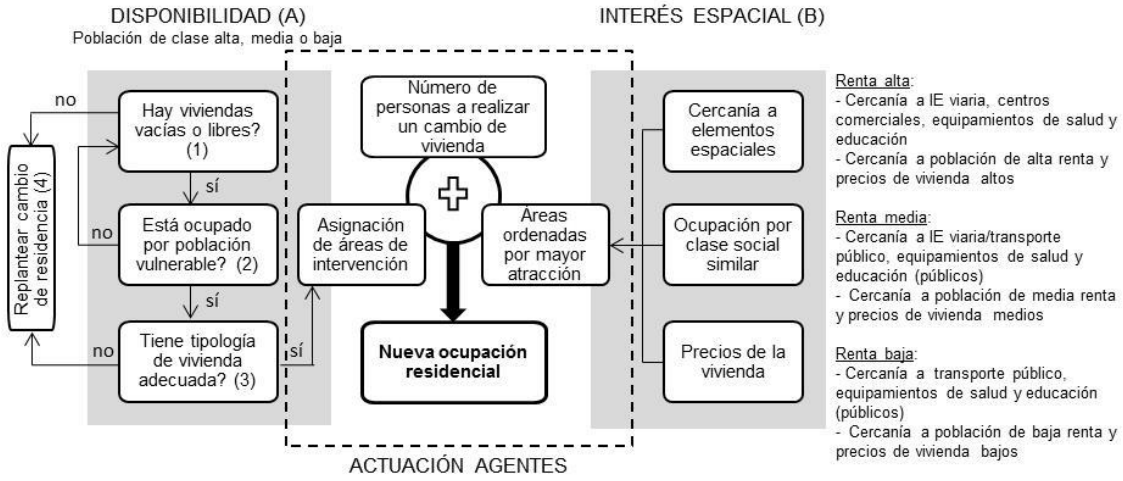
Para el segundo agente, los **promotores inmobiliarios**, el esquema es similar. El objetivo en este caso es la construcción de nuevas residencias en áreas asignadas como urbanizables, lo que a su vez ya indica la restricción espacial (A). En este caso, la construcción puede enfocarse a diferentes estándares (alto, medio o bajo), según interés y la situación del mercado inmobiliario en el momento de la decisión. Como elementos de atracción (B), se consideran: cercanía a carreteras, transporte público y áreas urbanas consolidadas, la densidad de edificación y, principalmente, las características de la vecindad. Así como para los planificadores urbanos, se adelanta el modelo de flujo de la dinámica de comportamiento de los promotores inmobiliarios (figura 3.4).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4. Modelo conceptual de decisión del agente promotor inmobiliario.

Por último, el comportamiento de la **población** difiere según el grupo social al que pertenece, definido por rangos de renta media, lo que añade una cierta complejidad a estos agentes. Se parte de la oferta de viviendas vacías (libres o nuevas) y del nivel de renta de su potencial morador (A). Debido a la agrupación de los agentes por poder adquisitivo, no sólo no coinciden en la preferencia en cuanto a algunas variables (la cercanía a transporte público será importante para población de renta baja, pero no lo será, por ejemplo, para los grupos de renta alta), sino que también pueden tener reacciones distintas en función de la misma variable (B). Es el caso del precio de la vivienda, por ejemplo, que presenta restricciones fuertes para algunos grupos de población y débiles para otros. Las demás variables consideradas por cada grupo de población son: cercanía a carreteras/transporte público/centros comerciales/equipamientos de salud y educación, el nivel de renta de la vecindad y el precio medio de la vivienda, como muestra el avance de su modelo de flujo en la figura 3.5.



(1) Viviendas libres son aquellas cuya ocupación no llega a la capacidad máxima, o sea, todavía con espacio disponible para ocupación

(2) La población vulnerable es aquella de renta inferior a de la que busca vivienda y con estado "insatisfecho"

(3) La tipología adecuada es aquella de igual nivel o con un nivel de diferencia (para población de renta alta, viviendas de alto o medio estándar, para población de renta media, cualquier tipología de vivienda; para población de renta baja, viviendas de medio o bajo estándar)

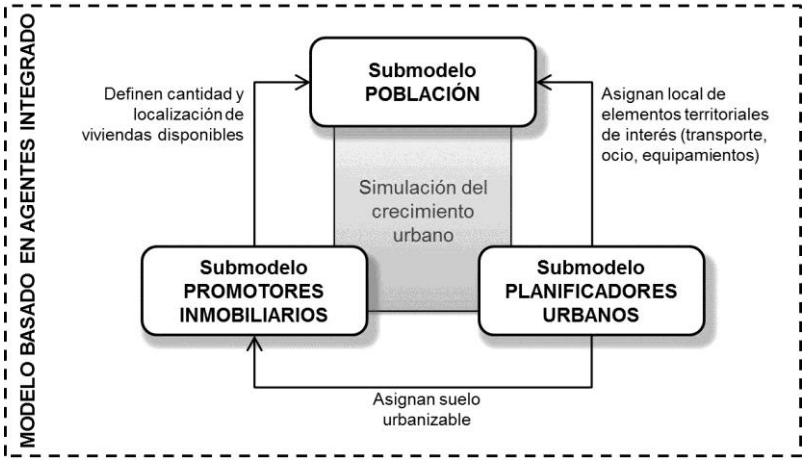
(4) Replantear la necesidad de cambiarse de residencia o plantear ocupar viviendas con otra tipología

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5. Modelo conceptual de decisión del agente población.

La implementación del modelo en un primer momento cuenta con una cantidad reducida de datos (ver tabla 3.1), pues sólo así es posible comprender cómo evoluciona el modelo en cada etapa y conocer en profundidad cómo funciona la interacción de los agentes y las variables que pueden incidir en su comportamiento. Además, la menor cantidad de elementos en el modelo facilita la detección de posibles inconsistencias técnicas de programación en su ejecución.

En cualquier caso, aunque la cantidad de datos sea reducida, el desarrollo del MBA integrado resultará complejo, considerando que integra las reacciones de los tres agentes cuyos submodelos se desarrollan de forma separada en una primera etapa. El modelo integrado cuenta con la incorporación de acciones y reacciones de un agente como información de partida o restricción para el siguiente (figura 3.6).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6. Estructura del modelo basado en agentes integrado.

En resumen, el modelo integrado consta de los tres submodelos expuestos ejecutándose de forma secuencial y ordenada según criterios pre-establecidos (esto es, cuando cumpla una condición en particular), en el que el producto de la acción de los planificadores urbanos – las áreas urbanizables – alimenta o limita la actuación de los promotores inmobiliarios, que a su vez construyen nuevas residencias que se ofertarán a la población. En un movimiento dinámico y continuo, y obedeciendo el ritmo temporal de cada agente, el modelo simula paso a paso el crecimiento urbano del Corredor del Henares, cumpliendo el objetivo inicial propuesto en la construcción del MBA.

DESARROLLO DEL MODELO BASADO EN AGENTES

CAPÍTULO 4.

SUBMODELO DE ASIGNACIÓN DE SUELO URBANIZABLE POR LOS PLANIFICADORES URBANOS (SM1)

1. Introducción

La planificación urbana comprende un conjunto de prácticas de carácter esencialmente proyectivo con el que se establece un modelo de ordenación para un ámbito espacial. Los planificadores urbanos son los profesionales que llevan a cabo esta labor, a través de un conjunto de instrumentos técnicos y normativos para establecer los usos del suelo y regular las condiciones para su transformación o, en su caso, conservación. Entre las funciones de los planificadores urbanos está la revisión de los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU). Como se mencionó en el capítulo 2, y definido en el Real Decreto 2159/1978, de 23 de junio[20], el PGOU es uno de los instrumentos de planificación de la ordenación urbanística general de uno o varios municipios, a través del cual se clasifica el suelo, se determina el régimen aplicable a cada clase de suelo y se definen los elementos fundamentales del sistema de equipamientos del área en cuestión, así como zonas de protección y conservación.

[20] Real Decreto 2159/1978, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Planeamiento para el desarrollo y aplicación de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana. Enlace: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1978-23729 (último acceso: abril/2017)

El MBA propuesto – y más en concreto el submodelo de los planificadores urbanos (SM1) – puede considerarse como una herramienta de soporte a la planificación, en este caso especialmente enfocada a la asignación de nuevas áreas urbanizables. Hemos de destacar que el SM1 está concebido para ser aplicado a un nivel supramunicipal, considerando solamente aquellos elementos representativos a esta escala, y, por lo tanto, no sería, en principio, replicable de forma directa a la planificación a otros niveles, como el municipal o el autonómico. En este sentido, las variables utilizadas se encuentran en una escala intermedia entre el municipio y la comunidad autónoma, considerando el Corredor del Henares como un ámbito espacial homogéneo con identidad propia en cuanto a su desarrollo urbano.

Es sabido que la planificación urbana es el principal instrumento definido en las normativas urbanísticas españolas para ordenar el territorio, siendo generalmente una herramienta con enfoque desde arriba hacia abajo (*top-down*), esto es, cuando las consecuencias de la actuación de un elemento del sistema afectan a varios individuos a un nivel inferior, como una fuerza motriz. No obstante, la planificación urbana está evolucionando hacia procesos más participativos – con un enfoque desde abajo hacia arriba (*bottom-up*) – que sucede cuando individuos con comportamientos independientes generan patrones espaciales a un nivel más agregado[21]. En este último caso, la planificación urbana se centra en impulsar la participación descentralizada a través de procesos de toma de decisiones por agentes originariamente en cargos no relacionados con esta función. Tradicionalmente, la elaboración de planes urbanos se ha fundamentado en componentes normativos, sin embargo, a partir de la Ley 02/2008, de 20 de junio[22], del Suelo, se establece la obligatoriedad de la participación pública en el proceso de planificación, determinando que "todos los instrumentos de ordenación territorial y de ordenación y ejecución urbanísticas, incluidos los de distribución de beneficios y cargas, así como los convenios que con dicho objeto vayan a ser suscritos por la Administración competente, deben ser sometidos al trámite de información pública". A raíz de esto, y como mencionaba Giddens en 1984 (1984), las regiones y lugares no sólo se ven como espacios a ser planificados o diseñados por una autoridad, sino también como un medio que influye y es influenciado por interacciones entre diferentes actores, por lo que la consideración de estos procesos de planificación representados en un MBA puede ser muy acertada.

[21] Castella (Castella *et al.*, 2007) explica gráficamente la diferencia de ambos enfoques *top-down* y *bottom-up* en la modelación de cambios en el uso del suelo como soporte a políticas públicas.

[22] Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo (Ley 8/2007, de 28 de mayo); Título II. Bases del régimen del suelo; Artículo 11. Publicidad y eficacia en la gestión pública urbanística. Enlace: http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2008-10792 (último acceso: abril/2017).

Aunque este proceso de participación pública se considere un elemento innovador y una indudable aportación a la planificación urbana, para el submodelo propuesto no se considera cualquier decisión ajena a la del agente planificador, debido principalmente la estructura del modelo en general, el cual cuenta con los otros dos submodelos de promotores inmobiliarios y población, cuyos comportamientos se fundamentan más en la expansión y ocupación del territorio que en la planificación propiamente dicha.

Así, se optó por considerar solamente las decisiones exclusivas de los planificadores urbanos al elaborar las reglas de decisión, y por ello el submodelo tiene un carácter prácticamente determinístico. Sin embargo, no se han empleado sistemas de desarrollo tecnológicamente más sencillos como serían los SIG (considerados muy adecuados para consultas espaciales de carácter determinístico) debido a la necesidad de integrar este con los demás submodelos del sistema que se pretende simular (promotores inmobiliarios y población). De igual modo se ha desestimado la construcción de un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE), herramienta que facilita la adopción `racional´ de decisiones sobre problemas espaciales (Bosque Sendra, 2001), basados también en los SIG y que se aplican para la planificación urbana, puesto que al ser estos unos sistemas más centrados en la búsqueda de un resultado óptimo que en el comportamiento del planificador en sí, entraría en conflicto con el objetivo del MBA propuesto, el cual pretende generar un producto a partir de determinadas elecciones de este agente, que pueden ser diferentes en cada escenario planteado, y no por ello desacertados.

Por lo tanto, en el presente capítulo se presenta un submodelo basado en agentes que simula el comportamiento de los planificadores urbanos en cuanto a la asignación de nuevas áreas urbanizables. La localización de las mismas vendrá definida por determinada información geográfica que permitirá concretar las preferencias espaciales del planificador, y que, a su vez, induce a una reorganización de la nueva distribución de suelo urbano y urbanizable en el área de estudio.

La estructura desarrollada tiene una configuración flexible, posibilitando al usuario generar diferentes escenarios de simulación. Como ejemplo, se considerarán distintos productos según la definición del comportamiento de diferentes perfiles de planificadores urbanos – ambiental, económico, social, especulador u otros – modelados en función de los pesos dados a cada parámetro[23] en la configuración inicial, que, a su vez, representa las preferencias espaciales sobre dónde asignar nuevas áreas urbanizables en cada contexto.

[23] Entiéndase por *parámetro* aquellos valores ajustables en la interfaz del modelo a través de botones con barras deslizantes, flexibles a cada variable de entrada disponible. Indica la preferencia del usuario y ayuda a determinar el escenario que se quiere simular.

Conforme se ha visto en el capítulo 3, el MBA propuesto consta de tres submodelos integrados, independientes en su elaboración aunque dependientes funcionalmente, ya que los datos de entrada y los resultados obtenidos se configuran en función de los productos de los demás submodelos. A continuación nos centraremos en los aspectos técnicos, conceptuales y prácticos del primer de ellos, que, como ya se ha mencionado, presentan un único comportamiento para todos los agentes, y, por lo tanto, son representados por un único tipo y reglas de decisión para toda el área de estudio.

La descripción lógica de este submodelo, así como la presentación de su interfaz gráfica, facilitarán una mejor comprensión de la estructura y el funcionamiento del comportamiento a simular.

1.1. Estructura lógica del submodelo de los planificadores urbanos

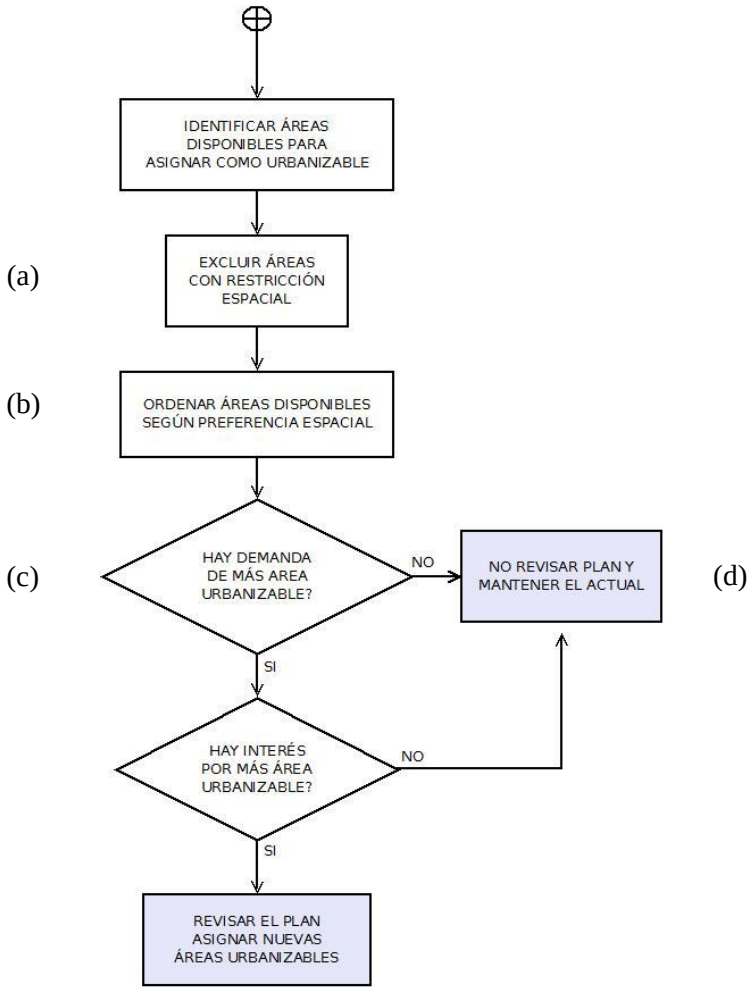
Entre los elementos ya detallados en el modelo conceptual que podrían incidir en el comportamiento de los planificadores urbanos, se llevó a cabo una serie de ajustes para posibilitar su adecuación al prototipo propuesto. Teniendo en cuenta la información disponible de partida, los factores finalmente utilizados se presentan en la tabla 4.1, indicando las variables utilizadas, la procedencia de las mismas y una breve descripción del factor generado y cómo interviene en el modelo.

Variable	*Procedencia*	***Factor***	*Descripción*
Zonificación legal del suelo	Servicio Cartográfico Regional de la Comunidad de Madrid (1996, 2003 y 2006)	Clasificación del suelo en urbano, urbanizable, sistemas generales y otros	Es la base sobre la cual se delimitan legalmente las áreas de actuación del agente PU
Espacios Naturales Protegidos (ENP)	Ministerio de Medio Ambiente, Banco de Datos de la Naturaleza – BDN (2012)	Área de restricción base, que incluye todos los ENP, así como áreas de interés ambiental (riberas de ríos) y con limitaciones físicas y morfológicas para urbanizarse (pendientes muy acentuadas, superiores a 10%, por ejemplo)	Delimita espacialmente el ámbito de actuación de los agentes, restringiendo las zonas donde no es posible urbanizar por restricciones físicas o legales
Áreas de interés ambiental (área de influencia de 100m en torno a cualquier curso fluvial)	Elaboración propia a partir de Base Cartográfica Nacional BCN25 (capa de red hidrográfica) (2008)		
Pendientes	Centro Nacional de Información Geográfica, BCN50 (2012)		
Red Natura 2000: áreas clasificadas como ZEPA (Zonas de Especial Protección para las Aves)	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), BD de la Naturaleza (2013)	Área de restricción con RN2000, que incluye, además de las definidas en la capa de restricción base, toda la superficie clasificada como ZEPA en la cartografía de RN2000.	

Variable	*Procedencia*	***Factor***	*Descripción*
Red de Infraestructuras Verdes (IV)	Propuesta presentada en Rodríguez *et al.* (2015)	Área de restricción con la red propuesta de Infraestructura Verde (IV), que incluye, además de las definidas en la capa de restricción base, toda la superficie que consideramos debería formar parte de esta IV	
Productividad agrícola	Instituto Geográfico Nacional - IGN, Proyecto *CORINE Land Cover* (2000-2005)	Productividad agrícola, definida en función de la reclasificación de los usos del suelo (*CORINE Land Cover*) en alto (zonas forestales con vegetación natural), medio (zonas agrícolas o bajo (demás clases) interés de protección	Los PU buscan preferentemente áreas menos productivas, buscando mantener ciertos recursos básicos para la población y protección del medio ambiente
Instalaciones no-deseables	Instituto de Estadística de la CM, BD *NomeCalles*, (capas correspondientes a lo que se consideran instalaciones no-deseables en 2005)	Distancia a instalaciones no-deseables (como vertederos, cárceles, depuradoras, incineradoras)	Se pretende alejar a la población, en la medida de lo posible, de instalaciones nocivas, molestas o peligrosas
Áreas urbanas consolidadas	Instituto Nacional de Estadística – INE, Cartografía de secciones censales (2011)	Distancia a áreas urbanas consolidadas	Pretende optimizar los costes de mantenimiento de servicios públicos (seguridad, transporte, distribución de equipamientos, entre otros)
Carreteras	Centro Nacional de Información Geográfica –CNIG (2008)	Distancia a carreteras	Con este factor se pretende garantizar la movilidad y la accesibilidad de la población a las principales vías de comunicación
Equipamientos educativos y sanitarios	Instituto de Estadística de la CM, BD *NomeCalles*, (capas correspondientes a universidades y hospitales en 2005)	Distancia a equipamientos educativos y sanitarios	El objetivo es optimizar la provisión de servicios educativos y sanitarios, acercando las nuevas zonas residenciales a los equipamientos de este tipo ya existentes (limitados a hospitales y universidad ubicados fuera de las zonas urbanas, ya que las que se encuentran dentro no influirían por el solape con otros criterios presentados)

Tabla 4.1. Descripción de factores a considerar por el planificador urbano para la asignación de áreas urbanizables.

Para realizar la programación gráfica de este submodelo se desarrolló un diagrama de flujo (figura 4.1) en función de la acción que el agente realiza en cada fase, más detallado que el presentado como esquema general de este submodelo.



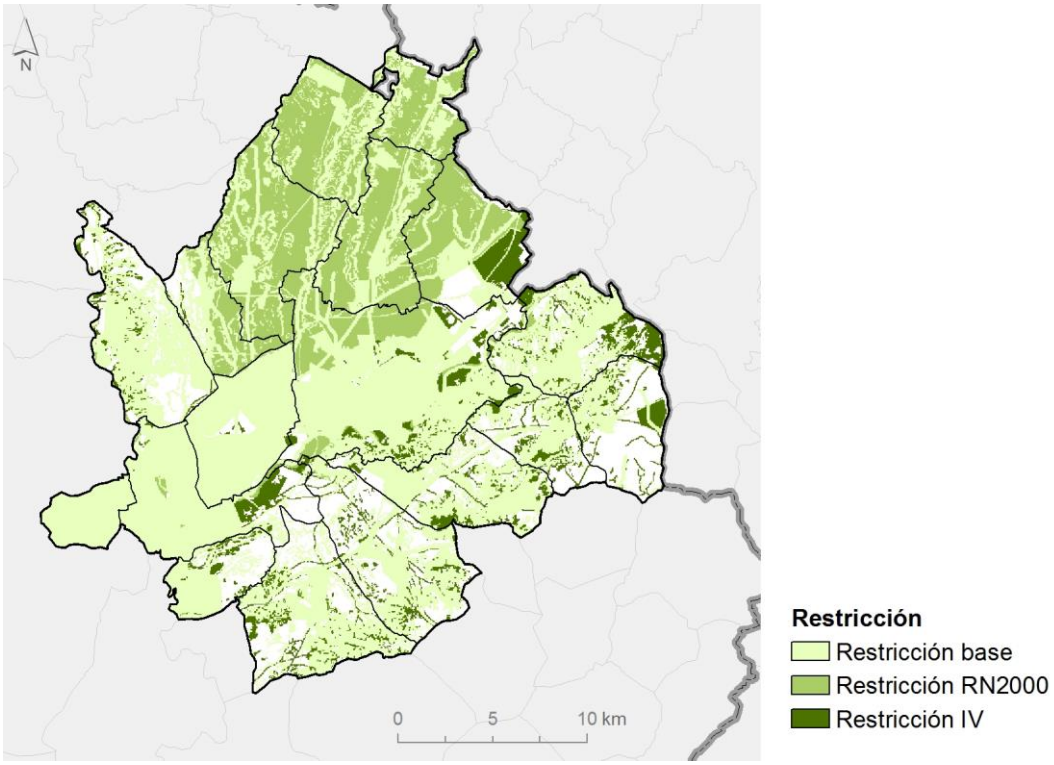
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1. Diagrama de flujo que describe las distintas acciones de los planificadores urbanos y su secuencia.

La secuencia de comportamiento de los PU representada en este diagrama culmina en la asignación de nuevas áreas urbanizables, objetivo principal de la simulación en este submodelo.

Respecto a la disponibilidad de superficie para la actuación del planificador urbano, damos por supuesto que es limitada, ya que no se puede asignar nuevas áreas como urbanizables en áreas protegidas (Espacios Naturales Protegidos o riberas de ríos, por ejemplo), en áreas urbanas ya consolidadas, o en áreas con elevada pendiente (superior al 10%). Partiendo de esta suposición, el primer paso es considerar una capa de restricción compilando estos parámetros y limitando el área disponible (figura 4.1.a).

En el presente submodelo esta restricción se puede considerar según tres limitaciones espaciales diferentes además de la restricción base ya mencionada, tal como la inclusión de superficies asignadas como ZEPA (Zonas de Especial Protección para las Aves) en la Red Natura 2000, que, aunque no sea estrictamente restrictiva, presenta una serie de condiciones para permitir su urbanización. También se optó por considerar como opción de restricción en el submodelo las áreas propuestas como parte de una red de Infraestructura Verde (IV) (Rodríguez Espinosa *et al.*, 2015), la cual pretende mantener las condiciones básicas de prestación de determinados servicios ambientales fundamentales de protección del hábitat, de regulación, de abastecimiento y de servicios culturales. Por último, se define una opción agregando todas las citadas anteriormente para simular una situación de restricción extrema, donde es evidente la baja disponibilidad de áreas aptas para reclasificar como urbanizables (figura 4.2).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.2. Distribución espacial de áreas no aptas para asignación de suelo urbanizable (restricción).

Merece mencionar que teniendo en cuenta la superficie disponible para actuación del agente planificador urbano, y considerando las restricciones presentadas, detectamos diferencias importantes al considerar uno y otro nivel restrictivo. Al seleccionar la capa de Restricción Base, identificamos 279,12 km^2 de superficie disponibles para reclasificación (equivalente a 111.647 pixeles). Ya al elegir la de Restricción Base combinada con otras, esta superficie disminuye

significativamente, donde por ejemplo la capa más restrictiva, que suma además de la RN2000, también la propuesta de IV, dispone solamente 110,67 km^2 (equivalente a 44.268 pixeles) para conversión a urbanizable.

La siguiente etapa consiste en definir un orden de preferencia en función de unos criterios específicos, como distancia a equipamientos no deseables, a áreas urbanas consolidadas, a carreteras y a equipamientos de salud y educación (figura 4.1.b). Para que este modelo se pueda aplicar como una herramienta de apoyo a la planificación, estos parámetros se pueden variar según el perfil del usuario o incluso de acuerdo a un contexto sociopolítico específico. Esta asignación de pesos y porcentajes proporciona una importante flexibilidad al modelo, pues el usuario puede asignar diferentes niveles de importancia a cada una de las variables disponibles, y simular el resultado con distintos escenarios de expansión de áreas urbanizables. Esta decisión estará vinculada a una fórmula (ecuación 4.1), donde la preferencia (P) es la suma de las variables (V) consideradas. A todas ellas se les puede otorgar un peso (p) que exprese la importancia de cada una en el proceso de selección final.

$$P = ((p1 * V1) + (p2 * V2) + (p3 * V3) + \cdots + (pn * Vn)) \qquad \text{[Ecuación 4.1]}$$

En esta etapa de definición de pesos y criterios espaciales para la actuación de los planificadores urbanos, se considera la componente productividad agrícola de forma independiente a la fórmula presentada, ya que no se le otorga un peso como a las demás, sino que indica los porcentajes de área permitida para conversión en zonas de alta, media y baja productividad. En este caso es el propio usuario quien asigna en la interfaz un porcentaje para cada una de estas clases (de 0 a 100%), y luego la ejecución del submodelo trata de asignar las nuevas áreas urbanizables según esta distribución. Por defecto, los valores iniciales simulan la asignación de suelos urbanizables solamente en áreas de baja productividad.

Otro dato de entrada fundamental contemplado en el submodelo es la demanda, esto es, la cantidad de nuevas áreas urbanizables que se desea localizar en la simulación (figura 4.1.c). La definición cuantitativa podría depender de varios factores, como son la propia demanda de población o de los promotores inmobiliarios. En otros casos, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, pueden estar determinadas por orientación política o directrices urbanísticas enfocadas a políticas más sociales, económicas o ambientales. En la solución presentada, la magnitud del cambio dependerá exclusivamente del usuario, que define la dimensión de la expansión en la interfaz del programa para simular diferentes escenarios de ampliación de áreas urbanizables.

No obstante, se establecerá unos límites inferiores y superiores de demanda, considerando la media anual de crecimiento de superficie urbana real y urbanizable planificada experimentada. Los usos de suelo urbano identificados en los años 2000-2006-2009, a partir de la base de datos

MLU, indica un crecimiento del 12,89% en el período de 2000 a 2006 (8,03 km^2) y 4,38% en el segundo, entre 2006 y 2009 (3,79 km^2), lo que culmina en una media anual de crecimiento de 2,4 km^2 y 1,4 km^2, respectivamente. Al analizar datos de clasificación de suelo (1996-2003-2006), se observa que las zonas consideradas como suelo urbanizable se han incrementado en 22,26 km^2 si comparamos la información de 1996 y 2003, y en 14,35 km^2 si consideramos el período entre 2003 y 2006. Suponen por tanto un total anual de 3,18 km^2 y 4,78 km^2, respectivamente.

Considerando estas estadísticas (resumidas en la tabla 4.2) y asumiendo que el usuario puede definir la cantidad de nuevas áreas a clasificar como urbanizables en los planes generales subsecuentes (suponemos que se producirá una revisión cada 5 años), se decidió considerar un rango amplio en el submodelo para permitir escenarios extremos (límite inferior de 400 pixeles, equivalente a 1 km^2 y superior de 20.000 pixeles, equivalente a 50 km^2).

Tipo de análisis de crecimiento	*Período y número de años*	*Crecimiento anual*	*Crecimiento si considera revisión del plan cada 5 años*
Uso urbano (cartografía de usos del suelo, MLU)	2000-2006 - 6	960 pixeles - 2,4 km^2	4.800 - 12 km^2
	2006-2009 - 3	560 pixeles - 1,4 km^2	2.800 - 7 km^2
Superficie urbanizable (cartografía de clasificación del suelo, Instituto de Estadística de la CM)	1996-2003 - 7	1.272 pixeles - 3,18 km^2	6.360 - 15,9 km^2
	2003-2006 - 3	1.912 pixeles - 4,78 km^2	8.440 - 21,4 km^2

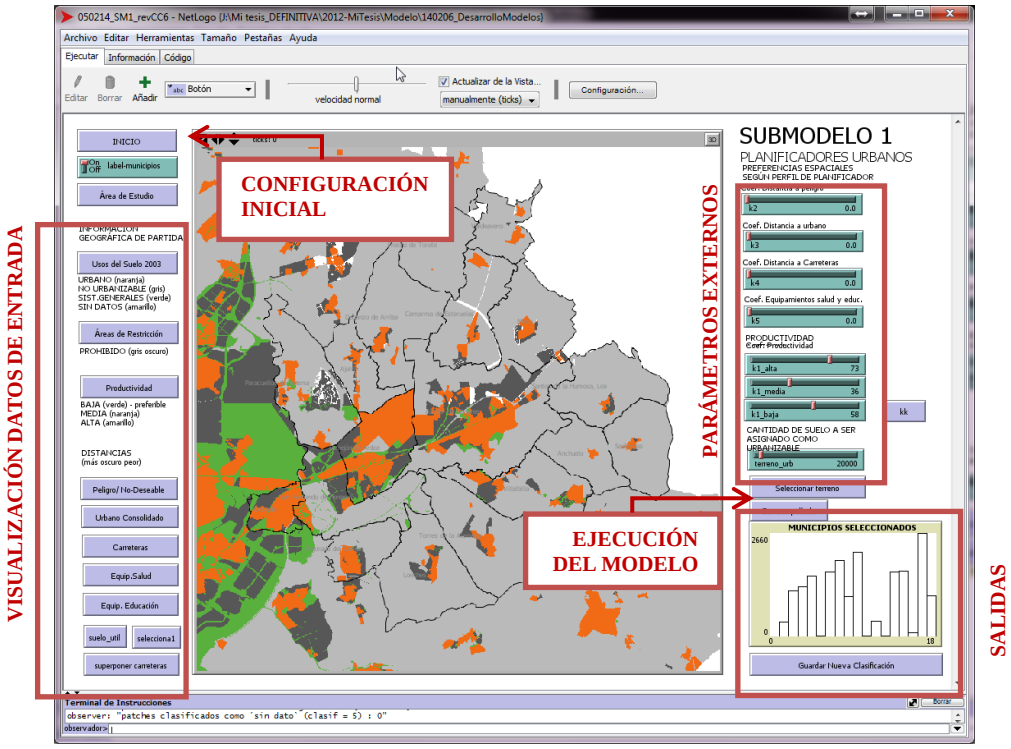
Tabla 4.2. Resumen del análisis estadístico del crecimiento de superficie urbana real y urbanizable planificada para delimitación de umbrales inferior y superior de la demanda.

En el caso de que los criterios elegidos en un escenario en concreto no permitan la posibilidad de ampliación de áreas urbanizables, el sistema entra en un bucle que lleva al usuario a replantear sus consideraciones iniciales (figura 4.1.d). En la práctica equivaldría a un nuevo planteamiento por parte de los planificadores urbanos, como, por ejemplo, la liberación del suelo para creación de urbanizaciones aisladas (no asociadas a zonas urbanas existentes) u ocupación de áreas que en principio presentaban algún tipo de restricción, pero que podría ser eliminada sin entrar en conflicto con la legalidad vigente.

1.2. La interfaz gráfica del SM1 en NetLogo

La interfaz de este submodelo está formada por tres bloques (figura 4.3). El primero consiste en la configuración inicial del sistema, donde se cargan las capas de entrada y se representan espacialmente. El segundo bloque contiene las herramientas de interacción con el usuario que permiten seleccionar y configurar parámetros externos para el establecimiento de distintos escenarios: (1) definición de los pesos que tendrá cada variable y (2) definición de la

extensión de las nuevas áreas urbanizables que se pretenden localizar (demanda). Esta configuración se realiza a través de opciones sencillas con una barra deslizante. El último es el bloque de las salidas y resultados, donde, posteriormente a la ejecución del modelo, se presenta espacialmente la asignación final de las nuevas áreas urbanizables.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Interfaz gráfica (*NetLogo*) del submodelo de asignación de nuevas áreas urbanizables (SM1) y sus herramientas de control.

Los resultados generados pueden presentarse de diferentes formas en este submodelo:

- *Cartografía.* Representa la distribución espacial en el panel de visualización en la propia interfaz. También se genera un archivo (en formato *raster*) que representa esta distribución, facilitando su posterior integración en un SIG;
- *Gráfico de barras.* Permite una comparación visual de las nuevas superficies de áreas urbanizables en cada municipio, también en la interfaz del submodelo;
- *Plantilla.* Es posible exportar un archivo en formato tabular que contiene cada municipio con su respectivo código, la superficie total del municipio, la nueva superficie de suelo urbanizable y su porcentaje respecto al total;

1.3. Resolución técnica adoptada para la obtención de las áreas urbanizables.

En esta fase es importante destacar que la propuesta espacial de nuevas áreas urbanizables se basa en un producto matemático resultante de la combinación de los criterios elegidos por el usuario para la creación de los escenarios, que se calcula para todos y cada uno de los píxeles que conforman el área de estudio de forma independiente. Sin embargo, al trabajar con esta unidad espacial de dimensiones muy reducidas, en el resultado pueden aparecer pixeles aislados como parte de la capa resultante de nuevas áreas urbanizables que representan una situación poco realista, pues no es tan común que parcelas del territorio tan pequeñas sean urbanizadas de forma aislada.

Hemos de advertir que esta misma situación se produce con frecuencia en otros tipos de modelos, como los AC, por ejemplo. Sin embargo en este caso, al ser un modelo integrado por otros dos submodelos, es absolutamente necesario que el resultado a utilizar por el siguiente agente (en este caso el promotor inmobiliario) sea razonable y realista, es decir, con unas dimensiones mínimas, lo que obligaba a introducir con anterioridad algún requisito de contigüidad espacial y definición de superficie mínima del resultado. Técnicamente se analizaron tres posibles soluciones para cumplir este requisito:

- *Procesamiento previo a la simulación:* consiste en revisar la capa de restricciones, evitando la posible selección de pixeles aislados ya en la entrada del modelo. De esta forma, las áreas consideradas obedecerán a un área mínima definida previamente en el proceso realizado en un SIG.
    - La solución expuesta trata de no considerar aquellos pixeles aislados aptos a convertirse en urbanizables (es decir, sin ningún vecino apto) en la fase de generación del suelo útil disponible, agregándoles a la capa de restricción. La desventaja de esta solución es que es posible que estimemos áreas agrupadas a dos pixeles que pueden representar igualmente una situación irreal en la planificación, pero como en algunos casos puntuales puede ocurrir, optamos por mantenerlas, ya que su ocurrencia es inferior a la primera situación.

- *Procesamiento simultaneo a la simulación:* consiste en definir en el código interno del modelo la delimitación de un número mínimo de pixeles adyacentes a ser clasificados como áreas urbanizables.
    - Sería la solución idónea, permitiendo realizar la consulta y no tener en consideración de forma automática aquellas áreas mínimas no aptas (pixeles aislados). Aunque se realizaron intentos para programar este proceso considerando la vecindad mínima según la suma de pixeles adyacentes en

NetLogo, el proceso no produjo un resultado satisfactorio debido principalmente al dinamismo existente en este tipo de modelos, así como a la dificultad en definir una misma limitación puntual en cada ejecución. Por esta complejidad intrínseca y por la inversión en tiempo y búsqueda de formas novedosas de programación requerida, consideramos que no compensaba insistir en hacerlo en esta etapa de la investigación al no ser un objetivo previamente propuesto y, por lo tanto, aplazamos el desarrollo de una solución de este tipo como futura línea de investigación.

- *Procesamiento posterior a la simulación:* consiste en realizar una revisión sobre los resultados del modelo por parte de los planificadores urbanos y su equipo.
    - Este es un proceso necesario en todos los casos de modelización informática, dado que siempre hará falta la revisión de los resultados obtenidos por el modelo, considerando el conocimiento de los planificadores, los ajustes a intereses políticos, los balances de opciones disponibles para toma de decisiones, las adecuaciones de límites físicos, los aspectos cartográficos (ej.: refinamiento de la delimitación según escala), etc. No obstante, como este submodelo forma parte de un modelo integrado que incorporará de forma automática en las fases posteriores la acción también de promotores inmobiliarios y población, no es posible considerarlo, y, por lo tanto, esta opción se descarta.

Las soluciones mencionadas anteriormente presentan ventajas y desventajas, aunque ninguna representará fielmente y de forma completa el proceso de asignación de nueva superficie urbanizable. Sin embargo, se optó por el *procesamiento previo* a la ejecución del modelo, para poder seguir con el desarrollo del mismo, destacando que se tuvo en cuenta la condición de delimitar esta área mínima.

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones con distintos perfiles de planificador urbano

Para mostrar los resultados a partir de la ejecución del submodelo de asignación de nuevas áreas urbanizables es importante establecer valores de partida. Como ya se expuso anteriormente, y siendo muy característico en los MBA, la configuración inicial especificada por el usuario define los parámetros para la representación de un escenario concreto. Por lo tanto, se puede decir que son los diferentes perfiles de usuarios los que caracterizan esta configuración inicial.

Para poder realizar un ensayo y describir los resultados de este submodelo, se optó por generar tres ejemplos de simulación basados en diferentes escenarios hipotéticos. Para ello, planteamos tres perfiles diferentes de planificadores urbanos que presentan preferencias espaciales particulares, por ejemplo, de corte sostenible, conservador o con un perfil más de tipo especulador. Aunque no todos son deseables, y alguno cuestionable desde el punto de vista ético, se han realizado algunos ensayos para poner a prueba el modelo y mostrar sus capacidades. La caracterización de cada perfil se presenta a continuación:

- *Perfil Sostenible*: enfocado principalmente a la protección ambiental, preocupado por la sostenibilidad, priorizando la conservación de paisajes y zonas de alta producción agrícola (clave: minimizar el impacto ambiental);
- *Perfil Conservador*: considera los factores de optimización de recursos a la hora de planificar, pretendiendo minimizar gastos (clave: minimizar el gasto económico);
- *Perfil Especulador*: busca el beneficio obtenido tras el proceso de planificación, sacando provecho a través de la especulación del suelo, priorizando áreas concretas de interés individual, las cuales originalmente no tendrían valor por su localización o clasificación del suelo. Las razones son principalmente de ganancia económica (clave: maximizar el beneficio económico).

Para realizar un ensayo considerando estos tres perfiles de planificador se definieron parámetros correspondientes a cada comportamiento, que aquí se ponderan de forma extrema para acentuar los cambios y destacar las diferencias (tabla 4.3). Las preferencias de cada tipo de planificador urbano se reflejan en el submodelo a través de los diferentes pesos de preferencia espacial asignados a las cuatro variables disponibles (al tener que representarlos numéricamente se decidió de forma arbitraria definirlos con valores entre 0 y 2, pero podrían establecerse entre 0 y 1, entre 0 y 100, o cualquier otro rango). Además, otro parámetro indicará el porcentaje máximo permitido para ocupar áreas con diferentes niveles de productividad agrícola.

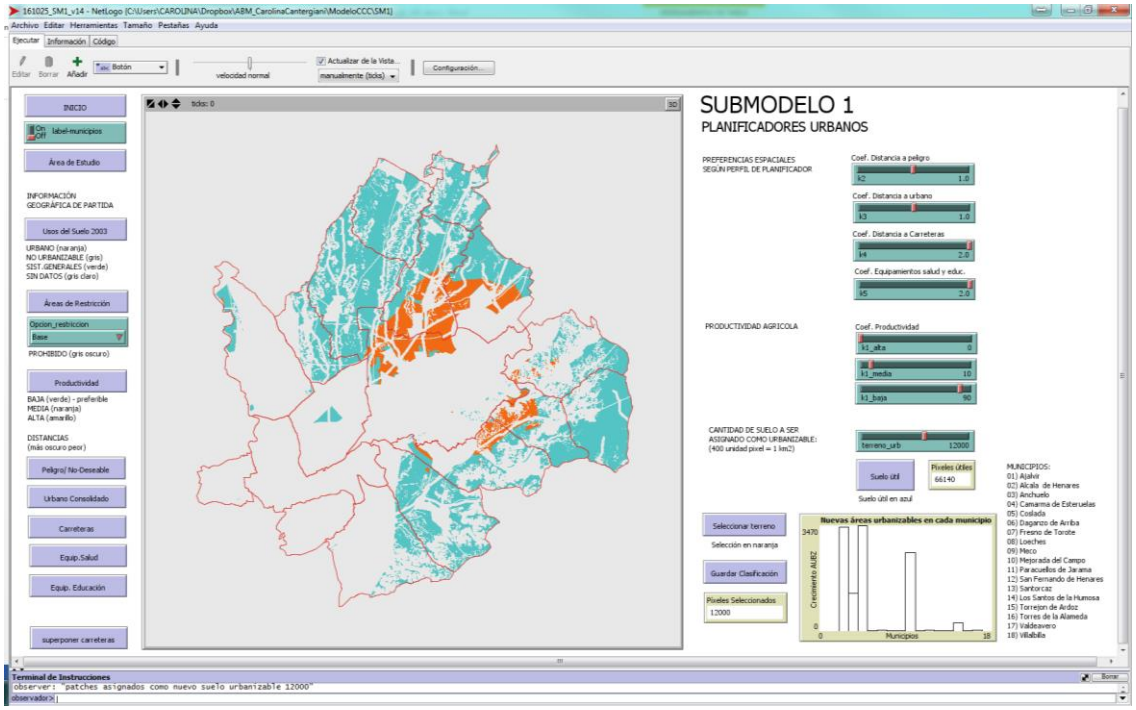
Variable\Planificador	*Referencia*	*Perfil Sostenible*	*Perfil Conservador*	*Perfil Especulador*
Distancia a instalaciones no deseables*	0,0 a 2,0	1,0	0,0	0,0
Distancia a áreas urbanas*	0,0 a 2,0	1,0	2,0	0,5
Distancia a carreteras*	0,0 a 2,0	2,0	1,5	0,5
Distancia a equipamientos educativos y sanitarios*	0,0 a 2,0	2,0	1,0	0,0
Productividad agrícola:				
Máxima ocupación por nuevas zonas urbanizables en áreas de alta productividad (%)	0 a 100	0	5%	20%
Máxima ocupación por nuevas zonas urbanizables en áreas de media productividad (%)	0 a 100	10%	20%	40%
Máxima ocupación por nuevas zonas urbanizables en áreas de baja productividad (%)	0 a 100	90%	75%	40%

* Valor 0 indica que el factor no actúa en el proceso; valor 2 indica que el factor tiene peso máximo en el proceso; valores intermedios entre 0 y 2 indican el acercamiento a la mínima o máxima influencia del factor en el proceso.

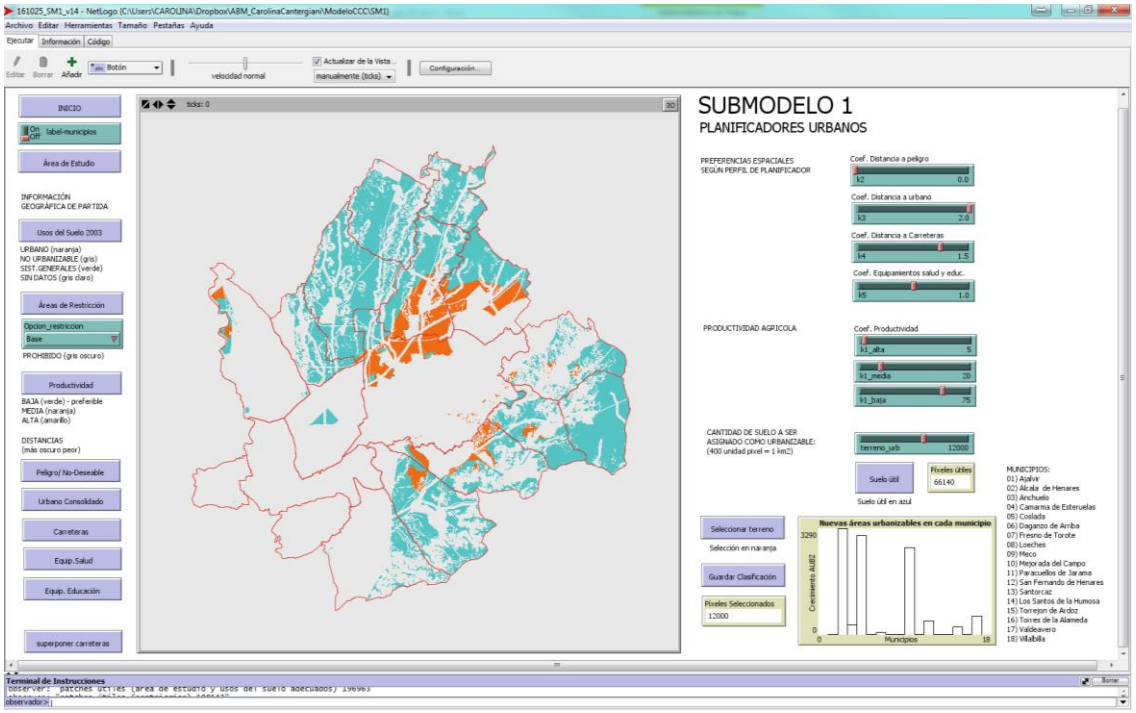
Tabla 4.3. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros con perfiles de planificador urbano sostenible, conservador y especulador.

Los resultados obtenidos de la ejecución del modelo para los tres perfiles de planificadores seleccionados difieren considerablemente, aunque todos parten de una cantidad idéntica de asignación de nuevas áreas urbanizables y consideran la misma capa de restricción (en un primer ensayo se optó por considerar la capa base, sin RN2000 o Infraestructuras Verdes, ya que estas se refieren a propuestas sin legislación restrictiva asociada). Para realizar las simulaciones estimamos un crecimiento de 30 km^2 (equivalente a 12.000 pixeles) que es un valor bastante elevado, pero que fue así considerado de forma intencionada para resaltar los cambios y diferenciar mejor los resultados espaciales del escenario neutro y de los tres escenarios ensayados (figura 4.4).

a. Perfil sostenible



b. Perfil conservador



c. Perfil especulador

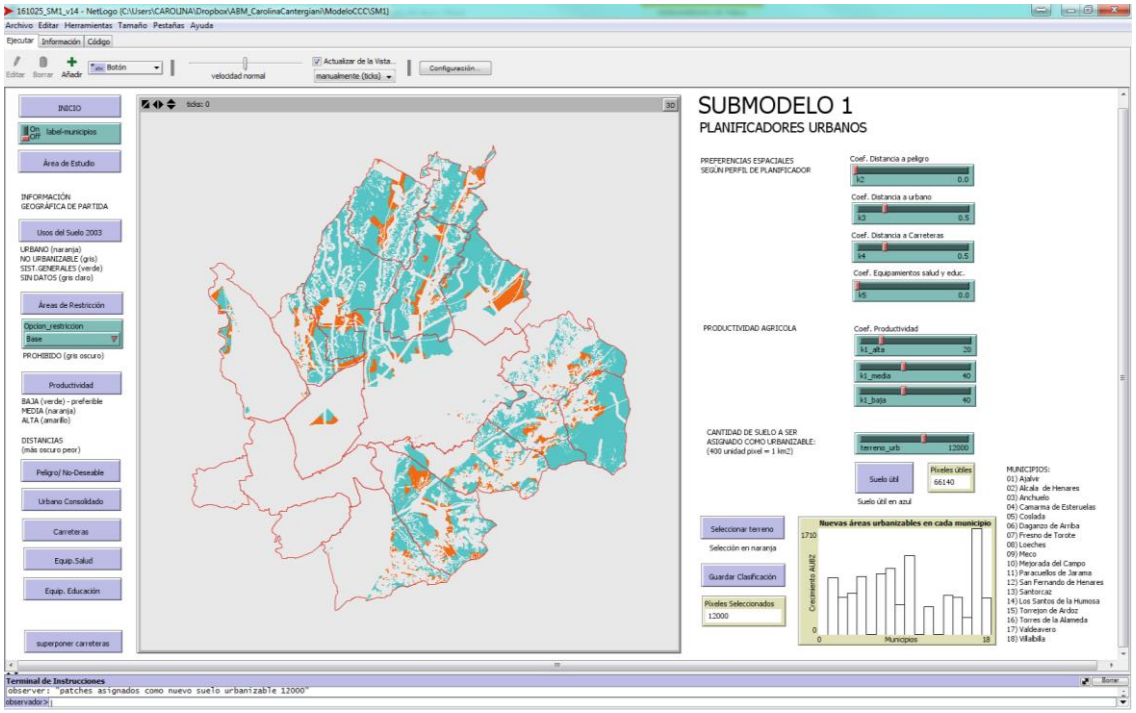


Figura 4.4. Distribución de nuevas áreas urbanizables (en naranja) según diferentes perfiles de planificadores urbanos: (a) sostenible, (b) conservador, (c) especulador.

Los resultados del planificador de perfil sostenible indican que éste daría preferencia principalmente a áreas del norte del Corredor del Henares para ampliar las zonas urbanas (figura 4.4.a). Son áreas que se encuentran próximas a centros urbanos consolidados y al mismo tiempo están distantes de equipamientos peligrosos. La motivación por expandir la superficie urbana en esta dirección da lugar a beneficios ambientales por no afectar a suelo protegido y ocupar áreas poco productivas en términos agrícolas.

A su vez, considerando un planificador de perfil más conservador es de esperar que la expansión se concentre próxima a las áreas ya urbanas, así se optimizarán los servicios disponibles que tengan capacidad de recibir la nueva demanda generada, tales como seguridad, accesibilidad, transporte público, salud, educación, entre otros (figura 4.4.b). En el caso coincide significativamente con la simulación del planificador con perfil sostenible, que también considera el eje norte es el más propicio para nueva ocupación urbana, en este caso destacando una urbanización menos intensiva en los municipios del eje sur Anchuelo y Villalbilla, para centrarla en el también sureño Torres de la Alameda, añadida de Paracuellos de Jarama.

Por último, al ser especulador del suelo, el último perfil de planificador no tiene en consideración la productividad del terreno para asignar nuevas áreas urbanizables. En este caso, las únicas condiciones es que estén cercanas a carreteras y relativamente próximas a áreas urbanas consolidadas. La localización de nuevas áreas está bien distribuida y dispersa en ambos ejes norte

y sur del Corredor del Henares (figura 4.4.c). Al norte en áreas en desarrollo cercanos a carreteras, y al sur, próximos a la ocupación urbana adyacente a los cerros, principalmente zonas residenciales de baja densidad.

Como se puede apreciar, la distribución espacial de las nuevas áreas urbanizables según los diferentes perfiles presenta diferencias interesantes. Es fundamental tener en cuenta que esta distribución es generada para los escenarios propuestos, aunque si se llevan a cabo pequeñas variaciones éstas pueden configurar diferentes escenarios y producir resultados bastante distintos.

Aunque la prueba de distintos perfiles presentada ya es en cierta forma un proceso de verificación del submodelo, constatando que está correctamente construido, hay que tener en cuenta que el objetivo principal es probar un prototipo para la asignación de nuevas áreas urbanizables y no tanto proponer realmente dichas áreas. Por eso, las conclusiones se elaborarán en cuanto a los aspectos conceptuales y técnicos (el desarrollo del modelo en sí) más que en el análisis temático de los resultados (donde se esperaría un análisis en cuanto a la situación de cada municipio).

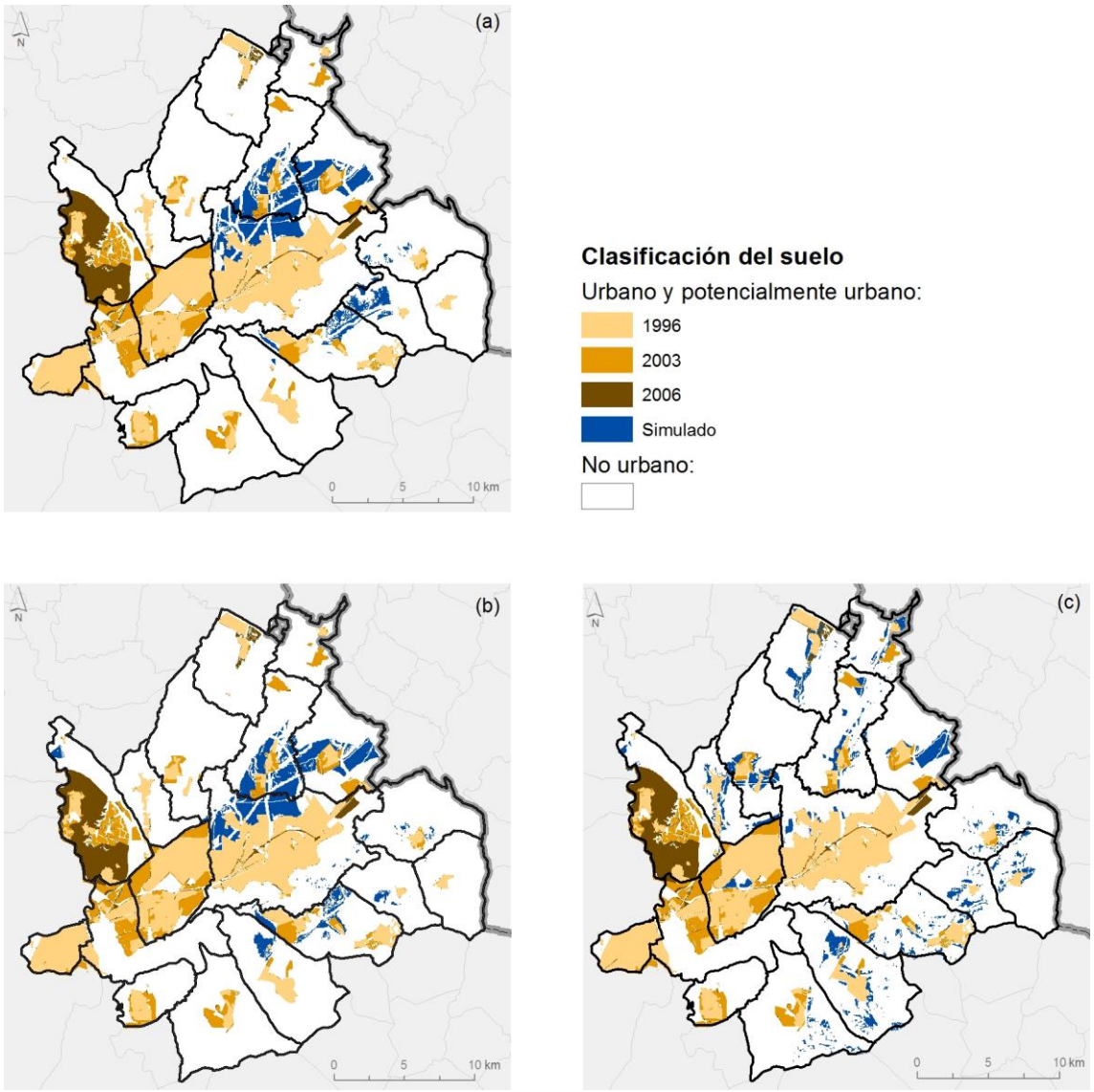
En este sentido, hay algunos análisis complementarios que consideramos importantes para, en cierta forma, validar este submodelo. En primer lugar, se hace necesario confirmar que las áreas de restricción se respetan en todos los escenarios, teniendo en cuenta sus variaciones posibles (base, con RN2000, y agregado de los dos anteriores con IV, más restrictiva). Igualmente, es fundamental visualizar la forma de la evolución de la expansión de superficie urbanizable cuando comparamos con la clasificación vigente del suelo en el área de estudio.

Técnicamente observamos que todas las simulaciones obedecen a las condiciones de partida estipuladas. Respecto a las restricciones propuestas, se realizó una comprobación de su concordancia, cumpliendo con la verificación de este submodelo. La superficie seleccionada en cualquiera de los escenarios se localiza en áreas consideradas aptas, confirmando que el prototipo desarrollado obedece correctamente a los criterios planteados. Respecto a las demás opciones de restricción disponibles, se obtuvo idéntico resultado y, por lo tanto, también se estima su funcionamiento como efectivo.

Para realizar la siguiente comprobación, debemos tener en cuenta la distribución de la clasificación del suelo en el área de estudio. Como indica la figura 2.4 (capítulo 2) referente a su evolución para los años 1996, 2003 y 2006, los cambios más significativos se presentan en primer lugar en los municipios de eje central, ya bastante saturado en este ámbito, para dar lugar a la expansión intensa en el eje norte (principalmente en el último período), seguido de forma menos acusada por el eje sur. Una posible tendencia expansiva podría indicar un avance en la conversión de superficie urbanizable en áreas próximas al municipio de Madrid y cercanos a las áreas urbanas consolidadas.

En este caso, llevamos a cabo una representación integrada del desarrollo de superficies urbanizables en las tres situaciones reales, añadida de la distribución de la ampliación de estas

mismas áreas generadas en los tres escenarios presentados con el fin de poder visualizar la forma de evolución en cada caso. La figura a continuación (figura 4.5) indica los cambios en el caso ficticio en que el planificador considerase la elaboración del nuevo plan estrictamente con el producto resultante de la aplicación del modelo según cada uno de los perfiles planteados.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de clasificación del suelo (Sistema de Información Urbana – SIU, Ministerio de Fomento / Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la CM).

Figura 4.5. Evolución de áreas urbanizables en una supuesta nueva clasificación del suelo según los tres escenarios: (a) sostenible, (b) conservador, (c) especulador.

A modo de conclusión, los análisis presentados en este apartado pueden servir como una forma de verificación, comprobando que el modelo está funcionando de forma correcta según los planteamientos iniciales.

CAPÍTULO 5.

SUBMODELO DE DESARROLLO RESIDENCIAL POR LOS PROMOTORES INMOBILIARIOS (SM2)

1. Introducción

Los promotores inmobiliarios, también conocidos como *agentes de la edificación*, se definen según la Ley de Ordenación de la Edificación (Ley 38/1999, del 5 de noviembre) como "aquella persona, física o jurídica, pública o privada, que, individual o colectivamente, decide, impulsa, programa y financia, con recursos propios o ajenos, las obras de edificación para sí o para su posterior enajenación, entrega o cesión a terceros bajo cualquier título". Teniendo esto en cuenta, y, considerando su papel en el contexto del submodelo propuesto, partimos de la suposición de que su objetivo central será principalmente el de promover la construcción de nuevas viviendas. Por este motivo consideramos que juegan un papel fundamental en la dinámica de expansión urbana de un territorio.

La estructuración de este proceso en un MBA se puede considerar apropiada ya que hay dos características importantes que lo determinan: la interacción entre agentes y la representación de un proceso con enfoque *bottom-up*. Respecto a la interacción entre agentes, el promotor inmobiliario se comporta de modo particular según externalidades relacionadas con la dinámica del mercado (entorno), y de forma integrada con los demás agentes (otros promotores).

Interactúan con el sistema respetando la clasificación del suelo adecuada para construcción, el poder adquisitivo de la población potencial y los estándares de las edificaciones existentes en la vecindad.

En cuanto al enfoque *bottom-up* del proceso, éste está aquí mejor representado que en el submodelo anterior de los planificadores urbanos (SM1), aunque sigue siendo bastante sencillo en cuanto a su concepción. La idea central es que los promotores inmobiliarios presentan un interés particular por dónde ampliar el parque de viviendas en una ciudad, pero que la configuración final resultante del comportamiento agregado de todos ellos genere un crecimiento organizado de oferta de residencias (conformando barrios con diferentes estándares edificatorios). El proceso de ocupación de estas viviendas por parte de la población se planteará más adelante, en el siguiente capítulo, dedicado al tercer submodelo.

Teniendo en cuenta estas características básicas (interacción y efecto *bottom-up*), hay una serie de componentes que afectan directa o indirectamente al comportamiento de estos agentes concretamente en el área de estudio. Nos centraremos en tres componentes principales, que abarcan diferentes relaciones entre el agente y sí mismo o entre el agente y su entorno. De forma detallada, serán clasificados como *componente psicológico* (relaciones internas del agente, en relación al proceso decisorio en sí), *componente territorial* (relaciones internas y externas, ya que dependen de aspectos culturales relacionados con el local donde ejerce su actividad y/o experiencias previas), y *dinámica de mercado* (relaciones externas, totalmente independientes, pero que pueden afectar sus decisiones). Estos tres componentes se explican más en detalle a continuación.

En lo que concierne al *aspecto psicológico*, Mohamed (2006) expone de forma muy descriptiva la psicología subyacente en la toma de decisiones realizada por estos agentes en términos económicos, lo que nos ayuda a entender mejor su forma de definir objetivos, gestionar expectativas y tomar decisiones. Por ejemplo, el autor afirma, entre otras cosas, que la regla más importante a la hora de elegir la ubicación para un nuevo desarrollo urbano es que los promotores inmobiliarios alcancen un mínimo beneficio económico. También asume que estos agentes no suelen pasar fácilmente de un proceso al que están acostumbrados a otro desconocido, y que tienden a mantener su actividad sin grandes modificaciones, asumiendo un riesgo mínimo, aunque en la práctica el cambio pudiera incluso ser más conveniente económicamente.

Conocer estas y otras razones que inducen al promotor inmobiliario a elegir una zona para el desarrollo urbanístico y representarlas a través de un modelo sería deseable. No obstante, además de las limitaciones de disponibilidad de información adecuada y de la imposibilidad de conocer en detalle dichas razones (debido a la falta estudios de comportamiento específico de los promotores), la simulación práctica ignoraría una serie de elementos importantes que afectan a sus decisiones, tales como: ¿cuáles serían los beneficios mínimos aceptables para realizar una inversión?, ¿qué riegos asumirían a la hora de construir nuevas viviendas?, ¿cuál es la capacidad

financiera de cada empresa de promoción inmobiliaria?, ¿qué fiabilidad hay en las predicciones de la dinámica del mercado inmobiliario?, etc. En cualquier caso, en este submodelo no tendremos en cuenta estos criterios, y asumimos que la decisión de los agentes se centra exclusivamente en los aspectos espacio-territoriales, aunque indirectamente en cierta forma también representan decisiones económicas (distribución según diferentes estándares de edificación) o ambientales (distancia a áreas consolidadas), por ejemplo.

Por otro lado, otro componente que afecta el comportamiento de los promotores inmobiliarios es el *componente territorial*, influenciado principalmente por la cultura local de donde ejerce su actividad y donde se concentran sus experiencias profesionales. Por ello podemos afirmar que el papel que juegan los promotores inmobiliarios en España puede diferir bastante a cómo toman las decisiones los promotores de otros países, pudiendo su descripción no coincidir con la de publicaciones de ámbito internacional.

En el caso español, los promotores inmobiliarios, además de tener un papel de intermediario entre el comprador y las constructoras (los denominados en el ámbito anglosajón *realtors*, o *real estate agents*[24]), en muchos casos también actúan como una constructora más (en solitario o en sociedad con otras), lo que les permite subir los precios o incluso expulsar a consumidores del mercado. De hecho, en algunos casos también han estado en estrecha relación con los políticos y técnicos, interviniendo en actuaciones políticas y normativas (Calvo López *et al.*, 2007). En cierta forma, detentan el poder de manipular el mercado inmobiliario independientemente de la demanda de la población, y así pueden incentivar la especulación y la autopromoción. El hecho de que en algún momento del auge económico en España los promotores reconocieran que se ha construido el doble de las viviendas necesarias respalda esta afirmación[25]. En este caso, su comportamiento va más allá de encontrar una alternativa adecuada a la comunidad, pues también persiguen obtener el máximo beneficio con la ampliación del parque de viviendas. Parreño Castellano (2006), por ejemplo, hace un análisis de la protección pública a los promotores privados en Canarias (pero que se podría extender a muchas otras regiones del país), donde explica esta capitalización y promoción lucrativa del mercado de viviendas por parte de los promotores.

[24] Definición: (1) un agente encargado de la evaluación, gestión, alquiler y venta de propiedades; (2) el administrador de bienes de propiedad, que actúa en representación de su propietario (Diccionario *Collins*).

[25] "Los promotores reconocen que se ha construido el doble de las viviendas necesarias". Periódico El País, 31 de enero/2008: http://economia.elpais.com/economia/2008/01/31/actualidad/1201768381_850215.html (último acceso: abril/2017).

Aunque algunos comportamientos de promotores se puedan generalizar, es fundamental conocer la dinámica local y las particularidades de cada región para definir las reglas de decisión en el modelo y así poder plantear escenarios más acordes con la realidad. En los trabajos de Calderón (2002) y Parreño Castellano (2006), se pueden encontrar algunas referencias sobre la actuación de promotores inmobiliarios en España. Con sus matizaciones, resaltan, entre otros, su papel en la dinámica constructiva y su comportamiento en el período de auge inmobiliario, además de cómo les afectan las leyes de suelo y de viviendas.

Todavía centrado en el componente territorial, cabe destacar la importancia de la decisión de los promotores inmobiliarios en términos económicos, estos mucho más desarrollados y con muchos más ejemplos de MBA disponibles que de aquellos de aspectos exclusivamente urbanos. En este caso, destacan ciertos pares de indicadores cuyo desequilibrio les induce a comportarse de una forma o de otra, como compra-venta, oferta-demanda o riesgo-beneficio. Es posible encontrar ejemplos del proceso decisorio de los promotores respecto a componentes económicos en trabajos recientes de Magliocca *et al.* (2014) o Robinson *et al.* (2012).

Por último, el tercer componente estaría relacionado con la *dinámica del mercado inmobiliario*, que se diferencia claramente en los períodos pre y post crisis. Antes de 2008, cuando estalló la crisis económica en España, se formó una burbuja inmobiliaria sin precedentes en el país, inducida por: una coyuntura macroeconómica muy favorable, la conversión de vivienda en un activo refugio, la existencia de facilidades crediticias, la llegada de inmigrantes y una elevada oferta de viviendas (Bernardos Domínguez, 2009, Naredo, 2009, Romero, 2010). En este período, el mejor negocio inmobiliario no consistía en construir y vender viviendas, sino en especular en el mercado del suelo (Bernardos Domínguez, 2009). De una forma o de otra, esta dinámica motivó a los promotores inmobiliarios a intensificar sus actuaciones y maximizar aún más sus plusvalías, despreocupados por las consecuencias ambientales, sociales o económicas que éstas pudieran acarrear. En los siguientes trabajos se pueden encontrar diferentes diagnósticos de las consecuencias territoriales identificadas en este período, y los efectos de una sobre-urbanización descontrolada en España (OSE - Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2005, González Pérez, 2010, Romero, 2010, Vivienda, 2010).

Tras la explosión inmobiliaria de este período previo a la crisis, y ya generada una burbuja que se preveía insostenible, la dinámica constructiva se redujo drásticamente, hecho corroborado por las estadísticas de compra-venta de viviendas, por ejemplo, que muestran una caída importante en el mercado residencial, forzando a los promotores inmobiliarios a frenar sus actividades de expansión y en algunos casos a finalizarlas debido a la falta de condiciones para mantenerse activos. En este caso, el comportamiento de los promotores inmobiliarios sufre un cambio natural, impulsado por la necesidad de adaptación a la nueva realidad.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, asumimos que sólo un tipo de agente es considerado en este submodelo, actuando bajo las mismas reglas de comportamiento, aunque

presenten intereses diferentes en cuanto a la tipología edificatoria (que podría variar, por ejemplo, en función de la capacidad financiera de la empresa). Esta homogeneización en un único tipo de agente facilita la comprensión de algunas dinámicas (tal como la constructiva, que es nuestro principal interés), ya que minimiza la complejidad del análisis. Cuantas más variaciones se consideren, más complejo se torna el modelo debido a la dificultad en detectar el efecto que cada variable ejerce sobre el producto de la simulación.

Respecto a la tipología edificatoria mencionada, destacamos que en este submodelo consideramos tres diferentes tipologías, según el estándar de la vivienda a construir sea alto, medio o bajo, siendo el mercado inmobiliario el componente externo que induce el promotor inmobiliario a interesarse por construir vivienda de una u otra tipología. Para facilitar una mejor comprensión de la estructura y el funcionamiento del comportamiento a simular, presentamos a continuación la descripción lógica de este submodelo, así como la presentación de su interfaz gráfica.

1.1. Estructura lógica del submodelo de los promotores inmobiliarios

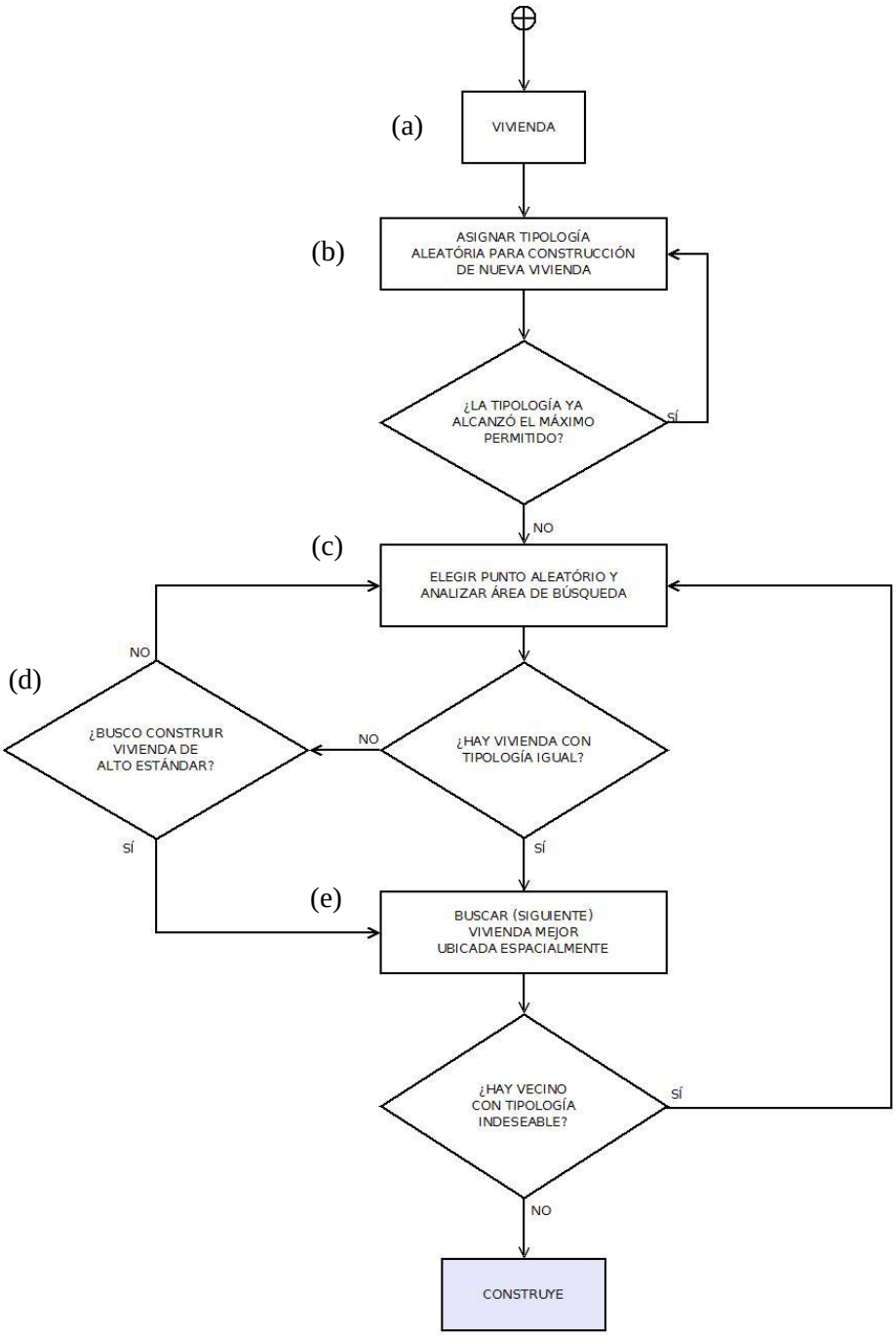
Entre los elementos ya detallados en el modelo conceptual que podrían incidir en el comportamiento de los promotores inmobiliarios, se llevó a cabo una serie de ajustes para posibilitar su adecuación al prototipo propuesto. Teniendo en cuenta la información disponible de partida, los factores finalmente utilizados se presentan en la tabla 5.1, indicando las variables utilizadas, la procedencia de las mismas y una breve descripción del factor generado y como interviene en el modelo.

Variable	*Fuente*	***Factor***	*Descripción*
Zonificación legal del suelo*	Servicio Cartográfico Regional de la Comunidad de Madrid (2003 y 2006)	Clasificación del suelo en urbano, urbanizable, sistemas generales y otros	Es la base sobre la cual definimos dónde legalmente se considera permitido construir viviendas, en este caso, en áreas clasificadas como urbanizables
Número de viviendas	Dirección General de Catastro (2013)	Número de viviendas clasificadas según tipología, delimitados por los siguientes umbrales: alto, medio y bajo estándar	Permite asignar el estándar de la edificación de acuerdo a sus viviendas
Precio de la vivienda	La referencia de datos es la capa de Valor del Suelo descrita en el capítulo 2		
Carreteras	Centro Nacional de Información Geográfica – CNIG (2008)	Distancia a carreteras	Se pretende que la población, en la medida de lo posible, tenga la mejor accesibilidad a las principales vías de comunicación
Paradas de transporte público	Instituto de Estadística de la CM, BD *NomeCalles* (capas correspondientes a las paradas de transporte público en 2005)	Distancia a las paradas de transporte público	Se pretende que la población, en la medida de lo posible, tenga la mejor accesibilidad a los medios de transporte público
Áreas urbanas consolidadas	Instituto Nacional de Estadística – INE, Cartografía de secciones censales (2011)	Distancia a áreas urbanas consolidadas	Se trata de que las nuevas áreas urbanas se encuentren lo más próximas posibles a las ya existentes y, así, optimizar la utilización de servicios públicos y equipamientos básicos para la población (seguridad, transporte, educación, sanidad, entre otros)
Población	Censo 2001	Delimitación de capacidad máxima de población por pixel (descrito en el capítulo 2)	Pretende asignar una capacidad máxima de ocupación en cada pixel edificado. Recordamos que en el caso que su población supere el valor asignado como capacidad máxima, este factor considera el número de población y la convierte en su valor de referencia

* En el modelo integrado esta capa debe varias según resultado de la ejecución del SM1.

Tabla 5.1. Descripción de factores a considerar por el promotor inmobiliario para la ampliación del parque de viviendas.

Para realizar la programación gráfica de este submodelo se desarrolló un diagrama de flujo (figura 5.1) en función de la acción que el agente realiza en cada fase, más detallado que el presentado anteriormente como esquema general de este submodelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.1. Diagrama de flujo que describe las distintas acciones de los promotores inmobiliarios y su secuencia.

La secuencia de comportamiento de los promotores inmobiliarios representada en este diagrama culmina en la ampliación del parque de viviendas con determinadas tipologías tras pasar por una serie de pasos previos. Vale destacar que cada ejecución tiene el objetivo de construir una edificación con un número determinado de viviendas asignadas.

El primero paso es la definición de las áreas de restricción (figura 5.1.a) que en este caso se limita a la consulta a una única capa de información (clasificación del suelo), ya que en teoría solamente aquellas superficies que estén clasificadas como urbanizables son aptas para albergar nuevas construcciones.

A continuación, se define aleatoriamente una tipología de edificación a construir, ya que entendemos que los promotores inmobiliarios tienen interés en variar la oferta de viviendas de diferentes estándares según la situación del mercado. En el submodelo se realiza una distribución entre viviendas con estándares alto, medio y bajo, cuyo porcentaje máximo es definido por el usuario en la propia interfaz (figura 5.1.b).

La etapa siguiente (figura 5.1.c) consiste en la elección aleatoria de un punto del territorio dentro del clasificado como urbanizable y la evaluación de un área delimitada alrededor de este punto (cuya extensión es también definida por el usuario en la interfaz del submodelo). Esto se decide así porque una de las características del efecto *bottom-up* en los MBA es el conocimiento limitado del entorno por el agente, y por ello suponemos que no tiene control total del territorio, sino que conoce perfectamente sus características, aunque únicamente en un área restringida. En resumen, los promotores inmobiliarios tomarán sus decisiones en función de ciertos criterios presentes en un entorno limitado capaces de percibir.

Para encontrar la ubicación más adecuada para el desarrollo residencial, se considera la *Teoría de Shelling* (Shelling, 1969) en cuanto a la atracción y repulsión hacia diferentes entornos, en función de su afinidad o diferencia respecto a las características sociales (en este caso, estándar de la vivienda). De esta forma, el agente realiza una preselección de las mejores ubicaciones considerando la cercanía a viviendas con tipología idéntica a la que se desea construir, manteniendo así el perfil social del barrio originario. Hemos de señalar que en esta etapa del modelo las edificaciones de alto estándar podrían, de forma excepcional, construirse en áreas aisladas alejadas del tejido urbano consolidado, independientemente de la existencia o no de elementos con tipología similar en su entorno, simulando así la expansión conocida como crecimiento difuso o disperso, caracterizado principalmente por el desarrollo de urbanizaciones periféricas de alto (y en algunos casos, medio) estándar (figura 5.1.d).

Asimismo, en función de la escala de preferencia y a partir de la selección previa de áreas con características deseables en cuando a la vecindad, los promotores inmobiliarios se centrarían en seleccionar aquellas opciones ubicadas a una determinada distancia de elementos espaciales que resultan de interés para la población (figura 5.1.e). El resultado de preferencias en función de la distancia a estos elementos se obtiene del producto del cálculo de la siguiente fórmula (ecuación 5.1), donde la preferencia (P) de cada tipología de promotor inmobiliario (t) es la suma de los valores de las variables (V) consideradas. A todas ellas se les puede otorgar un peso (p) que exprese la importancia de cada una en el proceso de selección final.

$$Pt = ((plt * V1) + (p2t * V2) + (p3t * V3) + \cdots + (pnt * Vn)) \quad \text{[Ecuación 5.1]}$$

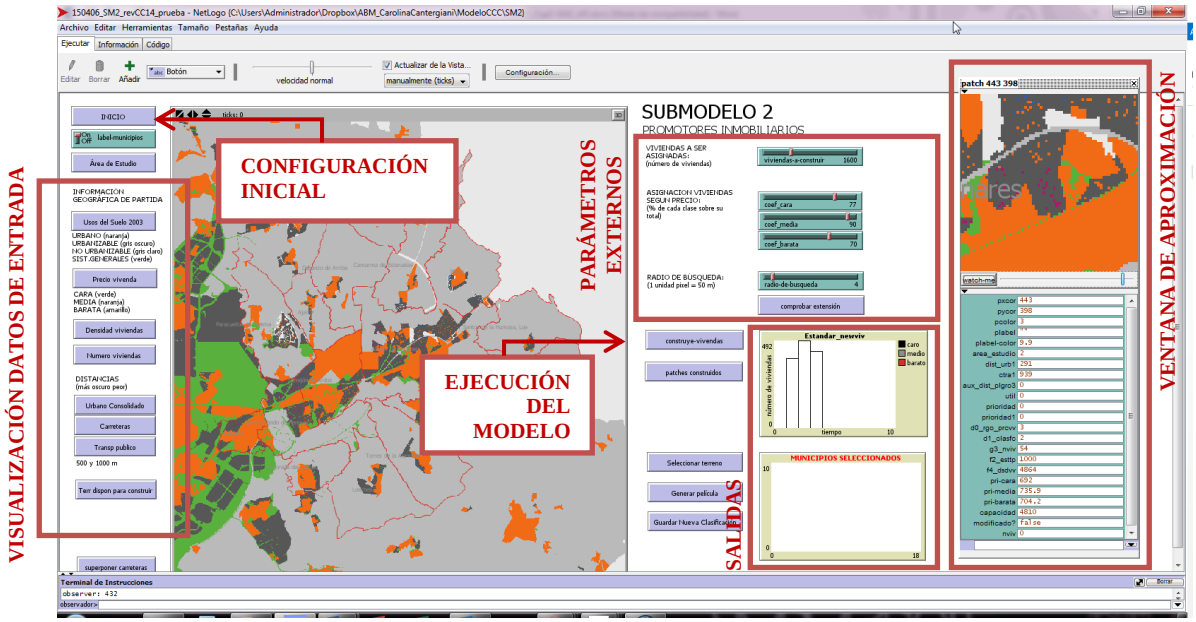
Esta fórmula está integrada en la programación interna del modelo y es el propio usuario quien asigna en la interfaz un valor para cada peso (entre 0 y 1) según las preferencias espaciales de los promotores en cuanto a la distancia a urbano consolidado, carreteras o transporte público para cada estándar de viviendas.

La repetición del proceso dependerá de la demanda de crecimiento de número de viviendas que se desea simular. En este sentido, contemplamos en la interfaz unos umbrales que varían de 100 a 5.000, obedeciendo unos valores un poco superiores a la media anual identificada en períodos de gran expansión inmobiliaria. Estos valores tienen como punto de partida los datos censales de 2001, que indica un crecimiento de 48.841 viviendas entre 1991 (126.697) y 2001 (175.538), esto es, un 38,5% en diez años, lo que resulta en una media de 4.884 viviendas construidas anualmente. Destacamos que tras la ejecución de la simulación y construcción de cada edificación, el modelo le asigna el número de viviendas correspondiente a la media del número de viviendas de los ocho pixeles en su vecindad inmediata.

1.2. La interfaz gráfica del SM2 en NetLogo

La interfaz se compone de los mismos tres bloques que el submodelo de planificadores urbanos (SM1): uno de entrada, otro de la sintonización del modelo (definición de parámetros) y el último de salida de la simulación (figura 5.2). La diferencia con el primero consiste en los datos espaciales de entrada y en la parametrización de los factores disponibles para elaborar diferentes escenarios de simulación.

En este caso los datos espaciales de entrada serían: usos del suelo (reclasificados en urbano, urbanizable, no urbanizable y sistemas generales), precio de vivienda (alto, medio y bajo), densidad y número de viviendas, mapas de distancia a elementos espaciales como áreas urbanas consolidadas, carreteras y transporte público.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.2. Interfaz gráfica (*NetLogo*) del submodelo de ampliación del parque de viviendas (SM2) y sus herramientas de control.

En el segundo bloque se define, en primer lugar, el incremento del volumen de viviendas que se pretende simular, y a continuación se delimita la cantidad máxima permitida de construcción de alto, medio o bajo estándar. Los umbrales de referencia se establecieron entre 0 y 5.000 para el primero (para permitir simulaciones de casos extremos) y 0 a 100 (proporcional para cada coeficiente) para la tipología edificatoria, aunque siempre es posible cambiar internamente los valores mínimos y máximos. En esta sección también se define el radio de búsqueda para los promotores inmobiliarios (propuesto entre 0 y 30 pixeles, esto es, hasta 1,5 km) – área que se supone puede presentar el mismo nivel de interés en cuanto al desarrollo residencial.

Los resultados obtenidos se representan de forma idéntica a los del submodelo de planificadores urbanos (SM1) (cartografía, gráfico de barras y plantillas). A diferencia del primero, donde el resultado se visualiza en grandes manchas, en este submodelo la distribución final de nueva edificación se representa de forma más acotada (nuevos pixeles seleccionados, adyacentes o no), que debido a la escala general y la extensión del área de estudio no son fácilmente visibles. Por ello, se sugiere la visualización en una ventana de aproximación disponible en el programa, conforme indicada en la figura 5.2.

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones del comportamiento de los promotores inmobiliarios

Como se ha insistido, los resultados de la simulación pueden ser tantos como escenarios se deseen reproducir, realizando pequeñas variaciones en las condiciones iniciales del sistema. No obstante, para experimentar con el modelo y poder evaluar los productos generados es necesario realizar diferentes ensayos, de cara a verificar si el prototipo es coherente con lo propuesto. En este submodelo los escenarios no se basan en la configuración de distintos tipos de agentes como en el primero, sino en el establecimiento de diferentes condiciones externas ante a las que reaccionarán los agentes, y las cuales se describen a continuación.

Tres de los componentes básicos del entorno para definir los escenarios de promotores inmobiliarios son: la *dinámica constructiva*, el *equilibrio en la disponibilidad de distintas tipologías de viviendas* y la *forma de crecimiento urbano*. El estado de cada componente y su combinación pueden indicar cambios en el comportamiento de los promotores inmobiliarios, ya que éstos tienen que adaptarse de forma que puedan alcanzar los beneficios esperados. A continuación se presenta una breve contextualización de cada componente con el objetivo de facilitar la comprensión del planteamiento de los diferentes escenarios para la puesta a prueba del modelo:

- *Dinámica constructiva.* Cuando el ritmo de construcción en el área de estudio es dinámico, consecuentemente se convierte en un incentivo para los promotores inmobiliarios que intensificarán sus actividades. En contrapartida, cuando el ritmo constructivo se encuentra más estancado (situación comúnmente vinculada a una crisis económica), este flujo es visiblemente menos dinámico, y el ritmo de compra-venta de viviendas se ralentiza.
- *Equilibrio en la disponibilidad de distintas tipologías de viviendas.* Indica que todas las tipologías de edificación (alto, medio y bajo estándar) son promocionadas de forma homogénea y equilibrada, frente a otros momentos en los que puede producirse un estancamiento de oferta de alguno de las tipologías. Por ejemplo, en situaciones de recesión económica o crisis, son las edificaciones de alto estándar las que siguen habitualmente promocionándose, ya que suelen estar vinculadas a mejores condiciones económicas de los compradores que actúan mayoritariamente de forma independiente a la situación general del mercado.
- *Forma de crecimiento urbano.* A veces el desarrollo urbano se encuentra más enfocado a la ciudad dispersa, con incentivos y valoración de urbanizaciones aisladas vinculadas a una utópica mejor calidad de vida. En este caso, los promotores inmobiliarios considerarían un área de actuación mucho más amplia, apenas considerando la

concentración de edificación o tipología similar en la vecindad para tomar la decisión de edificar.

Como ejercicio, los tres escenarios propuestos para la experimentación del modelo – especulador (en el caso, equivale al `*business as usual*`), sostenible (tendiendo a la protección medioambiental) y de crisis (con un enfoque conservador) – son el resultado de diferentes combinaciones de los componentes citados anteriormente, tal y como se presenta en la tabla 5.2. Respecto a aquellos definidos en el primer submodelo, correspondería, en este orden, con el perfil de planificador urbano especulador, sostenible y conservador.

Escenario	*Dinámica constructiva (alta o baja)*	*Equilibro social de la vivienda (equilibrado o no)*	*Estructura de ciudad dispersa (sí o no)*
Especulador	alta	equilibrado	sí
Sostenible	alta	equilibrado	no
Crisis	baja	desequilibrado	no

Tabla 5.2. Componentes y valoración considerados en cada escenario de promotores inmobiliarios.

El escenario especulador representaría un momento de auge económico, con alta actividad constructiva, considerando que la población presenta situación financiera favorable y genera demanda de nueva residencia en todas las clases de forma homogénea. En este caso, también hay fuertes intereses de ocupación dispersa entre los sectores de población de alto y medio poder adquisitivo, priorizando el desarrollo de urbanizaciones aisladas. Todo desarrollo, independientemente del estándar o ubicación, es beneficioso para los promotores inmobiliarios debido a la excelente condición del mercado inmobiliario.

El segundo escenario se acerca a una situación sostenible[26], indicando, como en el primer escenario, que el mercado está también activo y su dinámica es socialmente equilibrada. En este caso la diferencia reside en que los promotores se interesarían por desarrollar nuevas áreas cercanas a tejidos urbanos consolidados, optimizando servicios públicos como infraestructura, transporte, instalaciones urbanas, entre otros.

[26] Considerando la sostenibilidad en este caso como equilibrio social (las distintas clases crecen simultáneamente) y tendencia de ciudad compacta, evitando urbanizaciones aisladas, cuyo impacto ambiental es territorialmente menos intenso.

El último escenario representa una situación de crisis, que implica una ampliación mínima del parque de viviendas. En primer lugar porque el mercado está poco activo y las constructoras no están dispuestas a realizar importantes inversiones para promover nuevas zonas residenciales. Al mismo tiempo se considera que la población está contenida, con consumo controlado y poca actividad de búsqueda de nueva vivienda, a excepción de los sectores de población con mayor poder adquisitivo. En este caso, el crecimiento disperso no es promovido por su alto coste de implantación para los promotores y también por el alto coste para la población. Es el caso de una situación en la que intentan al máximo cumplir con las expectativas de la población para poder sostener sus actividades.

Para la correcta transferencia de los escenarios teóricos a la ejecución práctica del modelo, es importante que cada condición pueda ser representada mediante el ajuste de alguna herramienta disponible en el modelo. Se tendrán en cuenta una serie de consideraciones para elaborar la ponderación de los distintos factores para cada escenario establecido (tabla 5.3): la dinámica constructiva puede ser representada por la cantidad de viviendas a construir; el equilibrio social de la vivienda puede definirse según las diferentes tipologías de viviendas potenciales; y finalmente, para que la estructura de la ciudad sea compacta o dispersa, se puede asumir según la existencia de edificaciones próximas o no, ajustadas en función del área de influencia (radio de búsqueda). Cabe destacar que, dado que los resultados varían en función de los valores iniciales de referencia, se optó por ajustar los parámetros de entrada utilizando valores extremos, buscando resaltar las diferencias y poder así evaluar más claramente el correcto funcionamiento del submodelo.

Escenario	*Número de viviendas a construir (0 a 5.000)*	*Coeficiente de viviendas según estándar* (0 a 100)*			*Radio de búsqueda (0 a 1,5 km)*
		alto	*medio*	*bajo*	
Especulador	3500	50	70	60	1,5km (30pix.)
Sostenible	3500	40	90	70	0,5km (10pix.)
Crisis	500	80	20	10	0,5km (10pix.)

* En el modelo, cada coeficiente de estándar de viviendas es representado por un valor que varía de 0 a 100, según cuántas se desee construir de cada tipología. Internamente, el propio modelo trata de calcular la proporción de cada una respecto al total, cuantificando las viviendas de cada estándar a simular.

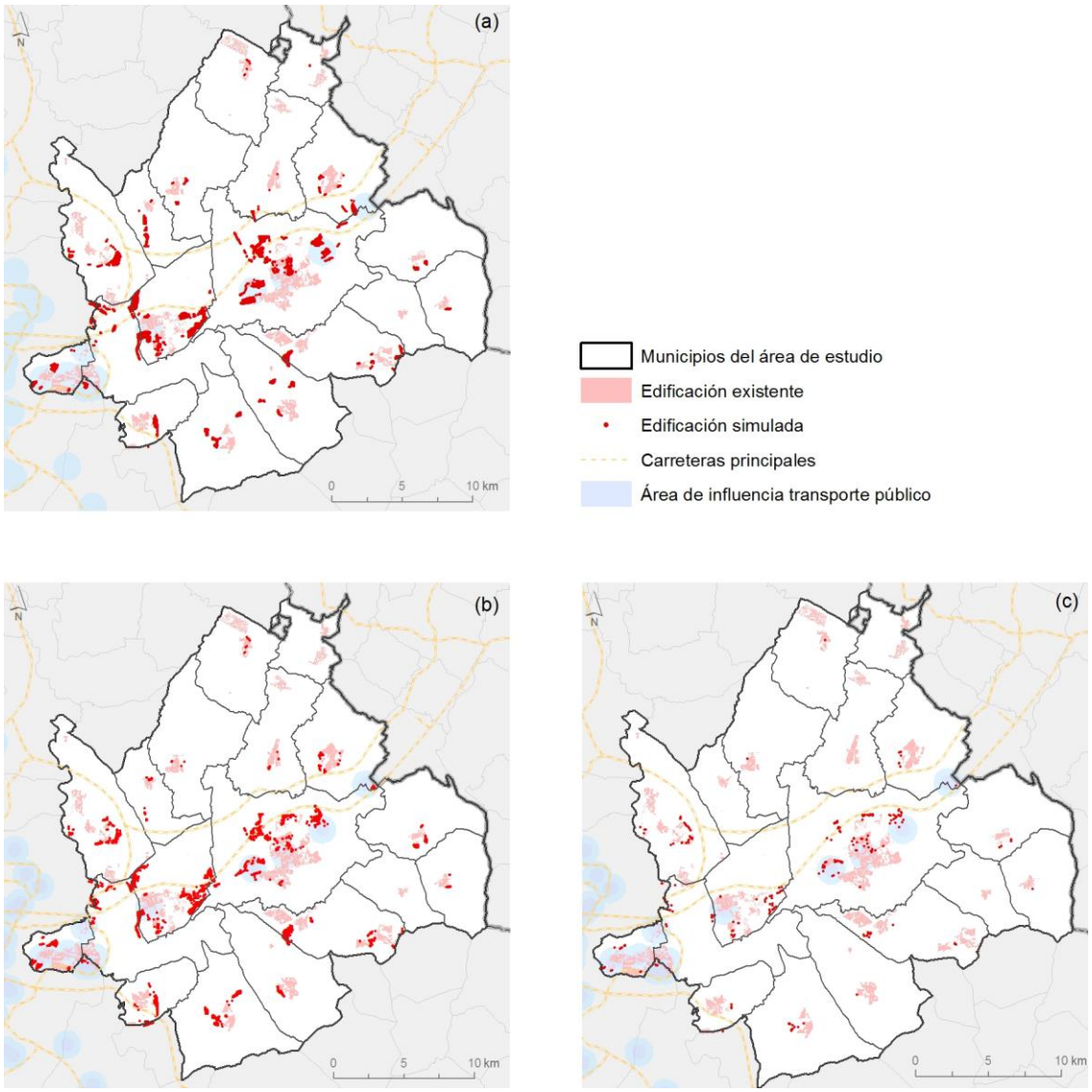
Tabla 5.3. Ponderación de los distintos factores para la asignación de nueva edificación residencial, según condiciones definidas para cada escenario (según la tabla 5.2).

Hay que mencionar que para ejecutar el modelo se consideraron los siguientes pesos en cuanto a la distancia a elementos espaciales para cada tipología (tabla 5.4), obedeciendo un equilibrio que optamos por no variar en los tres escenarios.

Elemento espacial	*Alto estándar*	*Medio estándar*	*Bajo estándar*
Distancia a Carreteras	50	33	20
Distancia a tejido urbano consolidado	30	33	40
Distancia a Estaciones de Trasporte Público	20	33	40
Suma % de preferencia	**100**	**100**	**100**

Tabla 5.4. Ponderación espacial (variable *p* en la ecuación 5.1) por defecto en cuanto a los elementos de interés de los promotores inmobiliarios para el desarrollo residencial de alto, medio y bajo estándar (que pueden ser cambiados por el usuario).

La ejecución del modelo con los parámetros presentados produjo distribución heterogénea (figura 5.3), con tres resultados espaciales diferentes debido a las condiciones iniciales definidas para cada escenario como cabía esperar. El primer escenario especulador (figura 5.3.a) presenta el crecimiento de las numerosas edificaciones distribuido a lo largo del territorio de forma más dispersa. El segundo escenario (figura 5.3.b) cumple con características sostenibles, presentando la agrupación de nuevas edificaciones de forma más compacta. Por último, el escenario de crisis (figura 5.3.c) cuenta con poco crecimiento de edificaciones, que se distribuyen de forma equilibrada.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de BCN-25 (IGN), Dirección General de Catastro y BD NomeCalles.

Figura 5.3. Distribución de nuevas viviendas (en detalle) para promotores inmobiliarios según escenarios: (a) especulador, (b) sostenible y (c) crisis.

Si bien el reto del modelo es simular el crecimiento urbano, hay que considerar que lo que se presenta es un prototipo, por lo tanto el objetivo irá más allá de analizar temáticamente los productos resultantes de la simulación, comprobando que el modelo se reproduce correctamente y que los productos cumplen los criterios previamente establecidos.

Inicialmente, transferimos los resultados de la simulación de los tres escenarios a un SIG superponiéndolos al resto de la información geográfica presente en el modelo, como carreteras, usos del suelo, distancia a elementos no-deseables, etc. Se realizó una primera verificación con el análisis espacial para comprobar que no hay inconsistencias, como edificación superpuesta a elementos incompatibles o en áreas no clasificadas como urbanizables. Además de hacerlo en el SIG, realizamos una comprobación en la propia interfaz del *NetLogo* añadiendo un código

específico en la línea de comando del submodelo. Este código genera el número de las edificaciones ubicadas en áreas no apropiadas, en este caso, superficie con cualquier clasificación diferente a urbanizable[27]. Para los tres escenarios se comprobó que no hay inconsistencia en cuando a la ubicación de nuevas edificaciones confirmando que están, en su totalidad, asignadas en áreas sin restricciones.

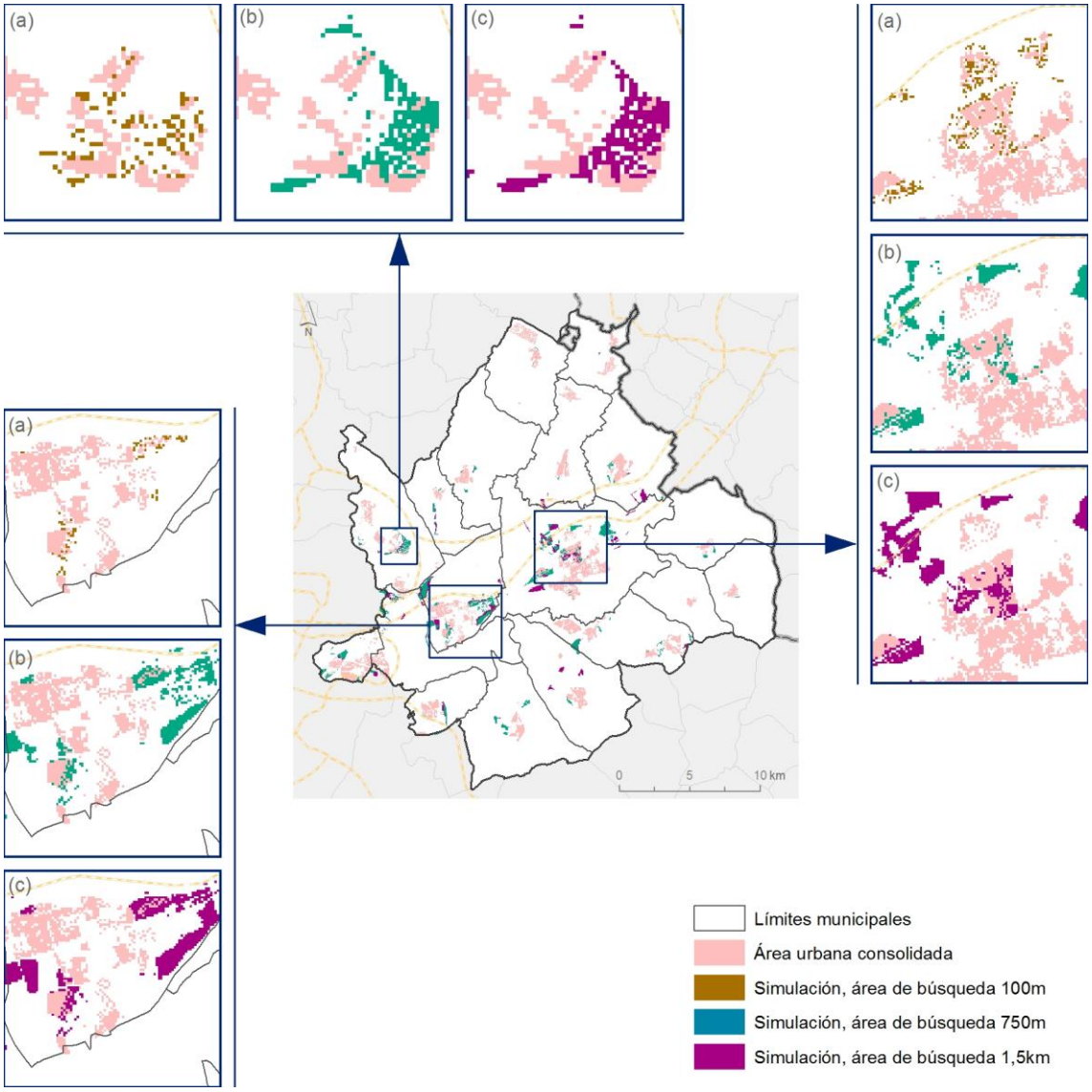
Tras esta primera comprobación, finalmente analizamos (utilizando el SIG) cada parámetro por separado para verificar el submodelo: el número de viviendas a construir, su asignación según estándar y el área de búsqueda.

Número de viviendas a construir: Se comprueba que la cantidad de viviendas creadas es correcta, sumándolas en la plantilla de salida, o en el producto espacial resultante, y coincide con el número de pixeles especificado en la interfaz del modelo. En todas las comparaciones hubo coincidencia en un 100%, corroborando su fiabilidad.

Asignación de edificaciones según estándar y sus preferencias: En cuanto a la elección de la ubicación de las nuevas edificaciones según distancias a elementos espaciales de interés, se superponen los resultados de los tres escenarios a las capas correspondientes de cada elemento para averiguar que cumplen las expectativas (figura 5.3).

Área de búsqueda: Para comprobar el correcto funcionamiento del parámetro indicado como área de búsqueda, consideramos simulaciones con configuraciones iniciales idénticas para que no interfiera en el resultado; un crecimiento de viviendas máximo (5.000) con coeficientes de estándar alto, medio y bajo definidos en 50. En este caso, el parámetro que cambiamos para realizar la verificación fue el valor del área de búsqueda. En un primer ensayo, consideramos como el área de búsqueda 100m (equivalente a 2 píxeles), esto es, que no importa lo que haya alrededor para que el promotor inmobiliario tome la decisión de construir o no una edificación. A continuación ensayamos el mismo modelo con área de búsqueda con distancias de 750m y 1,5km (respectivamente, 15 y 30 píxeles), la máxima permitida en la actual configuración. Inspeccionando las tres distribuciones con el mismo detalle (figura 5.4) apreciamos las diferentes tipologías de agrupaciones de edificación. El resultado indica que este parámetro responde a las expectativas del modelo y sirve finalmente para indicar el tipo de elección de los promotores inmobiliarios entre crecimiento disperso (menor área de búsqueda) y compacto (mayor área de búsqueda), planteado en la definición de los escenarios.

[27] Considerando que las áreas urbanizables tienen clasif = 1, la línea añadida al código es *`Result: show edificaciones (clasif > 1)´ y los resultados esperados deben ser: `Result: 0´*.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.4. Comparación de resultados de tres simulaciones considerando el área de búsqueda de 100m (a), 750m (b) y 1,5km (c), y demás parámetros de arranque idénticos (crecimiento de viviendas máximo – 5.000 – con coeficientes de estándar alto, medio y bajo definidos en 50).

Tras comprobar que las herramientas disponibles funcionan acorde a lo planteado y, principalmente, que están correctamente indicadas para representar cada criterio definido en los escenarios, podemos considerar que este submodelo está correctamente construido.

CAPÍTULO 6.

SUBMODELO DE OCUPACIÓN RESIDENCIAL POR LA POBLACIÓN (SM3)

1. Introducción

La entidad *población* es uno de los principales motores de este submodelo, ya que la decisión que toman en cuanto a cambiarse o no de residencia genera la demanda de nuevas viviendas, que viene a ser uno de los criterios clave para asignar los posibles cambios de clasificación del suelo por parte de los planificadores urbanos.

Se trata de un agente comúnmente utilizado en MBA aplicado a cuestiones urbanas, por contar siempre con un comportamiento humano asociado y relacionado a un fenómeno emergente, en este caso ocupación de viviendas. Sabemos que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en cualquier proceso de dinámica urbana, y a la vez es extremamente complejo (Skinner, 1953, Bonabeau, 2002b, Bonabeau, 2002a, Kennedy, 2012). Sin embargo, el comportamiento es difícil de replicar, pues la conducta humana no suele ser objetiva, y está determinada por la cultura, actitudes, emociones, valores, entre otros factores no lineales, ni fácilmente predecibles en un determinado contexto social, y quizás por ello genere gran interés por parte de la comunidad científica que históricamente la intenta comprender y explicar.

Lambert y Klineberg (1959) localizan en los científicos Comte, Tarde, Gustave Le Bon, Mc. Dougall, Ross y Floyd Allport los precursores de este pensamiento social (Souza, 2005). Estos estudios de cómo la comunidad afecta el comportamiento de un agente se encuentran en un término medio entre la psicología y la sociología, y por ello se encajan en la llamada *Psicología*

Social. Floyd H. Allport, considerado por muchos el fundador de esta rama, se destaca por estudiar el comportamiento y conciencia de los individuos a través de estímulos y respuestas sociales (Allport, 1924). Sin embargo, sigue siendo complicado reproducir unos comportamientos de naturaleza humana y, por ello estos estudios suelen ir acompañados de una elevada carga de incertidumbre.

En este trabajo se ha pretendido vincular el comportamiento de la población con los estudios derivados de la psicología social, visto que los futuros residentes actúan en relación con su entorno y en función de estímulos externos. En este ámbito, y con especial orientación a aquellos enfocados al ambiente urbano, destacamos algunos trabajos de científicos que investigan el comportamiento social de los individuos (Valera y Pol, 1994, Tabernero *et al.*, 2010, Tabernero *et al.*, 2015).

Dado el indudable interés en investigar el comportamiento de la población en términos científicos, y en su rol de agente principal del proceso de urbanización, la población se encuentra presente en casi todos los modelos urbanos con enfoque *bottom-up*. La mayoría de autores que desarrollan MBA en este ámbito la utilizan como agente, aunque es tratada y agrupada de forma diversa en función del contexto y objetivo del modelo.

A continuación presentamos las clasificaciones de población más comúnmente utilizadas en la modelación, y si bien no pretendamos relacionar todos los tipos de agrupaciones existentes, tratamos de presentar su variabilidad a través de ejemplos. En un gran número de casos la representación se realiza a través del número de población u hogares con determinadas características que permiten discriminar diferentes grupos para el estudio de su comportamiento.

Dahal (2014), por ejemplo, no llega a tratar la población como un agente propiamente dicho, sino como hogares clasificados según las características de los habitantes que los componen, asignándoles diferentes comportamientos. También Barros (2012) y Fontaine (2009) utilizan los hogares como agentes. La primera los discriminan según tres grupos económicos conforme su poder adquisitivo (alto, medio o bajo), división que será adoptada en esta investigación. En este caso, cada grupo actúa, no sólo de acuerdo a intereses espaciales comunes (proximidad a áreas con buena infraestructura, comercio, oportunidad de trabajo, etc.), sino también intereses particulares (obedeciendo las restricciones impuestas por su volumen de ingresos y según la ocupación previa de población con más recursos económicos en las áreas de interés). Ya el segundo asocia el comportamiento de la población a la estructura familiar (casado con hijos, casado sin hijos, soltero o jubilado) y por lo tanto utiliza características como localización del hogar, número y edad de adultos, y número y edad de niños para la modelación, combinándolas con parámetros globales (tiempos para independización, tasa de matrimonio, tasas de nacimiento y defunción, etc.). En la misma línea, Feitosa (2011) estudia la segregación urbana con MBA, para lo cual clasifica sus agentes según el perfil que se define en base a la renta, edad del cabeza de familia, la presencia o no de niños y su nivel educacional. Asimismo, Crooks, en

varios de sus trabajos, y según las características de sus modelos, considera casi siempre la población como un agente único y por lo tanto con idéntico comportamiento. De todas formas, en otros casos menos afines al objetivo de este estudio, la población también puede aparecer con otras agrupaciones, como por ejemplo grupos étnicos (Crooks, 2008), actuando de forma diferenciada según intereses particulares. En el caso de esta investigación, se entiende por *población* aquella unidad que representa un conjunto de personas que comparten vivienda, que conceptualmente se asemejaría a lo que se identifica formalmente como *hogar*.

De cualquier forma, independiente del tipo de agregación elegida o del rol que asumen en el modelo, los agentes de los trabajos citados presentan un comportamiento específico para cada caso en particular, esto es, su enfoque y decisión son modelados de acuerdo al objetivo planteado. Sin embargo, aun sabiendo que el agente población es el mismo en su concepción (personas o agrupaciones de personas que tienen cierto comportamiento y que toma decisiones que pueden cambiar la deriva de un fenómeno), el abanico de reglas de comportamiento puede ser infinito, ya que se definen en función, no sólo de su agrupación, sino también de una combinación de factores que tiene en cuenta no sólo el objetivo del modelo, sino también la escala, unidad espacial, umbrales de las agrupaciones, interrelaciones o características del entorno, que pueden variar considerablemente.

Hay que insistir en que, aunque el proceso decisorio de la población en esta investigación está afectado por situaciones económicas, sociales, culturales y ambientales, en el presente submodelo se consideran sólo variables espacio-territoriales, pretendiendo abarcar las demás siempre y cuando sea posible representarlas espacialmente o exista información a escala, extensión y calidad adecuadas.

Como se ha mencionado a lo largo de esta investigación, el submodelo de población es el que más se acerca a un MBA considerando sus particularidades. A diferencia de los demás, en este submodelo los agentes interactúan entre ellos y con el entorno cambiando su comportamiento acorde a nuevas situaciones, que resulta ser una de las características clave de un agente. Como apunta Barros (2012), los MBA se basan en el entendimiento de que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en procesos y cambios urbanos; por ello consideramos que este submodelo, analizado individualmente, es el más representativo en comparación con los dos primeros.

La toma de decisiones de la población en cuando a la ocupación de viviendas consiste, así como el submodelo de promotores inmobiliarios, en un proceso decisorio desencadenado de abajo hacia arriba (*bottom-up*). En este caso cada ejecución del modelo produce diferentes resultados dependiendo de la situación inicial del sistema, aunque las variaciones de partida sean sutiles. Los detalles sobre esta dinámica se presentan a lo largo de este capítulo, que empieza por introducir la estructura y la lógica del submodelo enfocado en sus aspectos técnicos, conceptuales

y prácticos, seguido de la presentación de su interfaz gráfica, para luego culminar con la descripción de resultados, análisis y verificación correspondientes.

1.1. Estructura lógica del modelo

La ocupación de viviendas consiste en un proceso natural y continuo que puede ocurrir en menor o mayor intensidad dependiendo de varias condicionantes, tales como el momento económico, las costumbres culturales de la población, la oferta de viviendas, entre otros. En el submodelo que se presenta, el movimiento de la población para llevar a cabo la ocupación de viviendas es motivado por una serie de fuerzas motrices definidas en el arranque del proceso. Esta búsqueda de nueva vivienda se basa en una serie de criterios de preferencia siempre distribuidos espacialmente. Estas preferencias varían según el nivel de renta, por lo que en este submodelo, a la diferencia de los anteriores, se establecen hasta tres tipos de agentes que actúan según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo.

Los diferentes tipos de agentes interactúan entre ellos y con el entorno, cambiando su comportamiento acorde a las nuevas situaciones que van emergiendo. Para entender mejor la ejecución del modelo describiremos los atributos asociados a los agentes y al entorno, así como los factores a considerar por la población para ocupar una nueva vivienda.

1.1.1. Atributos del submodelo asociados a los agentes

Los agentes están caracterizados por cinco atributos (alguno de ellos dinámico y cambiante) que se combinan para producir el cambio de residencia, que son: poder adquisitivo, situación, nivel de satisfacción, estado y capacidad de insistencia.

Poder adquisitivo (alto, medio, bajo): se define automáticamente en el inicio de la simulación, en función de la tipología de la edificación donde estén asentados (alto, medio y bajo estándar). Este atributo sufre una variación inicial de forma aleatoria, en función de un porcentaje definido por el usuario en la interfaz con el objetivo de acercarlo a una representación más acorde a la realidad, intentando reproducir posibles cambios de estatus de la población por mejoría en calidad de vida, situaciones de inestabilidad económica familiar, cambio de estilo de vida, etc.

Situación (asentado o no-asentado): indica si el agente está actualmente ubicado (asentado) en alguna vivienda o no. Esta última opción intenta reproducir procesos de crecimiento de población por migración o cambio de ciclo de vida y representa el estado transitorio previo a la búsqueda de viviendas. Este atributo se modifica conforme su comportamiento le conduzca a abandonar su residencia, o moverse hacia una nueva.

Nivel de satisfacción (satisfecho o insatisfecho): estando todas las edificaciones tipificadas en alto, medio y bajo estándar, se considera que un agente está satisfecho si la misma coincide con su poder adquisitivo. En caso contrario, consideramos que el agente no está satisfecho, y si está también en estado activo (según atributo asignado), partiría en búsqueda de una vivienda más acorde a sus posibilidades económicas. Este atributo cambia siempre que su tipología y la de la vivienda no sean coincidentes.

Estado (activo o pasivo): los agentes activos se encuentran en estado de búsqueda de vivienda (si a la vez están insatisfechos con la tipología de la edificación donde están ubicados), mientras que los pasivos se mantienen estables y sin reacción (aunque son vulnerables porque pueden ser expulsados de sus viviendas habituales, debido a su pasividad). En un primer momento se define una distribución homogénea y aleatoria de ambos tipos, para luego cambiar según sea expulsado (se convertiría en activo) o se asiente en una vivienda (se convertiría en pasivo). El objetivo de este atributo es diferenciar aquellos que están insatisfechos con su vivienda actual por causas diversas (no adecuadas a su clase socioeconómica), pero que aun así se quedan dónde están (por comodidad, falta de recursos u otro), de aquellos que buscan condiciones más adecuadas para vivir (en función de los elementos de atracción que se definirán más adelante). De esta forma, el prototipo permite simular, no sólo procesos de expansión urbana, sino otros más sostenibles de renovación urbana, posibles procesos de gentrificación, etc.

Capacidad de insistencia (fijados entre 0 y 10): hace alusión al número de ejecuciones con intento de cambio de residencia fallido permitido para cada agente en su búsqueda de nueva residencia. Pasado este umbral, el agente se adapta a su entorno, igualando su tipología a la de su vivienda actual. Este atributo es definido inicialmente por el usuario en la interfaz y no se modifica.

Excepto el último, todos los atributos cambian y evolucionan en cada ejecución del modelo, variando en función de lo que la población vaya seleccionando. A continuación presentamos las diferentes combinaciones que puede asumir el agente a lo largo de la simulación (tabla 6.1). Las referencias a cada uno se indicarán más adelante con la introducción del diagrama de flujo correspondiente a sus acciones.

	Cambios referentes a la configuración inicial			*Alteraciones a lo largo de la simulación*		
	Estado A	*Estado B*	*Estado C*	*Estado D*	*Estado E*	*Estado F*
	Inicio	*Tras cambio de % de tipología*	*Tras asignación del crecimiento de población*	*Al ocupar nueva vivienda*	*Al ser expulsado de su vivienda*	*Al quedarse en su vivienda tras buscar varias veces y no encontrar (adaptación al entorno)*
	inicio	*interfaz*	*interfaz*	*modelo*	*modelo*	*modelo*
Tipología	= tviv*	cambio**	aleatoria	=	=	= tviv*
Situación (asentado o no)	sí	sí	no	sí	no	sí
Satisfacción	sí	no	no	sí	no	sí
Estado	aleatorio (50%)	=	activo	activo	activo	pasivo
Insistencia	interfaz	=	=	=	=	=
Resistencia	0	0	0	0	0	0

* Tipología de la vivienda
** Alta hacia media; media hacia alta o baja; baja hacia media

Tabla 6.1. Combinaciones de atributos a las que pueden asumir el agente a lo largo de la simulación.

1.1.2. Atributos del submodelo asociados al entorno

En cuanto a los atributos asociados al entorno sobre el que se mueven y desarrollan los agentes, se ha incluido además del volumen de población, también el número de vivienda disponible, nivel de ocupación (población asentada por edificación) y capacidad máxima de población por pixel (proceso descrito en el apartado 3.3). La solución para asignación de diferentes grupos de población según poder adquisitivo, o lo que llamamos tipología de la población, se considera el mismo nivel del estándar de la edificación donde se ubica.

Aunque todos son fijados inicialmente, estos atributos sufren algunos cambios a lo largo de la ejecución de la simulación (en el modelo integrado el número y tipología de viviendas dependerán de resultados de la ejecución del SM2).

Asimismo se han incluido criterios de preferencia espacial para la reubicación de la población en las nuevas viviendas, que están representados progresivamente de mayor a menor interés, como en los otros dos submodelos. Estas preferencias están calculadas en función de la distancia a elementos territoriales como vías de comunicación, paradas de transporte público, equipamientos sanitarios y educativos o proximidad a los distintos estándares de viviendas, definidas según cada tipología de población. Estos atributos se consideran estáticos y por lo tanto

no sufren cambios a lo largo del proceso de simulación. La diferencia a destacar en relación a los anteriores submodelos es que los pesos no están disponibles para ajustarlos en la interfaz, ya que se trata de un modelo mucho más complejo y con muchas otras variables a calibrar – y por lo tanto evitamos desbordar el usuario con demasiada información. La inserción de todos los parámetros que permiten variación no es tan benéfica si se tiene en cuenta el ruido desnecesario que produciría. Dichos pesos están incorporados en el modelo de forma predeterminada (presentados en detalle más adelante), y en el caso de necesidad, ajustarlos para otra área de estudio exigiría poco esfuerzo de programación.

Por último, merece matizar que en este submodelo el volumen de población se incrementa inicialmente conforme definición del usuario en la interfaz, y cuya redistribución en las viviendas de diferentes estándares disponibles consiste en el producto principal de la simulación.

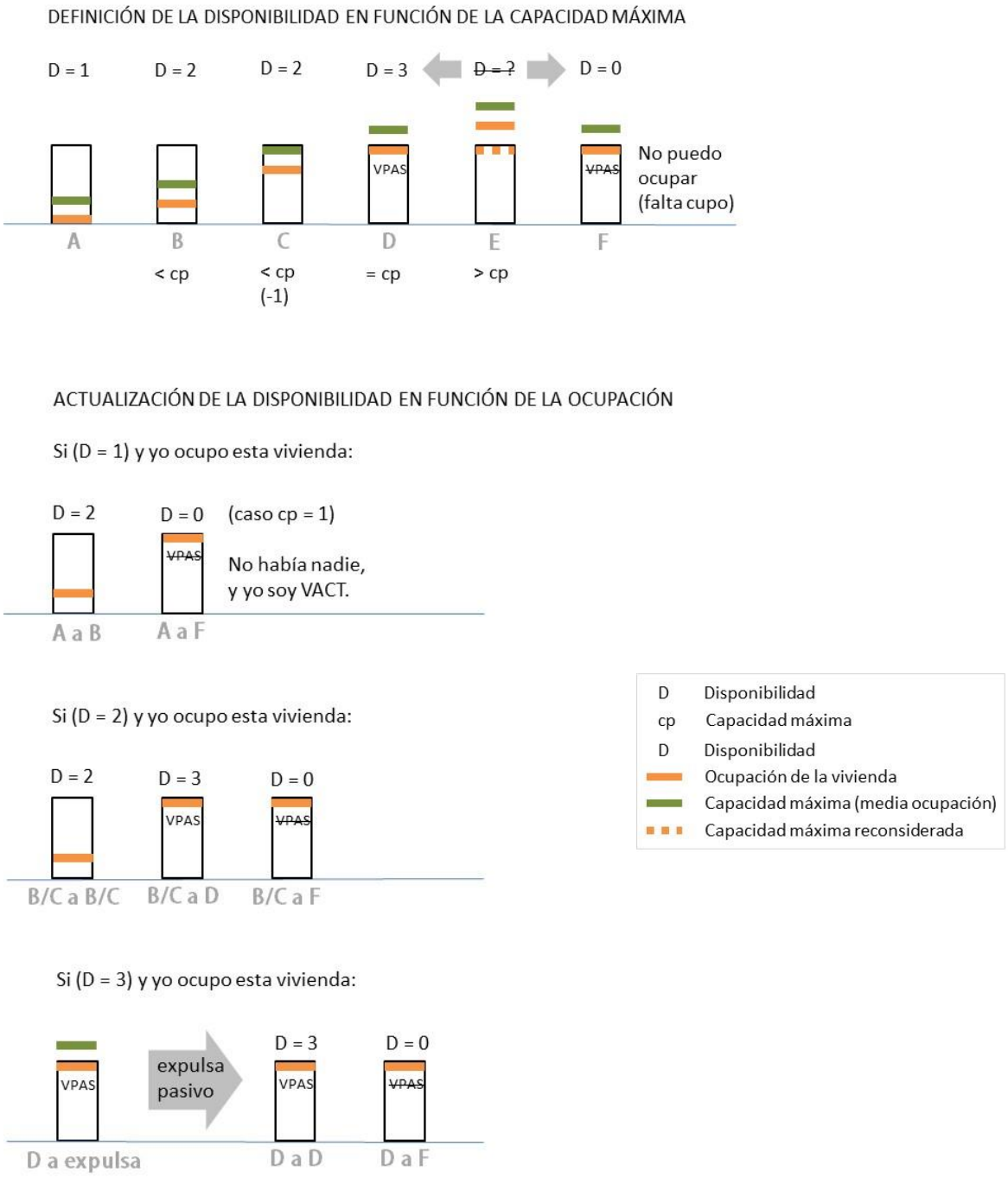
1.1.3. Descripción de factores a considerar por la población para ocupar nuevas viviendas

Entre los elementos que podrían incidir en el comportamiento de la población y ya detallados en el modelo conceptual, se llevó a cabo una serie de ajustes para posibilitar su adecuación al prototipo propuesto. Los factores finalmente utilizados se presentan en la tabla 6.2, indicando las variables de partida, la fuente de las mismas y una breve descripción del factor generado y cómo interviene en el modelo.

Variable	*Fuente*	***Factor***	*Descripción*
Población	Censo 2001	Distribución de la población en las viviendas	Permite visualizar la distribución actual para luego comparar con la nueva distribución simulada, respetando el crecimiento previsto y las reglas de decisión establecidas
Número de Viviendas	Dirección General de Catastro (2013)	Ocupación de la vivienda	Es la base de partida sobre la cual definimos hacía dónde podrá moverse la población, ya que debe contar con la existencia de viviendas disponibles
Viviendas clasificadas según tipología	Ver submodelo 2 (tabla 5.1)	Número de viviendas clasificadas según tipología, delimitados por los siguientes umbrales: alto, medio y bajo estándar	Permite asignar la tipología de la edificación según el estándar de sus viviendas
Capacidad máxima de ocupación	Capa de ocupación de la edificación generada para este submodelo (descrito en detalle en el apartado 3.3)	Delimitación de capacidad máxima	Pretende asignar una capacidad máxima de ocupación en cada pixel edificado. Destacamos que en el caso que su población (media) supere el valor asignado como capacidad máxima, este factor considera el número de población y la convierte en su valor de referencia
Preferencias espaciales	Capas de carreteras, paradas de trasporte público, equipamientos sanitarios y educativos, distribución espacial de viviendas de alto, medio y bajo estándar	Preferencia espacial para elección de posibles futuras viviendas	Se trata de que las edificaciones a ser ocupadas por la población de cada tipología se ubiquen en las mejores localizaciones definidas en función de la distancia determinados elementos espaciales, tales como carreteras, paradas de transporte público, equipamientos educativos y sanitarios, y también considerando la presencia de viviendas del mismo estándar de la que se busca.

Tabla 6.2. Descripción de factores a considerar por la población para ocupar nueva vivienda.

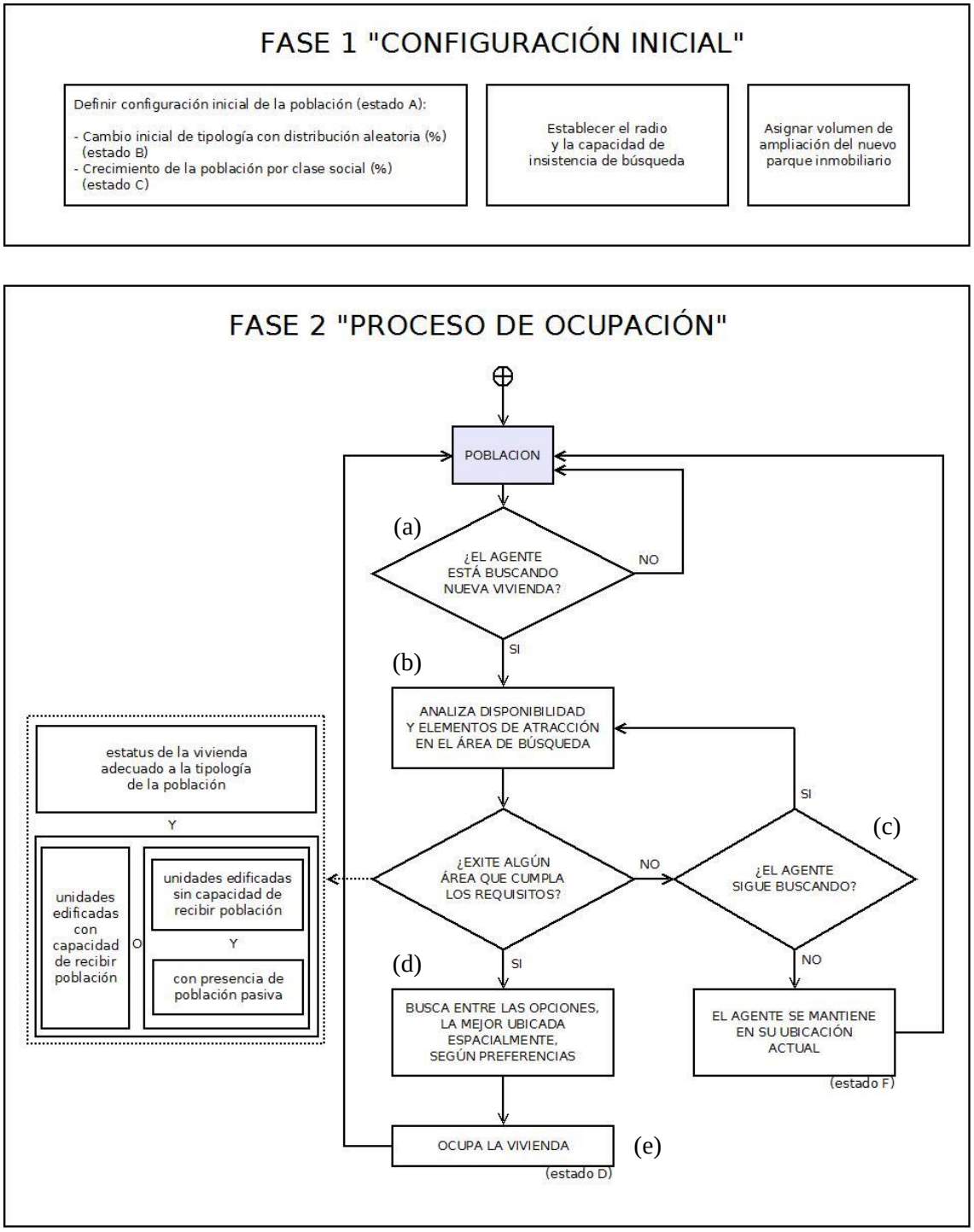
Según la capacidad máxima y la ocupación de la vivienda, el modelo define un tipo de disponibilidad 1, 2 o 3 en función de sus valores, tal como indica la figura 6.1. En seguida, a lo largo de la ejecución del modelo y de acuerdo al movimiento de la población, la disponibilidad es actualizada. En el último ejemplo, en el caso de que haya expulsión de un agente pasivo, la disponibilidad cambia conforme se indica.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.1. Esquema resolutivo de actualización de la disponibilidad de plazas en las viviendas en función de su ocupación.

Aclaradas todas estas premisas, a continuación se presenta un diagrama de flujo más elaborado que el presentado anteriormente que, de forma sintética y secuencial, describe las distintas acciones de la población (figura 6.1). Los *estados* indicados en el flujo indican los cambios en los atributos del agente, obedeciendo a las opciones presentadas previamente en la tabla 6.1.

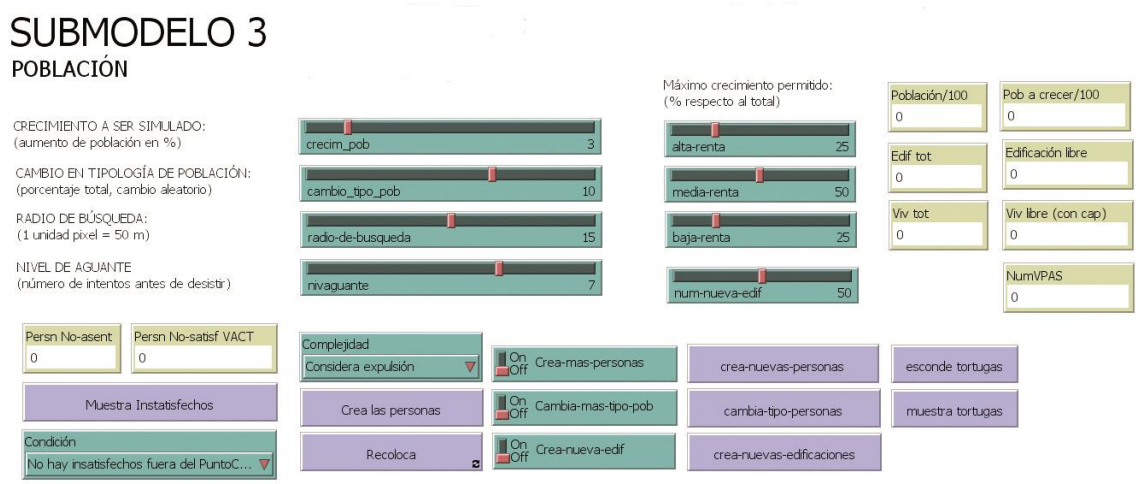


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.2. Diagrama de flujo que describe secuencialmente las distintas acciones por parte del agente población.

Para iniciar la ejecución del modelo, el usuario establece la configuración de arranque a partir del establecimiento inicial de una serie de parámetros detallados en la figura 6.2 (FASE 1): el volumen de crecimiento de la población que se contemplará en la simulación (configurado entre

0 y el 10%), la proporción de población entre 0 y el 15% que debe tener su tipología cambiada aleatoriamente (para indicar una situación más realista donde parte de la población se encuentra insatisfecha con su vivienda actual), el porcentaje de población máxima (sobre el total) que se aceptará incrementar por tipología, el área de búsqueda de nueva vivienda establecido para los agentes (delimitado entre 0 y 30 píxeles, esto es, radio máximo de 1,5 km) o la capacidad de insistencia (máximo de intentos fallidos entre 1 y 10). El usuario también debe elegir una opción para el nivel de complejidad de la ejecución (simulación con o sin expulsión de residentes) o condición (ejecución del modelo hasta que cumpla determinada condición, como que ya no haya viviendas libres, o que no haya población por recolocar, o que haya más de 100 personas que se vayan del área de estudio, por ejemplo) (figura 6.3).



Fuente: Interfaz del SM3 en *NetLogo*.

Figura 6.3. Parámetros a ser configurados por el usuario en la interfaz para definir un escenario concreto.

En la FASE 2 (figura 6.2) se describe la acción de los agentes respecto a la búsqueda de nueva vivienda. Hemos de advertir que el modelo se ha configurado de tal manera que haya escasos parámetros pre-fijados a la hora de su ejecución. Se trata, por tanto, de un proceso muy flexible, en el que el usuario puede tomar decisiones propias sobre un número elevado de *inputs*, lo que confiere a este prototipo una adaptabilidad importante para ser utilizado en distintos ámbitos de estudio y simular escenarios de muy diferente índole.

A partir de ahí, la población no satisfecha y en estado activo (figura 6.2.a) elegirá un punto aleatorio en el área de estudio (figura 6.2.b) y verificará que dentro de su área de influencia (definida por el usuario en la FASE 1) haya alguna residencia que cumpla con los criterios relacionados con su grupo de poder adquisitivo y con disponibilidad para ser ocupada (libre o cubierta con población en estado pasivo). El proceso se repite hasta que se encuentre vivienda

disponible o se alcance el máximo número de repeticiones permitidas (figura 6.2.c). Si se encuentra vivienda disponible, se procederá a comprobar que ésta cumple los requisitos establecidos para cada grupo de población (figura 6.2.d). Esta decisión estará vinculada a una fórmula (ecuación 6.1), donde la preferencia (*P*) de una tipología de población (*t*) es la suma de los valores de las variables (*V*) consideradas. A todas ellas se les puede otorgar un peso (*p*) que exprese la importancia de cada una en el proceso de selección final:

$$Pt = ((plt * V1) + (p2t * V2) + (p3t * V3) + \ldots + (pnt * Vn)) \qquad \text{[Ecuación 6.1]}$$

La fórmula se alimenta de valores definidos según los criterios de preferencia de los distintos agentes, considerando su interés por ubicarse a mayor o menor distancia de algunos elementos espaciales. Como ejemplo, se podría establecer la siguiente ponderación en función del grupo de población (tabla 6.3):

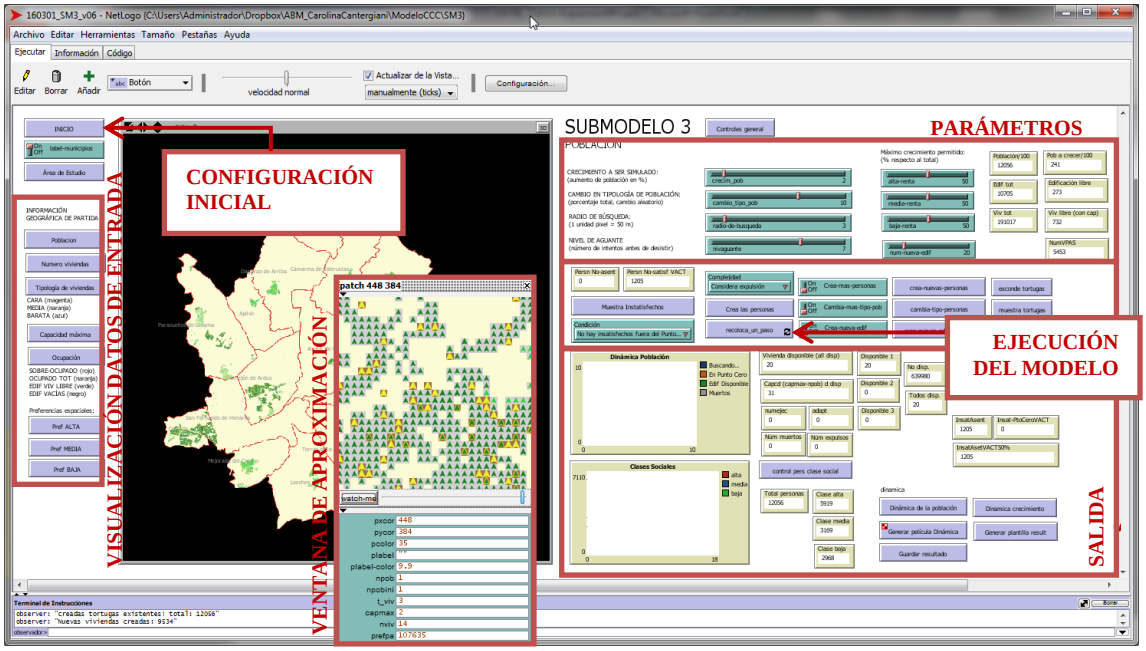
Criterio espacial	*Renta alta*	*Renta media*	*Renta baja*
Proximidad a vías de comunicación	60	0	0
Proximidad a estaciones de trasporte público	0	35	35
Proximidad a hospitales	0	20	30
Proximidad a centros universitarios	10	20	00
Proximidad a viviendas de estándar alto	25	5	0
Proximidad a viviendas de estándar medio	5	15	5
Proximidad a viviendas de estándar bajo	0	5	30
Suma	**100**	**100**	**100**

Tabla 6.3. Ponderación de los distintos criterios espaciales de preferencia de localización residencial en función del tipo de grupo poblacional (variable *p* en la ecuación 6.1).

Conforme ya se ha visto, el proceso culmina con la ocupación de viviendas por parte de la población obedeciendo a las preferencias y criterios indicados, pero nótese que la ocupación puede producirse sobre viviendas vacías o en viviendas que están ocupadas por población en estado pasivo y que, una vez es expulsada, vuelve al sistema en busca de una nueva residencia; por lo tanto, el siguiente paso consistirá en una actualización del estado de ocupación y características de las zonas residenciales (figura 6.2.e).

1.2. La interfaz gráfica del SM3 en NetLogo

La interfaz gráfica de este submodelo no cambia substancialmente respecto a los anteriores aunque es relativamente más compleja, precisamente para poder llevar a cabo una ejecución muy flexible que permita al usuario especificar un número importante de parámetros de manera independiente (figura 6.5).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.4. Interfaz gráfica diseñada en la plataforma *Netlogo*, del submodelo de ocupación de nuevas residencias por parte de la población y sus herramientas de control.

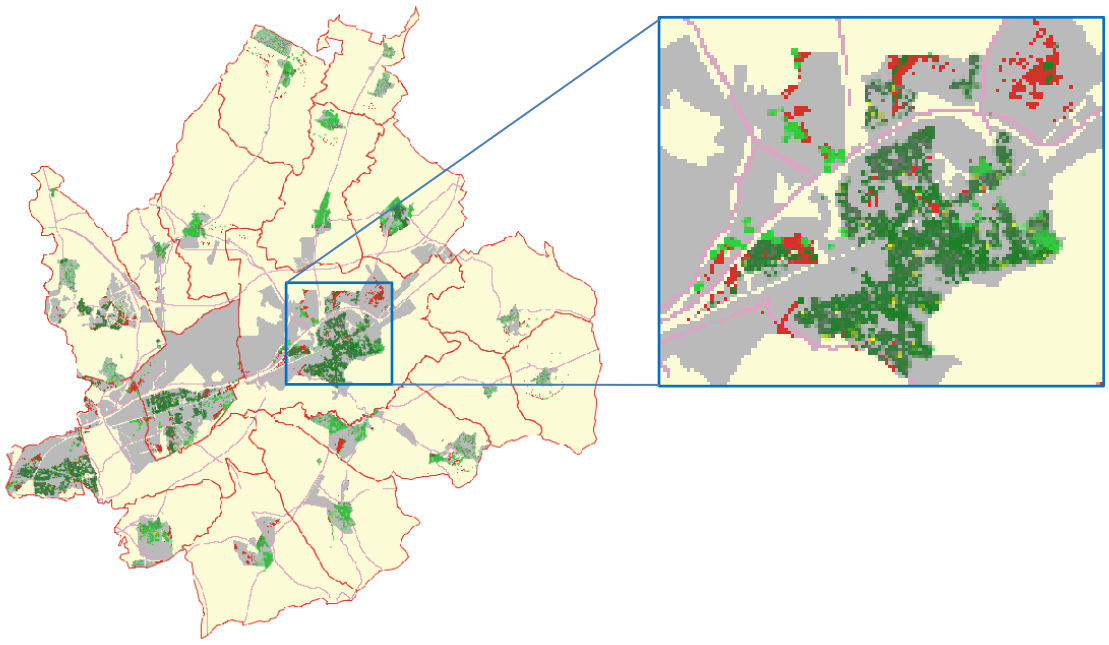
Los productos esperados no se centran en presentar la distribución de la población en diferentes municipios, sino en saber cómo se distribuyen entre las edificaciones. Por eso, los resultados espaciales principales son una actualización de la cobertura de edificaciones con la nueva población asignada y el volumen de población que todavía sigue sin residencia, ambos pudiendo visualizarse en pantalla. A través de una serie de gráficos se muestra, por otro lado, la dinámica de la población que ha ido siendo ubicada, la que se encuentra en estado de búsqueda, así como las edificaciones con viviendas todavía disponibles. Otro gráfico indica la diferencia en la evolución y crecimiento de la población de las tres tipologías.

Dado que los resultados se especifican en cada pixel, existe una limitación en la apreciación de los cambios al visualizar el área de estudio como un todo. Por ello, como en el submodelo de promotores inmobiliarios, se sugiere hacer uso de la herramienta de ventana de aproximación. En este submodelo, la distribución final de la ocupación se representa a través de

un símbolo que cambia de dimensión según el volumen de población que se mueve de una residencia a la otra, representando el movimiento de los agentes.

2. Verificación del submodelo a través de simulaciones del comportamiento de la población

Previa a la presentación de los escenarios, merece destacar que la distribución de la población, cuando visualizada en *NetLogo*, es representada por el volumen de viviendas y su grado de ocupación (número de población asociada a cada edificación), y espacialmente solamente por la distribución geográfica de la edificación existente (representados por *pixeles*). En la figura 6.5 se puede apreciar cómo se visualiza la distribución de las edificaciones en el área de estudio y mediante una ventana de aproximación el área urbana de Alcalá de Henares. Debido a que su representación en *NetLogo* es muy limitada, optamos por llevar la información resultante de los escenarios a un SIG y así poder realizar representaciones más fácilmente comprensibles.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.5. Ejemplo de representación de la población a través de la distribución de las viviendas existentes representadas por *pixel*.

Tras clarificar brevemente la forma de representación de los resultados de la simulación, merece destacar que el modelo y prototipo ha sido verificado a partir de la configuración y simulación de distintos escenarios. En este apartado se presentan los resultados de tres propuestas de situaciones extremas e intermedias.

Uno de los escenarios extremos representa un *boom demográfico* y se caracteriza por una demanda elevada de vivienda debido a un aumento importante del volumen de población (equivalente al escenario especulador de los dos primeros submodelos), que. En este caso, consideramos que las condiciones impuestas para la búsqueda de nueva residencia son aquí más flexibles, esto es, determinan un radio de búsqueda más amplio con una elevada capacidad de insistencia.

El segundo escenario sería el opuesto al primero, correspondiente a una situación de crisis de *estancamiento demográfico* (equivalente a los escenarios del perfil conservador del planificador urbano, y de crisis de los promotores inmobiliarios), o, indicando que hay poco crecimiento y la búsqueda de vivienda es más restringida en un momento de crisis que obliga a la población a marcharse, mientras la que se queda permanece bastante estable, no realizando muchos movimientos de cambio. Si apenas hay búsqueda de nuevas residencias, la oferta de vivienda libre se incrementa. En este caso, el radio de búsqueda es más limitado, ya que la población busca algo mucho más preciso, y la capacidad de insistencia es baja pues se asume que encontrarán vivienda fácilmente debido a la baja demanda.

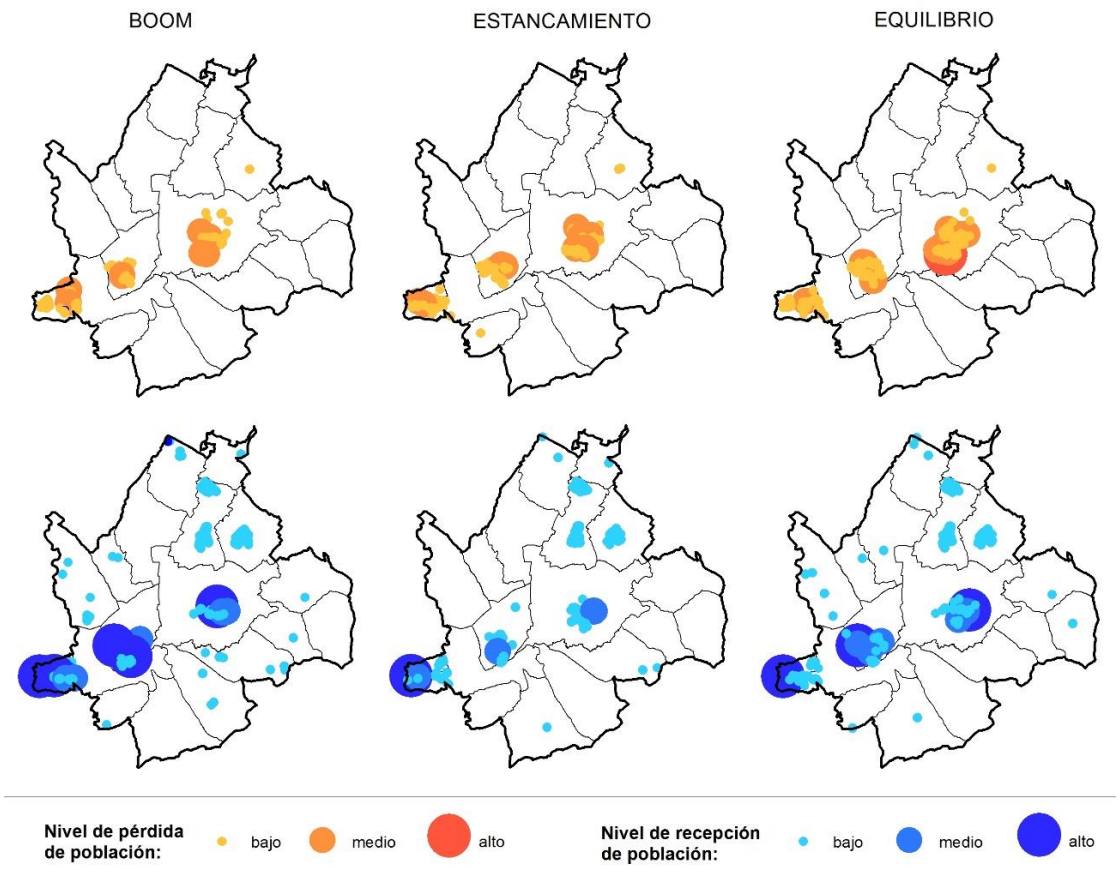
Por último, en el escenario intermedio correspondiente a un *equilibrio demográfico* (con equivalencia al escenario sostenible de los dos primeros submodelos), donde el crecimiento de la población es estable y hay una demanda y oferta de viviendas más o menos equilibradas, por lo que la búsqueda es más ajustada a las necesidades y preferencias de cada grupo de población. Siendo así, los valores de radio de búsqueda y capacidad de insistencia tampoco serán extremos.

Respecto al crecimiento máximo establecido para la población de cada nivel de renta, así como el cambio inicial de su tipología, se optó por mantenerlos igual para los tres escenarios, partiendo así de un mismo número de población insatisfecha y un mismo umbral. Lo que se busca con ello es limitar las variaciones en su configuración inicial, y así generar productos diferentes resultantes del comportamiento del promotor inmobiliario ante condiciones similares de partida. En este sentido, los parámetros iniciales fueron definidos de forma que reflejan las características de cada escenario, según aparece en la tabla 6.4.

Parámetros	*Referencia*	*Escenarios*		
		Boom	*Estancamiento*	*Equilibrio*
% de crecimiento de población	0 a 20	5	1	3
% Cambio de tipología de residencia	1 a 15	10	10	10
% población renta alta	0 a 100	25	25	25
% población renta media	0 a 100	50	50	50
% población renta baja	0 a 100	25	25	25
Radio búsqueda nueva residencia (pixel)	0 a 30	25	5	15
Insistencia en la búsqueda (intentos)	1 a 10	7	7	7
Incremento número de viviendas	0 a 100	80	20	50

Tabla 6.4. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros: boom, equilibrio y estancamiento demográfico.

Considerando que los tres escenarios parten de configuraciones iniciales similares, las diferencias son visualmente identificables (figura 6.6). Dadas las condiciones establecidas para el primer escenario, de *boom* demográfico, se prevé un flujo grande de población moviéndose simultáneamente. Los resultados reflejan cierta dificultad en encontrar viviendas disponibles, contando con que muchos agentes acaben por agotar su capacidad de insistencia y se adapten al entorno, cambiando su situación socioeconómica. Si analizamos el flujo demográfico espacial, esto es, origen y destino de las reubicaciones de población, los resultados de este escenario muestran que la mayoría de la población insatisfecha que finalmente cambia de residencia lo hace principalmente desde viviendas del eje central hacia otras en este mismo eje. Este movimiento se produce en menor medida en los municipios de los ejes norte y sur.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.6. Resultados de reubicación de población en cada uno de los escenarios planteados: (a) *boom*, (b) estancamiento y (c) equilibrio demográfico.

La distribución espacial resultante del segundo escenario, de estancamiento, muestra un flujo demográfico muy equilibrado saliendo y estableciéndose en el mismo eje central, con algunas reubicaciones destacables en la región nordeste del Corredor (que también se producen en el anterior escenario). Es destacable el bajo interés en reubicarse en los municipios del eje sur.

Por último, podemos comprobar como también los resultados del escenario de equilibrio demográfico se ajustan a la situación intermedia planteada respecto a los dos anteriores. Así, los destinos aparecen muy bien distribuidos espacialmente, aunque el origen de los desplazamientos se encuentre predominantemente en el eje central, donde está ubicada la mayor parte de la población insatisfecha que busca cambiar de vivienda.

En la tabla 6.5 aparecen algunos datos numéricos resultantes para cada escenario simulado. Como en los tres casos se optó por ejecutar el prototipo hasta que se agotara el volumen de población insatisfecha, en un momento dado toda la población insatisfecha se encuentra no-asentada y buscando vivienda, y llegados a este punto, sólo les queda adaptarse a su entorno o irse del área de estudio. Por este motivo, dichos valores de adaptación y eliminación son bastante elevados.

Valores	*Escenarios*					
	Boom		*Estancamiento*		*Equilibrio*	
	inicial	*simulado*	*inicial*	*simulado*	*inicial*	*simulado*
Población de Clase Alta	6.093	6.179	5.955	6.086	6.024	6.129
Población de Clase Media	3.468	2.612	3.206	2.554	3.274	2.586
Población de Clase Baja	3.097	3.132	3.015	3.040	3.119	3.077
Viviendas libres (vacías)	814	3.342	728	2.651	780	3.085
Población insatisfecha	1.813	0	1.331	0	1.568	0
Población eliminada	0	735	0	496	0	625
Población adaptada al entorno	0	154	0	152	0	129

Tabla 6.5. Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas para cada escenario propuesto.

Los resultados numéricos presentados también son coherentes al confirmar que cuanto más incremento de población (considerando el mismo cambio de tipología inicial y capacidad de insistencia), el número de agentes expulsados y eliminados resulte proporcional. Respecto a la adaptación al medio, el tercer escenario presentó el menor volumen de población adaptada, entendiendo que en una situación de equilibrio lo ideal es que haya residencia disponible del nivel socioeconómico correspondiente. De cualquier forma, al ser un modelo flexible, hay que tener en cuenta que las variaciones de resultados de simulación serán tantas como escenarios queramos plantear.

Para realizar la verificación, además de probar el modelo con distintos escenarios, realizamos reiteraciones partiendo de la misma base para comparar los resultados de salida y evaluar su coherencia, que a pesar de que no pretenden ser iguales, ya que se trata de modelar el comportamiento de los agentes, presentan una tendencia común.

El modelo parte de un número de viviendas establecido por el usuario en la interfaz mientras este submodelo no esté conectado al anterior, donde se heredará la distribución espacial de nuevos desarrollos residenciales. Por lo tanto, en el caso de incremento de población, lo probable es que tras algunas ejecuciones la ocupación alcance el 100% y el modelo ya no sea capaz de acoger nuevos agentes en las viviendas. Así, se espera que la cantidad de población que aguarda reubicación crezca de forma significativa.

Si bien el reto del modelo es simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares, hay que considerar que el análisis de la forma de expansión en sí mismo no es su objetivo, sino comprobar la correcta ejecución del modelo. No obstante, a través de las diferencias identificadas en los resultados espaciales obtenidos a partir de cada escenario planteado, podemos respaldar la fiabilidad del submodelo y recomendar su aplicación.

CAPÍTULO 7.

MODELO BASADO EN AGENTES INTEGRADO – AMEBA (MI)

1. Introducción

Este último modelo se denomina **AMEBA** (**A**plicación de un **M**odelo de **E**volución del crecimiento urbano **B**asado en **A**gentes)[28], y es el medio a través del cual se permite integrar los submodelos presentados, y por lo tanto donde interactúan a la vez la población, los promotores inmobiliarios y los planificadores urbanos. De esta forma, este es el entorno donde se plasman los resultados de la simulación del crecimiento urbano en el Corredor del Henares a través de un MBA.

En este sentido, dado que los submodelos se encuentran desarrollados de forma independiente, el desafío reside en, por un lado, integrarlos de forma que no ignoren sus objetivos individuales, y por otro, combinarlos para que la resolución temporal sea coherente, dado que el comportamiento de los tres agentes presenta intervalos de tiempo de acción y reacción muy diferentes entre sí, aunque actúen de forma conjunta.

[28] En inglés, *Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas*. Es así denominado por hacer alusión a la ciudad como una ameba, que cuenta con un núcleo, abarca e incorpora entidades vecinas, cambia su forma y crece normalmente de forma irregular. Además, está acorde con la puntualización que hace Batty cuando indica que las ciudades ya no se ven como máquinas, sino como organismos (Batty, 2012).

Para rescatar y mantener la flexibilidad existente actualmente en los submodelos, y a la vez permitir que el usuario siga teniendo el poder de definir los escenarios que estime oportuno, la estructura del Modelo Integrado (MI) obedece a una estructura similar a los demás presentados para la definición de los parámetros iniciales. Los escenarios concretos que pretende simular el MI son no sólo producto del resultado de cada submodelo conectado al siguiente, sino también un reflejo de la reacción de cada agente en función del comportamiento de los otros dos. En resumen, es posible entender los resultados del MI como la consecuencia territorial del proceso de crecimiento urbano donde los tres agentes actúan de forma coordenada.

La estructura del modelo está diseñada para que el usuario defina los criterios que llevan a la transición de un submodelo hacia el otro, así como los parámetros más significativos de cada submodelo. La dinámica propuesta permite que se ejecuten los tres submodelos, cuya repetición y orden dependerá de los criterios que lo induzcan a pasar al siguiente submodelo, establecidos por el usuario en la interfaz.

De esta forma, los resultados, además de presentar la ampliación de áreas urbanizables, nuevas viviendas y distribución de población, también representan dos fenómenos indirectos significativos en un sistema urbano. Por un lado, la demanda del sistema por más suelo urbanizable y nuevas viviendas, corroborado cuando los submodelos de planificadores urbanos o promotores inmobiliarios se activan. Por otro, el sistema de retroalimentación según las necesidades particulares de un agente en función de los otros dos, indicada de acuerdo a la emergente orden de ejecución de los submodelos.

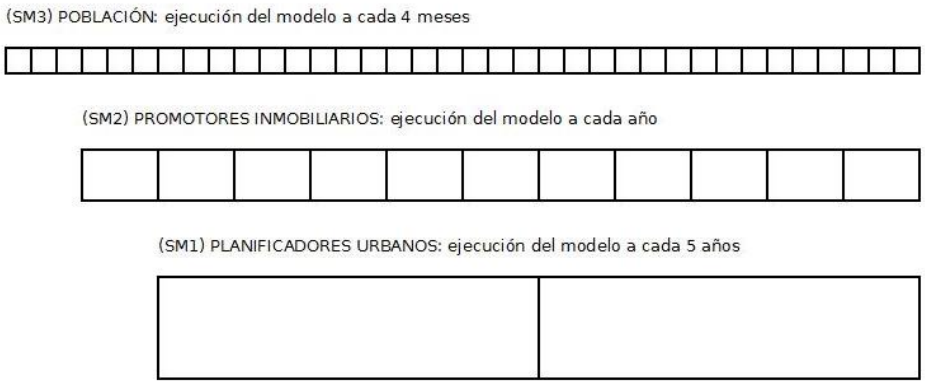
A continuación se describen y detallan los aspectos técnicos, conceptuales y prácticos de este modelo que integra algunas de las funciones desarrolladas hasta el momento en los submodelos. La descripción lógica del MI, así como la presentación de su estructura e interfaz gráfica, proporciona un fundamento necesario para la mejor comprensión del funcionamiento del comportamiento del sistema de crecimiento urbano. Este capítulo finaliza con algunos ensayos de escenarios que representan posibles dinámicas de crecimiento urbano en el área de estudio, tal y como se ha venido realizando para cada uno de los submodelos.

1.1. Estructura lógica del modelo

En un MBA, los intervalos de tiempo se definen en función de la evolución del fenómeno que estamos estudiando. En el presente caso, la dinámica urbana viene determinada por tres procesos cuya materialización en el tiempo ocupa lapsos temporales muy diferentes, variando los tiempos de acción y reacción entre un actor y otro, por lo que resultaría inapropiado definir un intervalo de tiempo común para todos los agentes. Así, si bien podría esperarse que el modelo final integrara los tres submodelos de forma que se ejecutasen simultáneamente, la realidad es que la población puede decidir cambiarse de vivienda en un intervalo temporal más corto del que

transcurre para ampliar el parque residencial, y todavía más si consideramos el período en el que habitualmente se realiza la revisión de planes de ordenación urbana.

Con el objetivo de considerar estas diferencias temporales en el MI, se ha establecido que cada ejecución del submodelo de población equivaldría a un lapso temporal de cuatro meses, entendido aquí por tiempo-base. Sin embargo, para los promotores inmobiliarios no sería realista considerar la actualización de construcción de nuevas viviendas en un intervalo tan corto, dado que este proceso de por sí es más costoso en términos de tiempo. Por lo tanto, se amplía su ejecución abarcando varias unidades de tiempo de la población, esto es, se parte del supuesto de que nuevas zonas residenciales se incorporan al modelo a cada tres unidades de tiempo-base, es decir, a cada año. Por último, aunque según la normativa española se debería realizar la revisión formal de un PGOU cada diez años, es muy habitual elaborar modificaciones parciales puntuales, alargando su vida, por lo que se ha considerado un intervalo de tiempo de ejecución para los planificadores cinco veces más extenso que la construcción de nuevas viviendas (y quince veces mayor que el movimiento de la población), es decir, de cinco años. De esta forma, se completa el ciclo temporal de retroalimentación de los submodelos contemplado en el modelo e ilustrado en la Figura 7.1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.1. Representación esquemática de la resolución temporal de los tres submodelos en el Modelo Integrado.

Conforme el esquema presentado, se entiende que a cada intervalo determinado los modelos pueden coincidir en actualización. En este sentido, se hizo necesario definir en qué momento el modelo debería considerar la intervención de uno u otro agente. En la práctica, los criterios que dan lugar al salto de un submodelo hacia el otro están relacionados con la configuración que finalmente determina los diferentes escenarios de crecimiento urbano visto como un sistema integrado, y que define el usuario en la interfaz. El funcionamiento del MI parte de una situación base de referencia, con un determinado plan de ordenación vigente, y la

consecuente distribución de áreas urbanizables, una determinada distribución de viviendas ocupadas y libres, y una determinada distribución inicial de la población (figura 7.2.a).

(a) Situación de partida

(b) Ciclo 1



(c) Ciclo 2

(d) Ciclo 3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.2. Representación esquemática del flujo y ejecución continuada de los tres submodelos (SM1, SM2, SM3) en el Modelo Integrado, general y por ciclos.

A diferencia del orden de presentación de los submodelos en este trabajo (planificadores urbanos – SM1, promotores inmobiliarios – SM2 y población – SM3), elegido así para poner en evidencia el aumento gradual de su complejidad, sobre la situación de partida presentada en la figura 7.2 puede actuar cualquier agente. En este caso, el orden depende de la configuración actual y de las necesidades impuestas por el usuario mediante el establecimiento de las condiciones iniciales, que se verá más adelante. Se supone que en primer lugar actúa la población, que cambia continuamente de residencia y ocupa y desocupa viviendas (figura 7.2.b).

Al modelo se incorporan algunos sensores a los cuales se han denominados *Saltos*, que cuando están activados, inducen a un cambio inminente. Por ejemplo, la ejecución continuada del SM3 sólo se interrumpe en el caso que se cumpla un determinado criterio, en su caso activando el *Salto A*, como por ejemplo:

- Que haya menos de "x%" de viviendas disponibles
- Que la población en búsqueda activa supere los "x%" del total
- Que se ejecute el SM3 un total de "x" veces consecutivas

Al activarlo, se arranca automáticamente el SM2, permitiendo a los promotores inmobiliarios crear nuevas edificaciones residenciales (figura 7.2.c). Naturalmente, como resultado se incorporan nuevas viviendas libres al modelo, por lo que volvería a actuar la población (ciclo 1), esta vez considerando la distribución de nuevas viviendas. El SM3 se ejecuta repetidamente hasta que se cumplan de nuevo las condiciones que activan el *Salto A* y vuelva a ejecutarse el SM2, y así sucesivamente.

Cada vez que se active el SM2 en el ciclo mencionado, el modelo realiza una consulta para confirmar si se cumple algún criterio que activaría el *Salto B*, lo que llevaría a la ejecución del SM1, esto es, a una revisión del PGOU (figura 7.2.d). En este caso, el Salto B podría considerar, por ejemplo:

- Que el área urbanizable sin edificar sea inferior a un "x%" del total de áreas urbanizables
- Que se ejecute el SM2 un total de "x" veces consecutivas

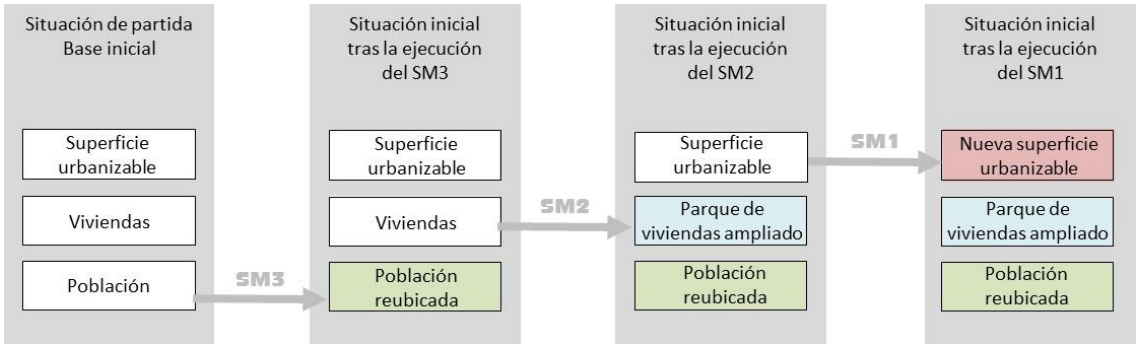
De esta forma en todo momento el MI se va alimentando de nuevos elementos (nuevas áreas urbanizables, nuevas viviendas y nueva distribución de población) según se ejecute y se repita cada uno de los submodelos. Para facilitar la comprensión de sus ciclos, el funcionamiento de la retroalimentación es ilustrado en la figura 7.3., que muestra de forma esquemática la situación inicial en cada ciclo de ejecución del MI, y la situación tras cada ejecución. Como se puede constatar, el resultado espacial de un submodelo actúa como dato de entrada del siguiente.

Aunque se trate de una descripción compleja, para una mejor comprensión, se presentará un ensayo de una ejecución del MI con 20 etapas conforme muestra la figura 7.3, indicando la secuencia de programación. El modelo parte de una base inicial con las distribuciones de población, edificación y áreas urbanizables ya definidas, y empieza por el agente población, que se supone que está activo continuamente. Hay que destacar que en este ejemplo de funcionamiento del modelo integrado, el primer submodelo que se ejecuta es el de población, pero que, dependiendo de los criterios asignados por el usuario en su arranque, podría iniciarse con cualquier otro.

En cada ejecución del SM3, el modelo realiza una consulta para confirmar si cumple las condiciones del Salto 1 (SM3 → SM2). Al no ser así, el modelo vuelve a ejecutarlo continuadamente (ej.: 1-2-3-4, 6-7-8, 10-11-12-13-14-15, 19-20). En el caso de que se cumpla el criterio establecido, se da el salto al SM2, de promotores inmobiliarios (ej.: 4-5). En esta etapa, se realiza una segunda consulta ahora relativa al cumplimiento de los criterios del Salto 2 (SM2

→ SM1). Al no ser así, el SM2 se ejecuta normalmente y se vuelven a ejecutar cuantos SM3 sean necesarios para que nuevamente se cumplan los criterios de salto (esta secuencia hace referencia a los ciclos 1 y 2 de la figura 7.2).

En el momento en el que se realice la consulta del Salto 2 (SM2 → SM3) y se cumplan los criterios (ej.: 16-17), el modelo procede a ejecutar el SM1 de planificadores urbanos, cambiando la conformación del territorio con la incorporación de áreas clasificadas como urbanizables (ej.: 17). A continuación, se ejecuta con normalidad el SM2 y seguida continuación el SM3 (ej.: 18, 19), volviendo finalmente al ciclo inicial, esta vez contando con una situación de partida diferente (esta secuencia hace referencia al ciclo 3 y 1 de la figura 7.2).



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SM3	Población																				
Salto 1	Consulta si cumple criterios	×	×	×	✔		×	×	✔		×	×	×	×	×	✔				×	×
SM2	Promotores Inmobiliarios																				
Salto 2	Consulta si cumple criterios					×				×							✔				
SM1	Planificadores Urbanos																				

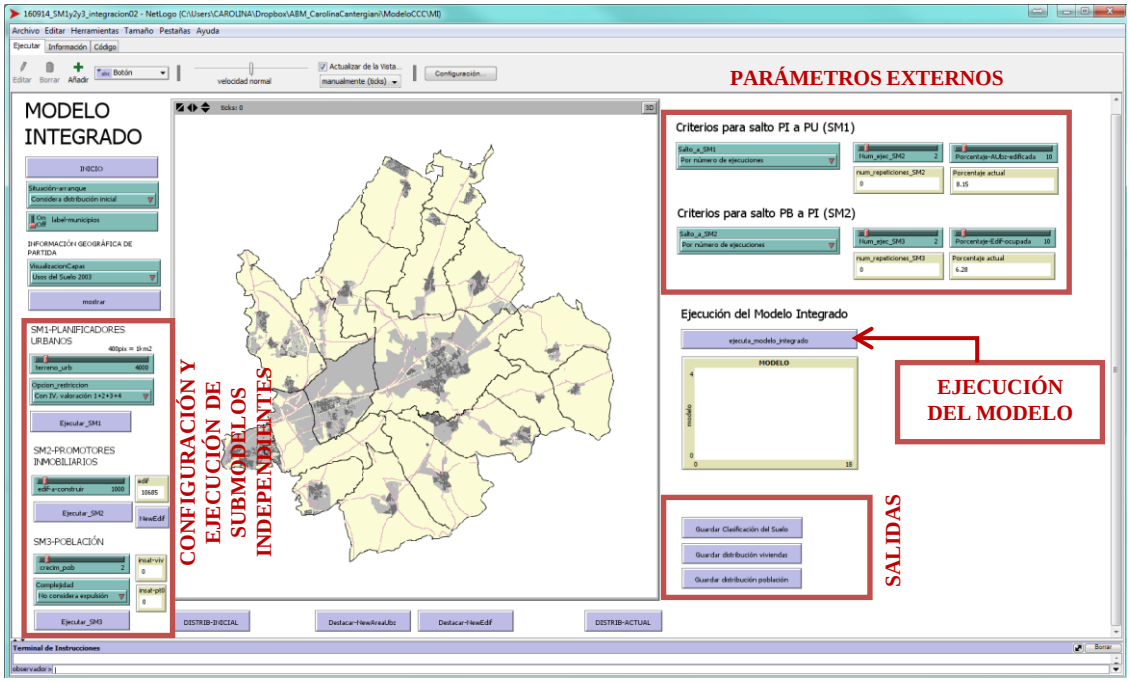
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.3. Representación esquemática de la situación inicial en cada ciclo de ejecución del Modelo Integrado, que muestra la retroalimentación de datos espaciales entre los tres submodelos y secuencia de ejecución del ejemplo presentado.

1.2. La interfaz gráfica en NetLogo

La interfaz del MI está formada por cuatro bloques (Figura 7.4). El primero permite ejecutar los submodelos de forma independiente (en formato acotado, cuya explicación se encuentra en el siguiente apartado). En el segundo se accede a los botones de ajustes de los parámetros para configurar distintos escenarios, que se definen a través de las condiciones de salto de un submodelo al otro. El siguiente bloque presenta un botón de ejecución del modelo integrado, así como un gráfico indicando el seguimiento de ejecuciones de cada uno de los tres submodelos.

Finalmente el último consta de tres botones destinados a guardar las capas espaciales de salida en forma de archivo externo (formato *ascii*, compatibles con los SIG).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.4. Interfaz gráfica (*NetLogo*) del Modelo Integrado de Simulación del Crecimiento Urbano en el Corredor del Henares y sus herramientas de control.

Respecto a los criterios de salto, las opciones disponibles para que se active o se produzca un cambio al SM1 son: considerar un número definido y limitado de ejecuciones repetidas o un porcentaje máximo de área urbanizable edificada (ambos valores modificables y elegibles a partir de barras que se deslizan que aparecen en la parte superior derecha de la figura 7.5). De manera similar, el salto hacia el SM2 se produce estableciendo un porcentaje concreto de residencias libres o un número finito de ejecuciones, como en el caso anterior.

Respecto a los resultados, el MI presenta las nuevas distribuciones espaciales generadas en su área de visualización, permitiendo también su descarga, siendo las capas espaciales correspondientes a la ampliación de superficie urbanizable, incremento de viviendas y nueva distribución de la población en cada pixel. En el siguiente apartado se introducen ejemplos de resultados espaciales para diferentes escenarios de crecimiento urbano generados por este modelo.

2. Verificación del modelo a partir de algunas simulaciones de crecimiento urbano

Para mostrar los resultados de la simulación del crecimiento urbano del MI, optamos por definir tres escenarios diferentes entre sí, y que además reflejan situaciones de crecimiento distintas.

Para la formalización de los escenarios se parte de las siguientes suposiciones generales:

- Al existir una alta demanda de viviendas, la regla económica natural es que proceda su consecuente desvalorización, lo que induce a que aquella población expectante de cambiarse de residencia a la espera de un momento económicamente más adecuado, lo haga.
- Si el mercado inmobiliario está en un momento de intensa actividad, es esperado que haya mayor probabilidad de construcción de nuevas viviendas, dando lugar al establecimiento de nuevas urbanizaciones o compleción de vacíos urbanos. Se presume que estos crecimientos obedecen los aspectos legales definidos previamente por los planificadores urbanos, y se plasman según las preferencias de la población.
- La tendencia general es que los lugares prioritarios para cambio de residencia se definan en función de la oferta de viviendas, de la densidad y características de población del nuevo sitio, así como de las infraestructuras cercanas (viarias, salud, ocio, educación, etc.).
- A los momentos expansionistas característicos de la conocida burbuja inmobiliaria, se puede vincular una tendencia urbanística negativa relacionada con la especulación inmobiliaria, que puede involucrar tanto a planificadores urbanos como a promotores inmobiliarios, cuando el ritmo constructivo y de artificialización del suelo pueden ser muy elevados e independientes de las necesidades reales de la población.

Estos y otros contextos no se podrían simular en los submodelos independientes, ya que involucran interacción de comportamiento de más de un agente, pero sí es posible plantearlos como escenarios en el MI. Por lo tanto, entre las infinitas posibilidades, se han planteado tres que representan diferentes contextos en cuanto a la dinámica del sistema de crecimiento urbano, y a su vez también son útiles para probar el modelo.

En primer lugar, destacar que debido al objetivo planteado de crear un modelo accesible y funcional, se ha optado por reducir las opciones de configuración inicial en el MI, ya que evidentemente no sería efectiva la incorporación de la totalidad de variables disponibles en los tres submodelos independientes. En este sentido, se ha establecido que algunas variables antes expuestas a la libre elección del usuario, ahora se incorporan a la programación interna del modelo con un valor fijo. En su caso, se optó por utilizar como punto de partida la configuración especificada en el escenario sostenible de cada uno, recordando que podrían haberse definidos

parámetros de cualquier de los otros dos escenarios correspondientes a situación de especulación y crisis.

Son excepción a las variables fijadas internamente los siguientes parámetros de cada submodelo: cantidad de superficie a convertirse en urbanizable y tipo de restricción para los planificadores urbanos; número de edificaciones residenciales a construir para los promotores inmobiliarios; y crecimiento demográfico y consideración o no de expulsión de agentes de sus viviendas habituales para la población. A partir de la combinación de estos valores con los criterios de salto de un modelo hacia el otro, es posible configurar las bases para las tres simulaciones. Sabemos que no solo las variables contempladas influyen en la decisión de los agentes que conforman el sistema que queremos modelar, sino también otras como la oferta de empleo, el bienestar social, el poder adquisitivo, etc.; sin embargo, configuramos los escenarios considerando exclusivamente los tres actores de interés y las variables presentes en los respectivos submodelos.

Al igual que con los submodelos, se ha intentado recrear tres escenarios para probar el MI, en este caso de tipo tendencial, sostenible y en situación de crisis. Cabe mencionar que, respetando el mismo orden, se corresponden a los escenarios con perfil de planificador urbano especulador, sostenible o conservador; a las situaciones especuladora, sostenible y de crisis que afrontan los promotores inmobiliarios; o un crecimiento demográfico de *boom*, equilibrio o estancamiento. A continuación, se describen algunas de sus características:

- *Tendencial*: el comportamiento de los tres agentes son muy dinámicos y cambian rápidamente, y de forma sincronizada. Al mismo tiempo que la población está muy activa en búsqueda de nuevas viviendas debido a sus buenas condiciones financieras, el mercado inmobiliario es dinámico y nuevas viviendas se construyen rápidamente. Mientras, hay una necesidad de ampliación de zonas urbanizables, por lo que los planes son frecuentemente revisados por los planificadores urbanos.
- *Sostenible*: muy dinámico en cuanto a los comportamientos de la población y promotores inmobiliarios, pero que, al contar con baja disponibilidad de áreas urbanizables, puede inducir a una ocupación irregular. Se podría caracterizar como un contexto sostenible siempre que no llegue a situación extrema de falta de áreas urbanizables, ya que así se mantendría una cierta compacidad de crecimiento urbano, colmatación interior (complementando los vacíos urbanos) y utilización del terreno de forma ambientalmente correcta.
- *Crisis*: presenta un cierto equilibrio entre la baja demanda de población y la baja oferta de viviendas, no obstante cuenta con una amplia superficie clasificada como urbanizable, lo que genera una situación no deseada porque la posibilidad de artificialización del suelo no es necesaria.

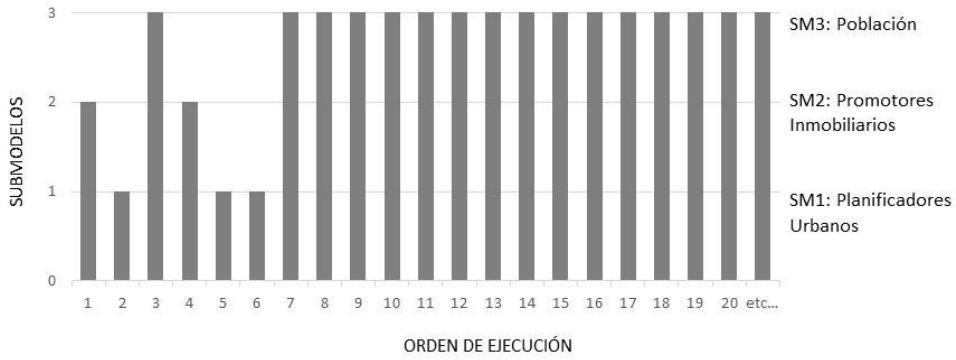
Así, se presenta la descripción de cada escenario estableciendo los siguientes parámetros (tabla 7.1):

		Escenarios		
	Parámetros (por unidad de tiempo correspondiente)	***Tendencial***	***Sostenible***	***Crisis***
SM1	**Terreno a reclasificar como urbanizable**	12.000 píxeles ($30km^2$)	4.000 píxeles ($10km^2$)	2.000 píxeles ($5km^2$)
	Restricción*	base	máxima (con IV)	base
SM2	**Edificación a construir**	3.000	2.000	1.000
SM3	**Crecimiento demográfico**	5%	3%	1%
	Complejidad	sin expulsión	con expulsión	con expulsión
SALTOS	**SM2 a SM1****	cuando el 10% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia	cuando el 15% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia	cuando el 20% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia
	SM3 a SM2	Cuando un 88% de residencias se encuentren ocupadas	Cuando un 92% de residencias se encuentren ocupadas	Cuando un 95% de residencias se encuentren ocupadas

* Ver figura 4.2.
** El modelo arranca con la distribución real inicial de un 8,15% de áreas urbanizables ocupadas por edificación residencial

Tabla 7.1. Parámetros de los tres escenarios del Modelo Integrado: tendencial, sostenible y de crisis.

Es fundamental tener presente que el orden de ejecución de los submodelos en el MI no necesariamente obedece a: población > promotores inmobiliarios > planificadores urbanos, como aparece en los ejemplos introducidos anteriormente. Dependiendo del parámetro de salto definido por el usuario en la interfaz, y también del volumen de crecimiento a simular por cada agente (áreas urbanizables, viviendas y población), la ejecución del modelo puede arrancar con la ejecución de un submodelo distinto al de población. A modo de ejemplo, presentamos el gráfico referente al escenario tendencial (figura 7.5) que indica la dinámica de actuación en cuando a la secuencia de ejecución de cada submodelo.

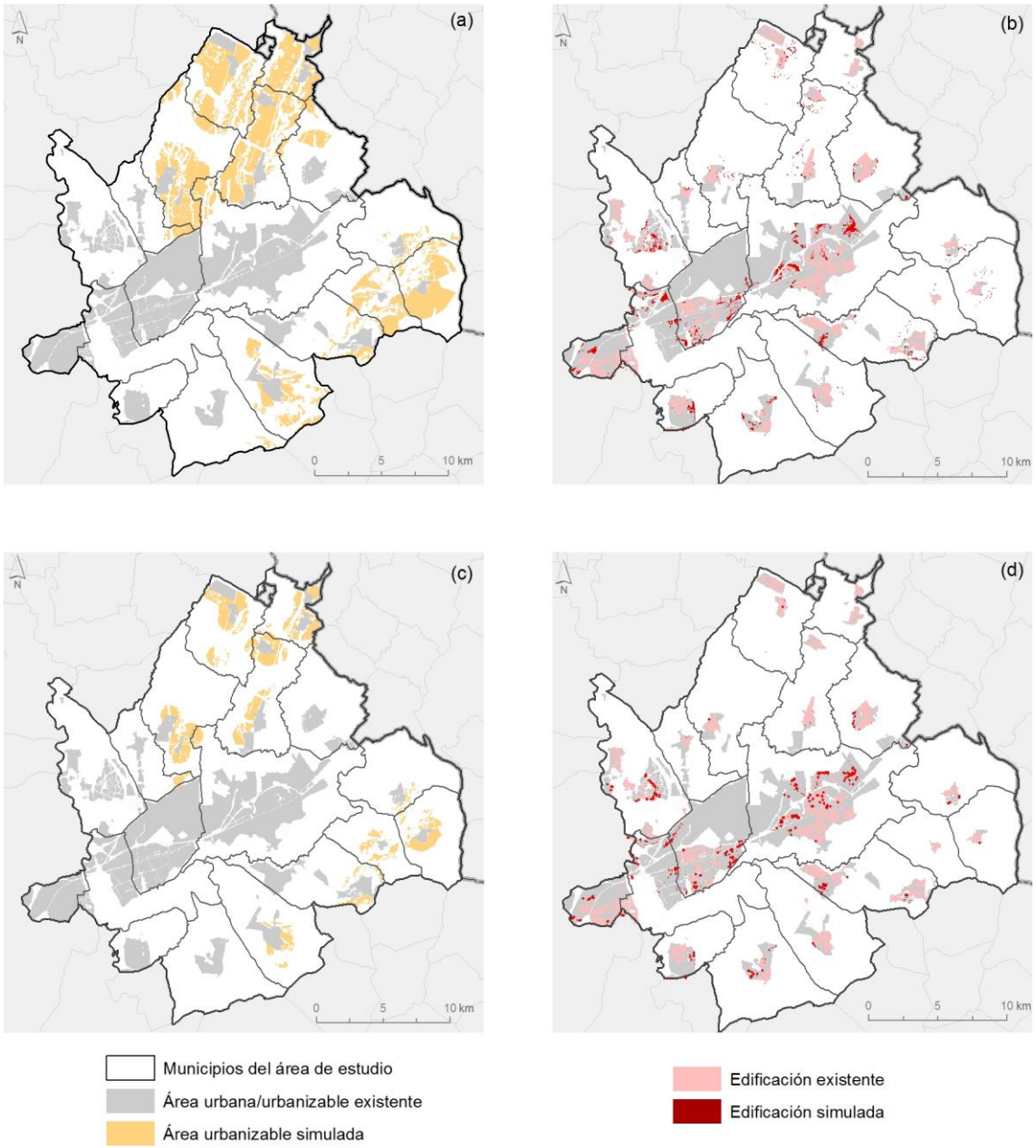


Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.5. Ejemplo de secuencia de ejecución de los submodelos en el modelo integrado teniendo en cuenta el escenario tendencial.

Como es de esperar, los resultados de la ejecución para los tres escenarios difieren considerablemente. Sin embargo, la ejecución trata de probar que el modelo está cumpliendo con los objetivos propuestos, y no necesariamente pretende presentar y analizar en profundidad resultados concretos de simulación, por lo que su comparación no tiene cabida en este caso. La finalidad del ensayo realizado es entender cómo el comportamiento de cada agente influye en la acción del otro y cómo estas relaciones afectan al resultado general del modelo, partiendo de un escenario concreto. Desde esta perspectiva, en primer lugar se muestran brevemente los resultados para a continuación intentar identificar la sinergia existente entre los agentes en función de su comportamiento.

Observando la nueva distribución espacial del crecimiento urbano resultante de la aplicación del MI (figura 7.6), y representado por la ampliación de áreas urbanizables (a, c) y edificaciones residenciales (b, d), podemos comprobar que en el *escenario tendencial* (a, b) las primeras se amplían significativamente, ocupando casi la totalidad del territorio disponible para ello, teniendo en cuenta la exclusión de aquellas áreas con restricción por protección obligatoria. Por otra parte, las nuevas edificaciones residenciales todavía son priorizadas en los municipios del eje central, siguiendo la misma evolución existente en períodos anteriores. En el *escenario sostenible* (c, d), la expansión territorial final que se puede observar es significativamente más compacta, representando una situación de menor impacto ambiental debido a una reducida artificialización del suelo. La creación de edificación residencial sigue la misma dinámica, estando más bien vinculada a las necesidades de la población, en este caso, bajas.

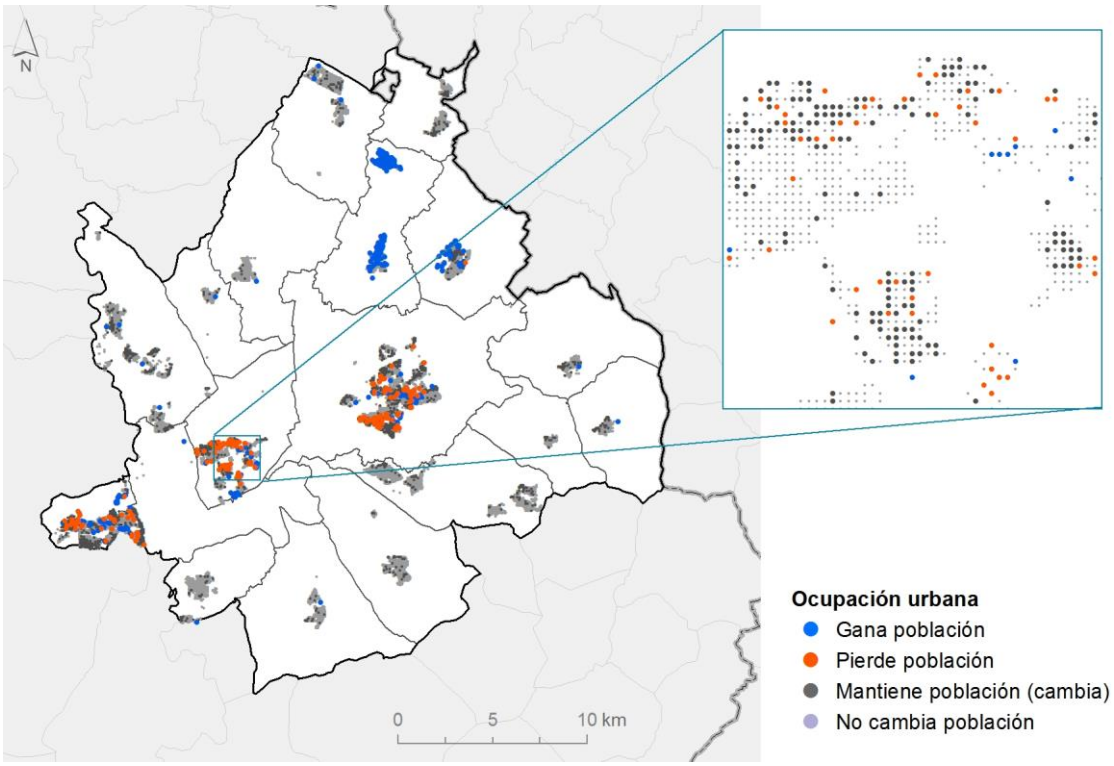


Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.6. Resultados espaciales de los escenarios tendencial (a, b) y sostenible (c, d) del Modelo Integrado indicando la expansión de nuevas áreas urbanizables (a, c) y el crecimiento del parque de viviendas (b, d).

Por último, cabe mencionar que, en el *escenario de crisis*, el único submodelo activado durante todo el proceso ha sido el de la población. Esto ha sucedido debido al elevado porcentaje definido en el arranque del modelo (del 20% y 95% para los saltos hacia el modelo de población y de promotores, respectivamente) que, al considerar la posibilidad de expulsar la población de su vivienda actual, da lugar a que el valor máximo establecido sea difícilmente alcanzado. Es un escenario que prioriza la dinámica de ocupación de la población, mientras que apenas considera

la expansión territorial. Como resultado, la distribución territorial inicial y final relativa a la ampliación de áreas urbanizables y construcción de nuevas viviendas no sufre cambios, pero sí lo hace la distribución de la población, presentada en la figura 7.7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7.7. Resultado espacial del escenario de crisis del Modelo Integrado indicando la dinámica de ocupación urbana según distribución de la población.

Es fundamental volver a matizar que se pueden considerar los MBA como un laboratorio donde se pueden probar resultados de distintos comportamientos del sistema de crecimiento urbano. Las tres propuestas de escenarios introducidas muestran que la expansión y ocupación urbanas pueden ser muy variadas según las opciones de arranque del modelo estén definidas de una u otra forma. Dichos resultados permiten presentar y discutir los retos a afrontar en diferentes escenarios de futuro, aunque aquí lo introducimos principalmente para testear el prototipo y corroborar su correcto funcionamiento. Para dejar constancia de los diferentes escenarios que se podrían articular con este prototipo, cabe mencionar otros ejemplos que están relacionados con el comportamiento de los tres agentes considerados, tales como corrupción urbanística, crisis económica extrema, control demográfico estricto, cambios en la legislación de inmigración, vuelta de la liberalización del suelo, entre otros.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

REFLEXIONES Y CONCLUSIONES

Tal y como se planteó como objetivo general de este trabajo, se ha desarrollado un prototipo de un Modelo Basado en Agentes capaz de simular el sistema de crecimiento urbano y que, con la intención de incorporar datos reales e identificar la situación y comportamiento de los agentes, consideró el Corredor del Henares como área de ensayo.

El primer objetivo específico (OE-1) se cumple con el desarrollo de los Capítulos 1 y 2. Como producto, destaca la publicación de un artículo científico de revisión de Modelos Basados en Agentes en la revista española Serie Geográfica (Cantergiani, 2011b), que sirve de marco de referencia teórico para futuros investigadores de la comunidad científica hispano-hablante.

Para confirmar que es posible reproducir un fenómeno como el crecimiento urbano con MBA a nivel supramunicipal, en primer lugar se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con el fin de identificar los principales trabajos que versan sobre los temas tratados (*Capítulo 1*). En cuanto a las publicaciones sobre MBA, destacamos que ya en la década de los 70 encontramos referencias sobre algunos rasgos de su fundamento teórico (Sakoda, 1971, Shelling, 1971), seguida de revisiones sobre agentes inteligentes (Wooldridge y Jennings, 1995, Epstein y Axtell, 1996, Openshaw y Openshaw, 1997), aunque sólo fue en los últimos quince años cuando se dio a conocer en profundidad el desarrollo de estos modelos, hecho respaldado por múltiples investigaciones con teorías ya más perfeccionadas y ejemplos de aplicaciones desarrolladas. Sólo actualmente se están publicando más artículos científicos sobre estos modelos, entre los cuales se

sitúan aquellos desarrollados a lo largo de esta tesis doctoral (Cantergiani, 2011b, Cantergiani y Gomez Delgado, 2016b, Cantergiani y Gómez Delgado, en revisión).

Se consideró acertada la elección del Corredor del Henares como área de estudio (*Capítulo 2*) por cumplir varios requisitos en cuanto al desarrollo del modelo propuesto. Entre ellos (i) la consideración de la escala supramunicipal al tratarse de un conjunto de municipios de tamaño mediano, (ii) el dinamismo respecto al crecimiento urbano donde los fenómenos de expansión territorial y ocupación de viviendas han estado presentes, (iii) la existencia de diferencias importantes en cuanto a la distribución espacial del crecimiento urbano, y por último, (iv) ausencia de una planificación integrada a nivel supramunicipal, considerando que todavía existan abundantes terrenos disponibles para la urbanización.

Además de la correcta elección del área de estudio, otro aspecto fundamental para la construcción del modelo fue la organización de una base de datos coherente y compatible que permitiera comprender los elementos vinculados a la dinámica del área de estudio, y que al mismo tiempo posibilitara proyectar las consecuencias de las tomas de decisiones actuales hacia el futuro. Sin embargo, la escala y la cobertura geográfica requerida, imposibilitaron obtener ciertos datos (principalmente socioeconómicos), lo que dificultó elaborar el mejor y más completo modelo posible. En este caso, la flexibilidad de los MBA favorece la incorporación de nueva información, así como permite que sea correctamente ejecutado aun con una cantidad mínima de datos, siempre que atienda su objetivo (Crooks y Heppenstall, 2012), lo que consiste en una ventaja importante respecto a otros modelos y un valor añadido del prototipo, dado que se puede replicar a otras zonas de estudio con el mismo problema.

Cabe destacar que otros tipos de modelos prospectivos (AC, Microsimulación, etc.) exigen una cantidad importante de datos con información muy específica y detallada, sin los cuales es imposible su aplicación. Estas exigencias dificultan su desarrollo y, en cierto grado, tienden a desincentivar y desinteresar al planificador urbano, generalmente escéptico en cuanto a la modelación aplicada a situaciones reales. Es sabido que la habitual complejidad e incertidumbre de la incorporación de estudios del futuro a los procesos de ocupación urbana y territorial han sido habitualmente foco de severas críticas por parte de los escépticos de la modelación (Fernández Güell, 2011). La elaboración del MBA con datos sencillos y resultados coherentes tiende a minimizar este grado de escepticismo, y en este sentido el potencial que brinda es todavía más destacable.

Entre las múltiples plataformas existentes, se ha seleccionado el *NetLogo* para el desarrollo del modelo. Se considera una elección apropiada por la flexibilidad que ofrece al programador en cuanto al desarrollo de la interfaz, la cantidad de parámetros, el origen de datos de entrada, las opciones de representación de resultados, etc. Al ser un programa abierto y compatible con un SIG, permitió la integración de datos geográficos, absolutamente necesarios para el desarrollo de un modelo explícitamente espacial y basado en datos reales como el

presentado. Otras plataformas existentes podrían considerarse incluso más robustas y presentar mejor capacidad de respuesta de procesamiento o mejor calidad visual, pero el coste generado al usarlas (principalmente en términos de tiempo de aprendizaje de la programación) no compensaría las posibles mejorías que estimamos podrían aportar a los modelos presentados concretamente en este trabajo. Respecto a la interfaz, aunque parezca complicada en un primer momento debido a la cantidad de posibles interacciones con el usuario, cuenta con la indicación de pasos sencillos y asequibles en su ejecución.

Por otro lado, considerar el carácter espacial de los productos resultantes de la ejecución de los submodelos fue imprescindible, dada la peculiaridad del fenómeno del crecimiento urbano. Sin embargo, hay una evidente limitación de calidad y refinamiento en cuanto al tratamiento y visualización de información geográfica en la plataforma elegida, por lo que en alguna ocasión se hizo necesario trasladar los resultados al SIG, aprovechando la compatibilidad de ambos. No hay duda de que los SIG han representado un papel relevante en el modelo, facilitando la gestión y tratamiento de la información previa y la representación cartográfica posterior. Sin embargo, el *NetLogo* cuenta con un grupo numeroso de usuarios, y se encuentra en constante actualización y desarrollo, por lo que se estima que no tardará en incorporar nuevas herramientas de este tipo. Actualmente, se considera un avance la incorporación de un módulo de integración con los SIG añadido en sus últimas versiones, que abarca lo mínimamente necesario para construir el prototipo presentado. Esta posibilidad de compatibilizar ambas plataformas, SIG y MBA, ha permitido aunar las necesidades y los potenciales de los diferentes sistemas (Parker, 2005, Crooks, 2006). Este tipo de integración, aunque avanza, todavía se encuentra sin resolver de manera óptima.

El segundo objetivo específico (OE-2) se cumple con el desarrollo del Capítulo 3. Su contenido se ha presentado en un congreso internacional (Cantergiani, 2011a) y publicado en el reconocido Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles (Cantergiani y Gomez Delgado, 2016b).

Los dos primeros capítulos funcionaron como fundamento imprescindible para el diseño del modelo conceptual introducido en el *Capítulo 3*, donde perfilamos los agentes y relacionamos sus comportamientos con el proceso de crecimiento urbano a simular. Se ha constatado que los agentes idóneos para conformar el modelo, y que pueden cambiar el sistema de crecimiento urbano a escala supramunicipal en función de sus comportamientos, son los planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Estos mismos agentes, por separado, son frecuentemente elegidos en los MBA desarrollados para reproducir dinámicas urbanas (An *et al.*, 2005, Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010, Ettema, 2011, Gaube y Remesch, 2013, Magliocca *et al.*, 2014, Sun *et al.*, 2014, Filatova, 2015, Malik *et al.*, 2015), dado su alto poder de inducir cambios territoriales a partir de sus decisiones, asociados a su comportamiento y su carácter

social. En este sentido, se pudo constatar que la consideración de estos tres elementos actuando de forma conjunta y coordinada, y simulando cambios en un mismo sistema urbano, es novedosa.

Otro diferencial importante fue la utilización de datos empíricos para ejecutar la simulación, cuando en la mayoría de los casos de MBA desarrollados para modelar sistemas urbanos, lo hacen con datos hipotéticos o tras la definición de escenarios teóricos (Filatova *et al.*, 2009, Magliocca *et al.*, 2014, Sun *et al.*, 2014, Malik *et al.*, 2015). Aquellos científicos que usan datos reales en sus modelaciones repetidamente terminan por indicar los grandes desafíos que conlleva (Gaube y Remesch, 2013, Filatova, 2015). Al tratarse de un modelo explícitamente espacial, se ha considerado como dificultad añadida la distribución geográfica de parte de la información estadística obtenida. Las resoluciones técnicas a veces controvertidas de este tipo de transferencia de información (ej.: vector a *raster*, polígono a punto), han sido con frecuencia objeto de calurosas discusiones y se han propuesto diferentes soluciones en el campo de la geografía cuantitativa (Santos Preciado *et al.*, 2011, Santos Preciado, 2015), pero que aquí se resolvieron de manera aceptable y acorde al objetivo del modelo.

La definición inicial de los componentes del MBA (agentes, variables de atracción y reglas de comportamiento) a escala supramunicipal se puede señalar como un importante avance metodológico, ya que estos modelos suelen aplicarse a una escala más local cuando se trata del enfoque urbano. También es remarcable la flexibilidad del prototipo, ya que está construido de forma que se pueda aplicar en otras áreas urbanas similares. En este caso, la elección de cada componente debiera ser cuidadosamente revisada en cada nuevo objetivo, escala geográfica o contexto político, social y cultural de la zona de estudio alternativa.

Además de suponer un aporte teórico, y quizás una especie de guía de cómo elaborar un MBA desde cero, el desarrollo de este segundo bloque (*Marco de referencia y modelo conceptual*) es también una semilla para su consecuente aplicación.

El tercero objetivo específico (OE-3) se cumple con el desarrollo de los Capítulos 4, 5 y 6. Como producto, se han presentado una serie de ponencias en congresos nacionales e internacionales (Cantergiani et al., 2014a, Cantergiani et al., 2014b, Cantergiani y Gomez Delgado, 2016a). Se encuentra pendiente de revisión un artículo científico enviado a la revista Computers, Environment and Urban Systems (Cantergiani y Gómez Delgado, en revisión).

En el tercer bloque (*Desarrollo del Modelo Basado en Agentes*) se han desarrollado los cuatro modelos que representan el proceso del crecimiento urbano. Como ya se ha mencionado, los tres primeros hacen referencia a los submodelos independientes que, por un lado, representan el fenómeno de expansión territorial (planificadores y promotores inmobiliarios) y por otro, el de ocupación urbana (población). El cuarto y final, bautizado con el nombre de AMEBA, es resultado de la integración de los tres submodelos inicialmente independientes.

Aunque el primer submodelo, de planificadores urbanos, trate de un proceso decisorio con enfoque *top-down*, y que en realidad está caracterizado por unos resultados muy determinísticos, se optó por plantearlo en el marco de un MBA con el objetivo de ser luego fácilmente integrado con los demás. Es un diferencial respecto a otros trabajos que cuentan con agentes equivalentes, pero que consideran la etapa de planificación desvinculada al contexto de un MBA por no tratarse de un comportamiento generado a partir del individuo (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010). Los otros dos submodelos, que actúan bajo un enfoque *bottom-up* y presentan un cierto grado de estocasticidad en sus acciones, por otro lado, ofrecieron una dificultad añadida por demandar una definición de reglas de comportamiento mucho más refinada y consultar un número muy superior de atributos. Sin embargo, de modo general, los tres submodelos se pudieron ensamblar fácilmente.

Al tener en cuenta la escala supramunicipal, añadida al hecho de contar con tres agentes bastante dispares en cuanto a intereses (generales de planificación, específicos de obtención de mejores beneficios por promotores o variados en plan personal), actuación (en función del entorno, de los beneficios, de proximidad a determinados equipamientos públicos, de la vecindad, etc.), enfoque (*top-down*, *bottom-up*), consideramos que la correcta elección de las capas para representar adecuadamente sus comportamiento, el procesamiento de los datos disponibles para la configuración de entrada y la definición de reglas de comportamiento están entre los principales desafíos de esta primera parte de la investigación (desarrollo de los submodelos independientes).

Las simulaciones realizadas en el Corredor del Henares recrearon distintas conductas, productos de los escenarios establecidos, intencionadamente coincidentes para los tres submodelos. Al producir resultados coherentes, estos resultados ayudaron a verificar la correcta construcción de los submodelos, de forma similar a un `juego de roles´, introducido por Ligtenberg (Ligtenberg *et al.*, 2010) como una técnica alternativa de validación.

El cuarto objetivo específico (OE-4) se cumple con el desarrollo del Capítulo 7. Como actividad de difusión y con la intención de generar discusión, se ha realizado un taller práctico en el marco de la XV Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid que permitió al público ajeno a este tipo de modelo conocerlo, discutir las elecciones presentadas, y compartir sus inquietudes.

Hemos de recordar que, mientras el resultado de cada submodelo independiente muestra cómo el comportamiento de cada agente influye en los cambios del fenómeno de crecimiento urbano, el objetivo del modelo integrado va más allá, pues fue creado y está orientado a mostrar de qué forma las consecuencias de una acción repercuten en el cambio de comportamiento de los demás agentes del sistema. En este sentido, el MI pone en contexto el sistema de crecimiento urbano como un todo, donde la acción de un agente puede afectar directamente el comportamiento

de otro. En este sentido, dos de los retos planteados merecen ser destacados: la forma de integración y la dinámica temporal. Ambos aspectos se resolvieron de forma óptima.

El primero se resolvió al permitir que los tres submodelos integrados intercambiasen su información de salida, es decir, los resultados espaciales de la simulación, así como consultar actualizaciones en cuanto a los datos de entrada previa a cada ejecución. Para el segundo, se hizo necesario basarse en unos tiempos de referencia de probable reiteración de cada agente. La ventaja aquí es que estos intervalos de tiempo son indicativos y modificables, si así se requiere.

La solución de crear escenarios integrados considerando solamente las diferentes condiciones de salto de un submodelo hacia el otro es conceptualmente sencilla, pero al mismo tiempo es un desafío por presentar un elevado nivel de complejidad en las decisiones de los agentes. El ensayo realizado en el Corredor del Henares ha permitido probar cómo la elección del valor de inflexión, reflejado al definir el criterio de salto en la interfaz del MI, puede conducir a diferentes formas de interacción entre los tres agentes. Destaca aquí que con ajustar mínimamente los valores de entrada, puede emerger un nuevo orden de actuación de los agentes, cambiando considerablemente la secuencia de ejecución de los submodelos y consecuentemente la distribución espacial final del crecimiento urbano simulado. Esta flexibilidad que presenta el modelo integrado representa de manera objetiva la complejidad del comportamiento humano en este tipo de procesos urbanos.

Respecto a la falta de una descripción pormenorizada que permita una mejor comprensión y posible reproducción del modelo, constatamos que esta limitación ya está solventada en los últimos trabajos publicados, que de alguna forma ya suelen incorporar su Protocolo ODD (Polhill, 2010). Con este objetivo se ha decidido seguir las recomendaciones y elaborar el protocolo del modelo AMEBA con la pretensión de facilitar la comprensión de aspectos técnicos de la arquitectura del modelo (Anexo 1).

Tal como en los submodelos, los resultados de las diferentes ejecuciones realizadas han permitido verificar el prototipo desarrollado, ya que corroboraron su correcto funcionamiento en términos conceptuales, técnicos e informáticos. Aunque se hayan presentado solamente tres escenarios para cada agente y el ensayo se haya realizado en el Corredor del Henares, el prototipo fue concebido de forma suficientemente flexible para permitir generar múltiples escenarios, así como aplicarlo a diferentes zonas de estudio.

A modo de conclusión, es lógico considerar que esta flexibilidad de los MBA es un valor añadido en cuanto a su apoyo a la ordenación territorial, ya que como se ha visto **son capaces de producir escenarios realistas y, así, ampliar la comprensión de las dinámicas del crecimiento urbano, especialmente útil para los planificadores urbanos.** Las reflexiones presentadas a lo largo de esta investigación certifican que los MBA pueden servir como apoyo fundamental en las tareas de planificación urbana a escala supramunicipal.

Entre las múltiples opciones existentes para simular el futuro con el uso de modelos prospectivos, **los MBA presentan potencialidades destacables vistas a lo largo de esta investigación.** Entre sus principales fortalezas, resaltamos (i) simular el comportamiento de agentes a nivel individual (es decir, desde un enfoque *bottom-up*) y (ii) permitir la movilidad de los agentes a lo largo del área de estudio de acuerdo a su objetivo. Es cierto que los CA también permiten considerar que elementos espaciales cambien su estado en función de reglas de decisión establecidas, y simulan un proceso *bottom-up*, pero están limitados a las relaciones puramente de vecindad del modelo. Otros enfoques como la microsimulación o la evaluación multicriterio ni siquiera están preparados para tratar explícitamente las relaciones sociales entre los elementos del sistema, estando supeditados a unas funciones matemáticas que, en algunos casos, también son utilizados para indicar la evolución del crecimiento urbano. En un segundo plano, merece mencionar otras ventajas de los MBA, como (iii) la posibilidad de simular procesos satisfactoriamente aunque que parta de una base de datos parcial, o (iv) la facilidad de intercambio con los SIG.

Es posible constatar que los **estudios científicos de ámbito urbano se están extendiendo progresivamente,** dada la evidente posición de la ciudad como fuente de inagotables temas de investigación debido a su dinámica y a su continuo estado de desequilibrio. En un mundo donde múltiples agentes actúan simultáneamente sobre un mismo contexto geográfico modificándolo de forma cada vez más rápida e instantánea, y mostrada la posibilidad de simular su comportamiento, consideramos que la incorporación de la modelización a los estudios geográficos debe ser incentivada. En este sentido, no se puede dejar de mencionar los significativos avances de **las TIG imprescindibles para respaldar los análisis espaciales** (Drummond y French, 2008, Onsrud y Kuhn, 2016), y que ejerce un **papel fundamental** para suplir las necesidades cada vez más exigentes generadas por modeladores.

En términos globales, se puede constatar que todavía hay un largo camino por recorrer para que los MBA sean considerados modelos viables y oportunos en el apoyo real y práctico a la planificación urbana. Con el fin de contribuir con este cambio de perspectiva, concluimos que **hay una necesidad inminente de ahondar en el campo de investigación aplicada a la simulación de fenómenos urbanos y generación de escenarios de futuro.** Finalmente se espera que el impacto técnico-científico de esta investigación represente un pequeño paso hacia este objetivo.

LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Indudablemente en una investigación nos encontramos con algunas dificultades que a veces nos impiden seguir el camino previamente planificado, o que quizás nos hagan replantear alguna solución o repensar cómo solventar algún obstáculo. A ellos preferimos no llamarles problemas, sino limitaciones, ya que a la vez nos abren nuevos caminos y nos llevan hacia nuevos desafíos, y de ninguna forma nos impiden seguir recopilando nuevas ideas y encontrar nuevos temas para investigar. En el presente caso, algunas de las limitaciones encontradas nos llevan a sugerir una continuidad y plantear nuevas propuestas de trabajo hacia el futuro.

Primeramente, consideramos que hay una serie de **aspectos técnicos cuya solución podría plantearse de forma alternativa**, permitiendo realizar ensayos y probar nuevos recursos. Este es el caso principalmente de los procesamientos apoyados en los SIG. A modo de ejemplo, podemos mencionar la forma de distribución de la población a lo largo del área de estudio, considerando sus unidades geográficas de referencia y de salida (*píxeles*), o la definición de una superficie mínima para la conversión de una unidad en urbanizable. Son inconvenientes típicos del procesamiento geográfico la compatibilización de datos con características diferentes y su distribución espacial, así como la representación cartográfica; ambos han salido a la luz a lo largo de esta investigación. Por lo tanto, consideramos que refinar estos procesamientos llevaría a la producción de resultados más realistas y como consecuencia, sus generalizaciones temáticas se verían minimizadas.

Destacamos también que la **relación entre la modelación y los SIG** tienen un potencial importante, y en este sentido, un estudio enfocado a acercar estas técnicas traería beneficios para los usuarios de ambos. Consideramos que, por un lado, todavía no se ha conseguido resolver de manera satisfactoria la falta de herramientas de modelación en los SIG disponibles y desarrollados hasta hoy, y por otro, todavía hay un largo camino que recorrer en la incorporación de herramientas de procesamiento de información espacial en las plataformas actuales diseñadas para el desarrollo de un MBA, que no están del todo desarrolladas, o quizás no debidamente conectadas. Sabemos que hay algunas iniciativas en este sentido y nos gustaría investigarlas más en profundidad y si es posible, contribuir para su mejora y puesta en marcha.

Respecto a la **programación informática en general**, elegimos la plataforma *NetLogo* por ser un software de acceso libre y con un reconocido ritmo de aprendizaje rápido. Aun así, las herramientas de visualización de esta plataforma son muy mejorables (ventanas emergentes, salidas gráficas, etc.), y podrían ser desarrolladas y compartidas con la comunidad para su futuro uso en proyectos de ámbito espacial. Además, a pesar de que ya se considera un avance el contar con una extensión para la conexión directa con los SIG, entendemos que las herramientas disponibles todavía se podrían explorar mejor y deberían ser ampliadas. Asimismo, reconocemos que hay una serie de plataformas más avanzadas en términos de capacidad informática, con interfaz más amigable, y facilidad de programación de ciertos comportamientos, a las cuales nuestro modelo podría ser transpuesto. De esta forma, se multiplicarían las posibilidades de análisis y facilitaría la ampliación del modelo propuesto.

En cuanto a nuestro prototipo en particular, se podría **considerar la posibilidad de simular fenómenos adversos**, tales como decrecimiento de la población, especulación inmobiliaria, variación en el comportamiento desde el punto de vista psicológico, entre otros. Las principales críticas y comentarios recibidos en las conferencias donde se presentó parte de esta investigación se centraban en estos tópicos, e indudablemente permitirían realizar simulaciones más realistas o más completas. Consideramos que la posibilidad de que el público externo identifique estos fenómenos, y que además los podamos simular con el MBA, nos parece acertada, y una interesante línea de investigación futura.

Igualmente sería deseable que el modelo incorporara **la variabilidad en el tiempo de algunos elementos espaciales** (ej.: creación de nuevas infraestructuras de comunicación, ampliación de equipamientos públicos, etc.). Es una limitación de este modelo que no debería demandar mucho esfuerzo en conseguirlo y le aportaría una representación más realista de la evolución urbana. En este caso, sería necesario disponer de variables con la correspondiente representación espacial de los cambios en el tiempo y plantear su forma de incorporación al modelo.

A pesar de las numerosas reflexiones sobre los **puentes que podrían o deberían existir entre la planificación considerando ambos los enfoque *top-down* and *bottom-up*** (Choguill, 1994, Murray *et al.*, 2009, Pissourios, 2014), entendemos que mientras no se encuentre una forma de diálogo entre los modeladores, investigadores y académicos por un lado, y los planificadores y tomadores de decisión por el otro, se estima que la incorporación de técnicas de modelación prospectiva en el ámbito práctico seguirán siendo escasas. Actualmente hay una tendencia que no divisa un cambio significativo de perspectiva por parte de los planificadores urbanos, ni tampoco una labor muy intencionada de comunicación por parte de los académicos, corroborado por la casi absoluta inexistencia de estas técnicas de modelación como soporte a la ordenación territorial. Es una perspectiva que podría cambiar y mejorar a través de la proposición de proyectos académicos participativos, que contemple la inclusión de la administración en las etapas de concepción del modelo y evaluación de resultados. Aunque hay una clara dificultad en integrar ambos perfiles, corroborado por la baja participación de las entidades públicas participantes en el proyecto SIMURBAN, por ejemplo, se considera esencial insistir en esta posibilidad.

A pesar de que el desarrollo de este tipo de modelos ha sido muy prolífico en los últimos años, todavía existe una laguna importante en cuanto al **control de validación y verificación de MBA**, donde hay todavía mucho por hacer (Crooks *et al.*, 2008, Ngo y See, 2012, Villamor *et al.*, 2013, Truong *et al.*, 2014). Coincidimos con Ligmann-Zielinska cuando constata que los enfoques tradicionales de validación que comparan datos simulados y observados son útiles cuando se trata de eventos y procesos pasados, sin embargo, no es tan evidente qué dato de referencia debería ser usado cuando se trata de planificar el futuro (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2010). En cualquier caso, consideramos que la interfaz flexible del modelo podría permitir probar algún tipo de análisis de sensibilidad, ya que permite variar los parámetros de entrada fácilmente. Así sería posible evaluar la aplicabilidad del modelo, más allá de la elaboración de escenarios realizada en esta tesis.

También sería interesante contar con que el modelo pueda resolver otras inquietudes manifestadas desde **diferentes puntos de vista, externos a los de ámbito geográfico**. En este sentido, interesaría proponer un proyecto integrado, académico o aplicado, donde participara un equipo multidisciplinar (geógrafos, planificadores, informáticos, sociólogos, economistas, etc.). Un buen ejemplo sería hacer del MBA un soporte para la construcción de un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE). Considerando que se trata de un conjunto de elementos físicos y lógicos que proporcionan el entorno adecuado para la adopción `racional´ de decisiones sobre problemas espaciales mal definidos (Bosque Sendra, 2001), apostamos que la integración de los MBA sería muy apropiada. Dadas las características de estos tipos de modelos, consideramos plausible su incorporación, ya que funcionaría como un soporte eficiente en la etapa correspondiente a la búsqueda de alternativas para determinadas tomas de decisiones.

Respecto a la **participación de otros actores en el proceso de construcción del modelo**, nos resultaría interesante involucrar especialmente a los planificadores y/o los responsables políticos de los municipios del área de estudio para apoyar la creación de escenarios reales. Ha habido un primer acercamiento al presentar la concepción del modelo y algunos productos preliminares a los agentes municipales de los municipios del Corredor del Henares, en las reuniones semestrales del Proyecto SIMURBAN. Asimismo, el acceso y consideración de este modelo como una herramienta de apoyo complementario dentro de la Administración Pública sería muy importante para obtener un mayor éxito en la aplicación de los MBA.

Por otro lado, el **acceso de la población a estos tipos de modelos prospectivos** también sería una contribución importante, dado que una gran parte de la información de entrada proviene del entendimiento del comportamiento humano. Dicho acercamiento, que podría hacerse a través de encuestas o participación directa, podría permitir definir de una manera más realista las reglas de actuación y tener en cuenta las problemáticas de los agentes de forma más sintonizada con su día a día. Ya hubo una primera experiencia que trató de aproximar la modelación a la comunidad ajena a los temas de modelación espacial, y de probar la comprensión del prototipo presentado buscando obtener un *feedback* en cuando a su percepción. Se hizo a través de la realización de un taller en el marco de la XV Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid, que logró reunir más de una decena de profesionales provenientes de diferentes ámbitos para conocer, discutir y probar los modelos. Las críticas fueron positivas en cuanto a su aplicación, y se centraron principalmente en la necesidad de la elaborar de una herramienta más amigable y con etapas de ejecución auto-comprensibles. Entre otros, juzgamos conveniente dar continuidad a este trabajo y seguir difundiendo el conocimiento en cuanto a aplicaciones de MBA en el campo de la geografía.

La buena aceptación de este tipo de evento nos induce a intentar reproducirlo, así como a plantear otras actividades que permita interactuar con diferentes actores originalmente de otros campos de estudio. En este sentido, buscaremos **seguir compartiendo los hallazgos de esta investigación** a través de organización de talleres, participación en congresos, colaboración con otros grupos de investigación afines, presentación de ponencias y elaboración de artículos científicos[29], etc., que creemos son medios fundamentales para la mayor difusión de estos tipos de modelos.

[29] Existen dos artículos científicos en fase de estructuración, que abarcarán los siguientes temas: descripción del modelo (publicación del Protocolo ODD) y modelo de ocupación residencial (submodelo de población).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Las referencias bibliográficas fueron gestionadas y creadas en el programa *EndNote X4*, utilizando el formato exigido por la UAH, cuyo archivo (*.sty*) es una adaptación al español del estilo de *Harvard University*, el cual la autorapone a disposición de forma gratuita, bajo petición (carolina.carvalho@uah.es).

ACOSTA-MICHLIK, L., ROUNSEVELL, M.D.A., BAKKER, M., VAN DOORN, A., GÓMEZ DELGADO, M. y DELGADO, M. (2014). An agent-based assessment of land use and ecosystem changes in traditional agricultural landscape of Portugal. *Intelligent Information Management*, 6, pp.55-80.

AGARWAL, C., GREEN, G.M., GROVE, J.M., EVANS, T.P. y SCHWEIK, C.M. (2002). *A Review and Assessment of Land-Use Change Models - Dynamics of Space, Time, and Human Choice,* Newtown Square, PA, Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.

AGUILERA, A. y UGALDE, E. (2007). A spatially extended model for residential segregation. *Discrete Dynamics in Nature and Society*.

AGUILERA BENAVENTE, F., GÓMEZ DELGADO, M. y CANTERGIANI, C.C. (2010a). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio*, 165-166, pp.481-496.

AGUILERA BENAVENTE, F., VALENZUELA MONTES, L.M. y BOSQUE SENDRA, J. (2010b). 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 ONTIVEROS, A. (2000). Simulaciones multiagentes de ambientes urbanos. *Vetas*, Año II, núm 5, pp.205-223.

ALLPORT, F.H. (1924). *Social psychology*, Boston; New York, Houghton Mifflin.

AMBLARD, F., BOMMEL, P. y ROUCHIER, J. (2007). Assessment and Validation of Multi-agent Models. *En:* PHAN, D. y AMBLARD, F. (eds.) *Agent-Based Modelling and Simulation in The Social and Human Sciences.* Oxford: The Bardwell Press.

AN, L., LINDERMAN, M., QI, J., SHORTRIDGE, A. y LIU, J. (2005). Exploring complexity in a human-environment system: An agent-based spatial model for multidisciplinary and multiscale integration. *Annals of the Association of American Geographers,* 95, pp.54-79.

AXELROD, R. (2005). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. *En:* RENNARD, J.-P. (ed.) *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management.* Hersey, PA: Idea Group.

AXELROD, R. y TESFATSION, L. (2006). A guide for newcomers to agent-based modeling in the social sciences. *En:* TESFATSION, L. y JUDD, K.L. (eds.) *Handbook of Computational Economics. Agent-based computational economics.* Amsterdam, The Netherlands: North-Holland.

BALDUCCI, A. y FEDELI, V. (2008). The State of European Cities Report: some critical reflections upon urban phenomena in the European Union. *Urban Research & Practice,* 1, pp.240-253.

BARREDO CANO, J.I. y GOMEZ DELGADO, 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 OLMEDO, M.T. (eds.) *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions.* Springer.

BARROS, J. (2004). *Urban Growth in Latin American Cities. Exploring urban dynamics through agent-based simulation.* Doctor of Philosophy, Bartlett School of Graduate Studies, Bartlett School of Architecture and Planning, University College London, University of London.

BARROS, J. (2012). Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach. *En:* HEPPENSTALL, A., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Springer.

BATTY, M. (2005). *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals,* Massachusetts Institute of Technology.

BATTY, M. (2008). The size, scale, and shape of cities. *Science,* 319, pp.769-771.

BATTY, M. (2012). Building a science of cities. *Cities,* 29, Supplement 1, pp.S9-S16.

BATTY, M. (2017). Cities in Disequilibrium. *En:* JOHNSON, J., NOWAK, A., ORMEROD, P., ROSEWELL, B. y ZHANG, Y.-C. (eds.) *Non-Equilibrium Social Science and Policy: Introduction and Essays on New and Changing Paradigms in Socio-Economic Thinking.* Cham: Springer International Publishing.

BATTY, M., DESYLLAS, J. y DUXBURY, E. (2003). Safety in Numbers? Modelling Crowds and Designing Control for the Notting Hill Carnival. *Urban Studies,* 40, pp.1573-1590.

BENENSON, I., OMER, I. y HATNA, E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B,* 29, pp.491-512.

BENENSON, I. y TORRENS, P.M. (2003). Geographic Automata Systems: A New Paradigm for Integrating GIS and Geographic Simulation. *En:* MARTIN, D., ed., Southampton.

BENENSON, I. y TORRENS, P.M. (2004). *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena,* John Wiley & Sons, L.

BENENSON, I. y TORRENS, P.M. (2005). A Minimal Prototype for Integrating GIS and Geographic Simulation through Geographic Automata Systems. *En:* ATKINSON, P.M., FOODY, G.M., DARBY, S.E. y WU, F. (eds.) *GeoDynamics.* CRC Press, Boca Raton, London, New York.

BERDOULAY, V. (2009). La historia de la geografía en el desafío de la prospectiva. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 51, pp.9-23.

BERNARDOS DOMÍNGUEZ, G. (2009). Creación y destrucción de la burbuja inmobiliaria en España. *Información Comercial Española: Revista de Economía,* La primera crisis global: procesos, consecuencias, medidas, pp.23-40.

BERT, F.E., ROVERE, S.L., MACAL, C.M., NORTH, M.J. y PODESTÁ, G.P. (2014). Lessons from a comprehensive validation of an agent based-model: The experience of the Pampas Model of Argentinean agricultural systems. *Ecological Modelling,* 273, pp.284-298.

BHARATHY, G.K. y SILVERMAN, B. (2013). Holistically evaluating agent-based social systems models: a case study. *Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International,* 89, pp.102-135.

BONABEAU, E. (2002a). Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. National Academy of Sciences of the United States of America, USA. pp.7280-7287.

BONABEAU, E. (2002b). Predicting the Unpredictable. *Harvard Business Review,* March 2002, pp.109-116.

BÖRJESON, L., HÖJER, M., DREBORG, K.-H., EKVALL, T. y FINNVEDEN, G. (2005). Towards a user´s guide to scenarios - a report on scenario types and scenario techniques. Sweden: Foundation for Environmental Strategic Research.

BOSQUE SENDRA, J. (2001). Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). *El Campo de las Ciencias y las Artes,* 138, pp.137-174.

BRANDÃO ESTÊVÃO, A.L.G. (2015). *La incertidumbre en el proceso urbano: la producción del espacio de la Margem Sul do Estuário do Tejo.* PhD, Universitat de Barcelona.

BURROUGH, P.A. (1986). *Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment*, Oxford, Clarendon.

CALDERÓN CALDERÓN, B. (2002). Ganar tamaño y territorio: fusiones de empresas y nuevos yacimientos de actividad en el sector inmobiliario español. *Investigaciones Geográficas,* 28, pp.71-88.

CALVO LÓPEZ, R., GARCÍA PÉREZ, E., MOLINA COSTA, P., RIEZNIK LAMANA, N. y SÁNCHEZ MOYA, A. (2007). La Explosión Urbana de la Conurbación Madrileña. *Madrid: ¿la suma de todos? Globalización, territorio, desigualdad.* Madrid.

CANTERGIANI, C.C. (2011a). Identificación de componentes espaciales en un Modelo Basado en Agentes. *En:* PINTO, N.N., TENEDÓRIO, J.A., SANTOS, M. y DEUS, R.D., eds. 7th Virtual Cities and Territories, Lisbon. pp.65-69.

CANTERGIANI, C.C. (2011b). Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica. *Serie Geográfica,* 17, pp.29-43.

CANTERGIANI, C.C., BARROS, J. y GÓMEZ DELGADO, M. (2014a). How real estate agents behavior affects urban growth: an agent-based model approach. *En:* MIGUEL, F., AMBLARD, F. y MADELLA, X., eds. Advances in Computational Social Science and Social Simulation, Barcelona. Universitat Autónoma de Barcelona, pp.491-493.

CANTERGIANI, C.C. y GOMEZ DELGADO, M. (2016a). Desarrollo de un Modelo Basado en Agentes para simular el crecimiento urbano: Submodelo de Ocupación Residencial. XVII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Málaga.

CANTERGIANI, C.C. y GOMEZ DELGADO, M. (2016b). Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 70, pp.259-283.

CANTERGIANI, C.C. y GÓMEZ DELGADO, M. (en revisión). A prototype of an agent-based model of urban growth: simulating urban planners´ and housing developers´ behavior. *Computers Environment and Urban Systems*.

CANTERGIANI, C.C., GÓMEZ DELGADO, M. y VERGARA, C. (2014b). Desarrollo de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano: Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica (Teledetección y SIG en los estudios de paisaje y medio ambiente), Alicante. Universidad de Alicante, pp.10-18.

CARDOZO, O.D., GUTIÉRREZ PUEBLA, J. y GARCÍA PALOMARES, J.C. (2010). Influencia de la morfología urbana en la demanda de transporte público: análisis mediante SIG y modelos de regresión múltiple. *Geofocus,* 10, pp.82-102.

CARSJENS, G.J. (2009). *Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes.* Wageningen University.

CASTELLA, J.-C., KAM, S.P., QUANG, D.D., VERBURG, P.H. y HOAHN, C.T. (2007). Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/ cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 24, pp.531-545.

CASTLE, C.J.E. (2006). Developing a Prototype Agent-Based Pedestrian Evacuation Model to Explore the Evacuation of King´s Cross St. Pancras Undergroud Station. *CASA Working Paper Series*, 108.

CASTLE, C.J.E. (2007). Guidelines to Assess Pedestrian Evacuation Software Applications. *UCL Working Papers Series*, 115.

CASTLE, C.J.E. y CROOKS, A.T. (2006). Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. *UCL Working Papers Series*, 110.

COCERO MATESANZ, D., GARCÍA LÁZARO, F.J. y SANTOS PRECIADO, J.M. (2006). Propuesta metodológica para la desagregación espacial de variables sociodemográficas con sistemas de información. *Cuadernos Geográficos*, pp.7-22.

COMISIÓN EUROPEA y UNHABITAT (2016). The State of European Cities 2016 - Cities leading the way to a better future.

COUCLELIS, H. (1997). From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp.165-174.

COUCLELIS, H. (2001). Why I No Longer Work with Agents: A Challenge for ABMs of Human-Environment Interactions. *En:* PARKER, D.C., BERGER, T. y MANSON, S.M. (eds.) *Meeting the Challenge of Complexity: Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/Land-Cover Change.* Irvine, California, USA.

CROOKS, A., CASTLE, C. y BATTY, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, pp.417-430.

CROOKS, A.T. (2006). Exploring Cities Using Agent-Based Models and GIS. *UCL Working Papers Series*, 109.

CROOKS, A.T. (2008). Constructing and Implementing an Agent-Based Model of Residential Segregation through Vector GIS. *UCL Working Papers Series*, 133.

CROOKS, A.T. y HEPPENSTALL, A.J. (2012). Introduction to Agent-Based Modelling. *En:* HEPPENSTALL, A., CROOKS, A., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* New York: Springer.

CROOKS, A.T., PATEL, A. y WISE, S. (2014). Multi-Agent Systems for Urban Planning. *En:* PINTO, N.N., TENEDÓRIO, J.A., ANTUNES, A.P. y ROCA, J. (eds.) *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories.* Hershey, PA: IGI Global.

CHOGUILL, C.L. (1994). Crisis, Chaos, Crunch? Planning for Urban Growth in the Developing World. *Urban Studies*, 31, pp.935-945.

DAHAL, K.R. y CHOW, T.E. (2014). An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 28, pp.2281-2303.

DEARDEN, J. y WILSON, A. (2012). The Relationship of Dynamic Entropy Maximising and Agent-Based Approaches in Urban Modelling. *En:* HEPPENSTALL, A., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Springer.

DELGADO JIMÉNEZ, A. (2013). *Evolución y crisis de la Región Metropolitana de Madrid. Una revisión crítica del planeamiento urbano*, Publicia.

DIAZ-PACHECO, J. y GUTIÉRREZ, J. (2014). Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas. *Journal of Land Use Science*, 9, pp.243-259.

DÍAZ MUÑOZ, M.Á. y JIMÉNEZ GIGANTE, F. (2002). Estructura territorial y relaciones funcionales en el Corredor del Henares: una aproximación desde la movilidad diaria de la población. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, 22, pp.301-327.

DÍAZ PACHECO, J. y GARCÍA PALOMARES, J.C. (2014). A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation. *Journal of Maps*, 10, pp.424-433.

DIELEMAN, F. (2001). Modelling residential mobility: A review of recent trends in research. *Journal of Housing and the Built Environment*, 16, pp.249-265.

DONIGIAN, A.S. (2002). Watershed model calibration and validation: the HSPF experience. Annual Water Environment Federation - Technical Exhibition and Conference (WEFTEC). Water Environment Federation, pp.44-73.

DRUMMOND, W.J. y FRENCH, S.P. (2008). The Future of GIS in Planning: Converging Technologies and Diverging Interests. *Journal of the American Planning Association*, 74, pp.161-174.

ENCINAS, M.A., HERNANDEZ-JIMENEZ, V., HERNÁNDEZ, C., MARTÍNEZ, L. y WINDER, N. (2006). A Conceptual Model of Land Use Change in the Madrid Autonomous Region.

EPSTEIN, J.M. (1999). Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity*, 4, pp.41-60.

EPSTEIN, J.M. y AXTELL, R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Washington D.C., MIT Press.

ETTEMA, D. (2011). A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, pp.1-11.

FARINÓS DASI, J., OLCINA CANTOS, J., RICO AMORÓS, A., RODRÍGUEZ NAVARRO, C., ROMERO RENAU, L.D., ESPEJO MARÍN, C. y VERA REBOLLO, J.F. (2005). Planes estratégicos territoriales de carácter supramunicipal. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 39, pp.117-149.

FEITOSA, F.F., LE, Q.B. y VLEK, P.L.G. (2011). Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, pp.104-115.

FERBER, J. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Reading - MA, Addison-Wesley.

FERNÁNDEZ GÜELL, J.M. (2011). Recuperación de los estudios del futuro a través de la prospectiva territorial. *Ciudad y Territorio*, XLIII, pp.11-32.

FILATOVA, T. (2015). Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, pp.397-413.

FILATOVA, T., PARKER, D.C. y VAN DER VEEN, A. (2009). Agent-Based Urban Land Markets: Agent´s princing behavior, land prices and urban land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12 (1).

FILATOVA, T., VERBURG, P.H., PARKER, D.C. y STANNARD, C.A. (2013). Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling and Software*, 45, pp.1-7.

FOKKEMA, T. y VANWISSEN, L. (1997). Moving plans of the elderly: a test of the stress-threshold model. *Environment and Planning A*, 29, pp.249-268.

FONTAINE, C.M. y ROUNSEVELL, M.D.A. (2009). An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape. *Landscape Ecology*, 24, pp.1237-1254.

FRANKLIN, S. y GRAESSER, A. (1996). Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-96), Heidelberg. Springer-Verlag.

GALLARDO, M. y MARTÍNEZ-VEGA, J. (2012). Cambios de usos del suelo en la Comunidad de Madrid: Analizando el pasado y simulando el futuro. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid. AGE-CSIC.

GAUBE, V. y REMESCH, A. (2013). Impact of urban planning on household's residential decisions: An agent-based simulation model for Vienna. *Environmental Modelling and Software*, 45, pp.92-103.

GIDDENS, A. (1984). *The Constitution of Society: Outline of the Theory of Structuration*, Cambridge, Polity Press.

GILBERT, N. (2005). *Agent-based social simulation: dealing with complexity*, Centre for Research on Social Simulation.

GILBERT, N. (2008). *Agent-based models*, SAGE.
GILBERT, N., HAWKSWORTH, J.C. y SWINNEY, P.A. (eds.) (2009). *An Agent-Based Model of the English Housing Market*.
GILBERT, N. y TERNA, P. (2000). How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society*, 1, pp.57-72.
GILBERT, N. y TROITZSCH, K.G. (2005). *Simulation for the Social Scientist*, Glasgow, Open University Press.
GÓMEZ-DELGADO, M. y TARANTOLA, S. (2006). GLOBAL sensitivity analysis, GIS and multi-criteria evaluation for a sustainable planning of a hazardous waste disposal site in Spain. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, pp.449-466.
GÓMEZ DELGADO, M. (1998). *Análisis geográfico de la producción y gestión de residuos tóxicos y peligrosos en el Corredor Industrial del Henares. Cálculo de rutas óptimas para su transporte mediante un SIG*. Memoria de licenciatura, Universidad de Alcalá de Henares.
GÓMEZ DELGADO, M. y BARREDO CANO, J.I. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*, Paracuellos de Jarama, RA-MA.
GÓMEZ DELGADO, M. y RODRÍGUEZ ESPINOSA, V.M. (eds.) (2012). *Análisis de la Dinámica Urbana y Simulación de Escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*, Madrid: RA-MA.
GÓMEZ MENDOZA, J. (1977). *Agricultura y expansión urbana. La campiña del bajo Henares en la aglomeración de Madrid*, Madrid, Alianza Universidad.
GÓMEZ OREA, D. (2008). *Ordenación territorial,* Madrid, Mundi-Prensa.
GONZÁLEZ PÉREZ, J.M. (2010). The Real Estate and Economic Crisis: An Opportunity for Urban Return and Rehabilitation Policies in Spain. *Sustainability*, 2, pp.1571-1601.
GRIMM, V., BERGER, U., BASTIANSEN, F., ELIASSEN, S., GINOT, V., GISKE, J., GOSS-CUSTARD, J., GRAND, T., HEINZ, S.K., HUSE, G., HUTH, A., JEPSEN, J.U., JØRGENSEN, C., MOOIJ, W.M., MÜLLER, B., PE'ER, G., PIOU, C., RAILSBACK, S.F., ROBBINS, A.M., ROBBINS, M.M., ROSSMANITH, E., RÜGER, N., STRAND, E., SOUISSI, S., STILLMAN, R.A., VABØ, R., VISSER, U. y DEANGELIS, D.L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198, pp.115-126.
GRIMM, V. y RAILSBACK, S.F. (2005). *Individual-based modeling and ecology*, Princeton, NJ, Princeton University Press.
HANSEN, H.S. (2010). Modelling the futures 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.
HEPPENSTALL, A., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (2012). *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Dordrecht, Springer.
HEPPENSTALL, A., MALLESON, N. y CROOKS, A. (2016). "Space, the Final Frontier": How Good are Agent-Based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? *Systems*, 4.
HOLLANDER, C.D. y WU, A.S. (2011). The Current State of Normative Agent-Based Systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14, pp.3-.
INE Instituto Nacional de Estadística.
INE (2016). Spanish Statistical National Institute (www.ine.es).
JIANG, B. (2000). Agent-based approach to modeling urban and environmental systems within GIS. 9th International Symposium on Spatial Data Handling
JORDAN, R., BIRKIN, M. y EVANS, A. (2012). Agent-Based Modeling of Residential Mobility, Housing Choice and Regeneration. *En:* HEPPENSTALL, A., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Springer.
KENNEDY, W.G. (2012). Modelling Human Behaviour in Agent-Based Models. *En:* HEPPENSTALL, A.J., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Dordrecht: Springer Netherlands.

LEE, J.-S., FILATOVA, T., LIGMANN-ZIELINSKA, A., HASSANI-MAHNOOEI, B., STONEDAHL, F., LORSCHEID, I., VOINOV, A., POLHILL, J.G., SUN, Z. y PARKER, D.C. (2015). The Complexities of Agent-Based Modeling Output Analysis. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 18.

LIGMANN-ZIELINSKA, A. y JANKOWSKI, P. (2010). Exploring normative scenarios of land use development decisions with an agent-based simulation laboratory. *Computers, Environment and Urban Systems,* 34, pp.409-423.

LIGMANN-ZIELINSKA, A. y SUN, L. (2010). Applying time-dependent variance-based global sensitivity analysis to represent the dynamics of an agent-based model of land use change. *International Journal of Geographical Information Science,* 24, pp.1829-1850.

LIGTENBERG, A., VAN LAMMEREN, R.J.A., BREGT, A.K. y BEULENS, A.J.M. (2010). Validation of an agent-based model for spatial planning: A role-playing approach. *Computers, Environment and Urban Systems,* 34, pp.424-434.

LÓPEZ DE LUCIO, R. (2003). Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid. *Urban,* 8, pp.124-161.

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.

LORENZ, E.N. (1972). Predictability: Does the flap of a butterfly´s wings in Brazil set off a tornado in Texas? American Association for the Advancement of Science, 139th meeting.

MACAL, C.M. y NORTH, M.J. (2005). Tutorial on Agent-based Modeling and Simulation. *En:* KUHL, M.E., STEIGER, N.M., ARMSTRONG, F.B. y JOINES, J.A., eds.

MAGLIOCCA, N., SAFIROVA, E., MCCONNELL, V. y WALLS, M. (2011). An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS). *Computers, Environment and Urban Systems,* 35, pp.183-191.

MAGLIOCCA, N.R., BROWN, D.G., MCCONNELL, V.D., NASSAUER, J.I. y WESTBROOK, S.E. (2014). Effects of alternative developer decision-making models on the production of ecological subdivision designs: experimental results from an agent-based model. *Environment and Planning B,* 41, pp.907-927.

MALIK, A., CROOKS, A.T., ROOT, H. y SWARTZ, M. (2015). Exploring Creativity and Urban Development with Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 18.

MANSON, S.M. (2007). Challenges in evaluating models of geographic complexity. *Environment and Planning B,* 34, pp.245-260.

MERINERO RODRÍGUEZ, R. (2010). *Planificación Estratégica Urbana y Territorial: elementos básicos para su aplicación en la administración local,* Sevilla.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2013). Disponible: http://www.fomento.es/mfom/.

MOHAMED, R. (2006). The Psychology of Residential Developers. *Journal of Planning Education and Research,* 26, pp.28-37.

MOUSSAÏD, M., KAPADIA, M., THRASH, T., SUMNER, R.W., GROSS, M., HELBING, D. y HÖLSCHER, C. (2016). Crowd behaviour during high-stress evacuations in an immersive virtual environment. *Journal of The Royal Society Interface,* 13.

MÜLLER, B., BOHN, F., DRESSLER, G., GROENEVELD, J., KLASSERT, C., MARIN, R., SCHLÜTER, M., SCHULZE, J., WEISE, H. y SCHWARZ, N. (2013). Describing human decisions in agent-based models - ODD + D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling and Software,* 48, pp.37-48.

MURRAY, M., GREER, J., HOUSTON, D., MCKAY, S. y MURTAGH, B. (2009). Bridging Top Down and Bottom Up: Modelling Community Preferences for a Dispersed Rural Settlement Pattern. *European Planning Studies,* 17, pp.441-462.

NAREDO, J.M. (2009). La cara oculta de la crisis: el fin de boom inmobiliario y sus consecuencias. *Revista de Economía Crítica,,* 7, pp.313-340.

NGO, T.A. y SEE, L.M. (2012). Calibration and Validation of Agent-Based Models of Land Cover Change. *En:* HEPPENSTALL, A., CROOKS, A., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* New York: Springer.

NORTE PINTO, N.E. (2007a). Cellular automata and urban studies: a literature survey. *ACE - Architecture, City and Environment,* 1, pp.368-399.

NORTE PINTO, N.E. (2007b). *Cellular Automata Modeling and Urban Simulation.* MSc, Universidad Politecnica de Barcelona.

NORTE PINTO, N.E., DOURADO, J. y NATÁLIO, A. (2012). Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems. The International Symposium on Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems - CAMUSS, Oporto.

O'SULLIVAN, D. y HAKLAY, M. (2000). Agent-based models and individualim: is the world agent-based? *Environment and Planning A,* 32, pp.1409-1425.

ONSRUD, H. y KUHN, W. (eds.) (2016). *Advancing Geographic Information Science: the past and next twenty years*, Needham, MA: GSDI Association Press.

OPENSHAW, S. y OPENSHAW, C. (1997). *Artificial intelligence in geography*.

OSE - OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (2005). *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad,* Madrid, Mundiprensa.

OSE - OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (2010). Informe Sostenibilidad en España 2010. Madrid: Observatorio de la Sostenibilidad en España - OSE.

PAEGELOW, M. y CAMACHO OLMEDO, M.T. (2008). *Modelling environmental dynamics,* Berlin, Springer-Verlag.

PARKER, D.C. (2005). Integration of Geographic Information Systems and Agent-Based Models of Land Use: Prospects and Challenges. *En:* MAGUIRE, D.J., BATTY, M. y GOODCHILD, M.F. (eds.) *GIS, Spatial Analysis, and Modeling.* Redlands, California: Esri Press.

PARKER, D.C., BERGER, T. y MANSON, S.M. (2001). Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. *En:* PARKER, D.C., BERGER, T. y MANSON, S.M., eds. International Workshop, Irvine, California, USA.

PARKER, D.C. y FILATOVA, T. (2008). A conceptual design for a bilateral agent-based land market with heterogeneous economic agents. *Computers, Environment and Urban Systems,* 32, pp.454-463.

PARKER, D.C., MANSON, S.M., JANSSEN, M.A., HOFFMANN, M.J. y DEADMAN, P.J. (2003). Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. Annals of the Association of American Geographers. pp.314-337.

PARREÑO CASTELLANO, J.M. (2006). La protección pública a los promotores privados de vivienda como instrumento de capitalización (1956-98). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles,* 42, pp.137-154.

PATEL, A., CROOKS, A. y KOIZUMI, N. (2012). Slumulation: An Agent-Based Modeling Approach to Slum Formations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 15.

PISSOURIOS, I.A. (2014). Top-down and Bottom-up Urban and Regional Planning: Towards a Framework for the Use of Planning Standards. *European Spatial Research and Policy,* 21, pp.83-99.

PLATA ROCHA, W., GOMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2009). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la CM a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG. *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana,* 4.

PLATA ROCHA, W., GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2010). Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la CM aplicando Métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. *Geofocus,* 10, pp.103-134.

PLATA ROCHA, W., GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2011). Simulation urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain. *Environment and Planning B,* 38, pp.1012-1031.

POLHILL, J.G. (2010). ODD Updated. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 13.

POLHILL, J.G., PARKER, D.C., BROWN, D.G. y GRIMM, V. (2008). Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 11.

PUMAIN, D. (2012). Multi-agent System Modelling for Urban Systems: The Series of SIMPOP Models. *En:* HEPPENSTALL, A.J., CROOKS, A.T., SEE, L.M. y BATTY, M. (eds.) *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Dordrecht: Springer Netherlands.

PUMAIN, D. y SANDERS, L. (2013). Theoretical principles in interurban simulation models: a comparison. *Environment and Planning A,* 45, pp.2243-2260.

QURESHI, M.E., HARRISON, S.R. y WEGENER, M.K. (1999). Validation of multicriteria analysis models. *Agricultural Systems,* 62, pp.105-116.

RAILSBACK, S.F. y GRIMM, V. (2009). *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*, Princeton University Press.

RAILSBACK, S.F., LYTINEN, S.L. y JACKSON, S.K. (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *Simulations,* 82, pp.609-623.

REBAUDO, F., CCEDIL, OIS, CRESPO, P., AMP, EACUTE, REZ, V., OACUTE, NICA, SILVAIN, J.-F. y DANGLES, O. (2011). Agent-Based Modeling of Human-Induced Spread of Invasive Species in Agricultural Landscapes: Insights from the Potato Moth in Ecuador. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation,* 14.

RÉBORA, A. (1993). Los planificadores urbanos ante el cambio. *EURE,* 57, pp.31-40.

RIO LAFUENTE, I.D. y RODRÍGUEZ MOYA, J. (2009). Áreas metropolitanas en transformación. Presente y futuro del Corredor del Henares en el área funcional madrileña. *Anales de Geografía de la UCM,* 29, pp.139-165.

ROBINSON, D.T., MURRAY-RUST, D., RIESER, V., MILICIC, V. y ROUNSEVELL, M.D.A. (2012). Modelling the impacts of land system dynamics on human well-being: Using an agent-based approach to cope with data limitations in Koper, Slovenia. *Computers, Environment and Urban Systems,* 36, pp.164-176.

RODRÍGUEZ ESPINOSA, V.M., AGUILERA BENAVENTE, F., GÓMEZ DELGADO, M., SALADO GARCÍA, M.J., LUCAS OLMO, L. y CASES MARTÍNEZ, A. (2015). Propuesta de Infraestructura Verde en un ámbito metropolitano. Aplicación al Corredor del Henares (Comunidad de Madrid-Guadalajara). XXIV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles. Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación, Zaragoza. AGE.

ROMERO, J. (2010). Construcción residencial y gobierno del territorio en España. De la burbuja especulativa a la recesión. Causas y consecuencias. *Cuadernos Geográficos,* 47, pp.17-46.

SAKODA, J.M. (1971). The Checkerboard Model of Social Interaction. *Journal of Mathematical Sociology,* 1, pp.119-132.

SANDERS, L., PUMAIN, D., MATHIAN, H., GHERIN-PACE, F. y BURA, S. (1997). SIMPOP: a multi-agents system for the study of urbanism. *Environment and Planning B,* 24, pp.287-305.

SANTÉ, L., 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,* 96, pp.108-122.

SANTOS PRECIADO, J.M. (2015). La cartografía catastral y su utilización en la desagregación de la población. Aplicación al análisis de la distribución espacial de la población en el municipio de Leganés (Madrid). *Estudios Geográficos, CSIC,* LXXVI, pp.309-333.

SANTOS PRECIADO, J.M., AZÁRATE LUXÁN, M.V., MATESANZ, D.C., GARCÍA LÁZARO, F.J. y MUGURUZA CAÑAS, C. (2012). Claves del crecimiento urbano actual. *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.* Madrid: RA-MA.

SANTOS PRECIADO, J.M., AZCÁRATE LUXÁN, M.V., COCERO MATESANZ, D., GARCÍA LÁZARO, F.J. y MUGURUZA CAÑAS, C. (2011). Los procedimientos de desagregación espacial de la población y su aplicación al análisis del modelo de la ciudad dispersa. El caso de las aglomeraciones urbanas de Madrid y Granada. *Geofocus - Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica,* 11, pp.91-117.

SCHELHORN, T., O'SULLIVAN, D., HAKLAY, M. y THURSTAIN-GOODWIN, M. (1999). STREETS: An agent-based pedestrian model. *CASA Working Paper Series,* Paper 9.

SERENKO, A. y DETLOR, B. (2002). Agent Toolkits: A General Overview of the Market and an Assessment of Instructor Satisfaction with Utilizing Toolkits in the Classroom.

SERRANO CAMBRONERO, M.M., GAGO GARCÍA, C. y ANTÓN BURGOS, F.J. (2002). *Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid*, Madrid, Comunidad de Madrid.

SHELLING, T.C. (1969). Models of Segregation. *American Economic Review*, 59, pp.488-493.

SHELLING, T.C. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, pp.143-189.

SIU. *Sistema de Información Urbana* [Online]. Disponible: http://visorsiu.fomento.es/siu/PortalSiu.html.

SKINNER, B.F. (1953). *Science and human behavior*, Simon and Schuster.

SMITH, M.J.D., GOODCHILD, M.F. y LONGLEY, P.A. (2009). *Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*, Leicester, Reino Unido, Matador.

SOUZA, L.C.G.D. (2005). *O ensino da psicologia social e suas representações. A formação do saber e o saber em formação.* PHd, UFRJ.

SUN, S., PARKER, D.C., HUANG, T., FILATOVA, T., ROBINSON, D.T., RIOLO, R.L., HUTCHINS, M. y BROWN, D.G. (2014). Market Impacts on Land-use Change: An Agent-based Experiment. *Annals of the Association of American Geographers*, 104.

TABERNERO, C., BRIONES, E. y CUADRADO, E. (2010). Cambios en la satisfacción residencial y el apego al lugar en función del tiempo de residencia. *Psyecology*, 1, pp.343-352.

TABERNERO, C., HERNÁNDEZ, B., CUADRADO, E., LUQUE, B. y PEREIRA, C.R. (2015). A multilevel perspective to explain recycling behaviour in communities. *Journal of Environmental Management*, 159, pp.192-201.

TEN BROEKE, G., VAN VOORN, G. y LIGTENBERG, A. (2016). Which Sensitivity Analysis Method Should I Use for My Agent-Based Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19.

THIELE, J.C., KURTH, W. y GRIMM, V. (2014). Facilitating Parameter Estimation and Sensitivity Analysis of Agent-Based Models: A Cookbook Using NetLogo and 'R'. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 17.

TOBIAS, R. y HOFMANN, C. (2004). Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7.

TOMLINSON, R.F. (1984). Keynote address: geographical information systems - a new frontier. International Symposium on Spatian Data Handling, Zurich. pp.2-3.

TORRENS, P.M. (2006). Geosimulation and its Application to Urban Growth Modeling. *En:* PORTUGALI, J. (ed.) *Complex Artificial Environments.* London: Springer-Verlag.

TORRENS, P.M. (2007). Geospatial exoskeletons for automata in agent-based models. *En:* NORTH, M., MACAL, C. y SALLACH, D. (eds.) *Agent 2007: Complex Interaction and Social Emergence.* Argonne, IL: Argonne National Labs and University of Chicago.

TORRENS, P.M. (2012). Moving agent-pedestrians through space and time. *Annals of the Association of American Geographers*, 102, pp.35-66.

TORRENS, P.M. y BENENSON, I. (2005). Geographic Automata Systems. *International Journal of Goegraphical Informations Science*, 19, pp.385-412.

TRIANTAKONSTANTIS, D. y MOUNTRAKIS, G. (2012). Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 4, pp.555-587.

TRUONG, M.T., AMBLARD, F., GAUDOU, B. y SIBERTIN-BLANC, C. (2014). To Calibrate & Validate an Agent-based Simulation Model - An Application of the Combination Framework of BI Solution & Multi-agent Platform. 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2014), Angers, France. pp.172-183.

VALENZUELA, L.M. y SORIA, J.A. (2011). Observatorios territoriales y urbanos en Europa: ¿entidades pasivas o instrumentos operativos para la planificación? *Ciudad y Territorio. Estudios territoriales*, XLIII, pp.243-260.

VALENZUELA RUBIO, M. (2010). La planificación territorial de la Región Metropolitana de Madrid. Una asignatura pendiente. *Cuadernos Geográficos*, 47, pp.97-129.

VALERA, S. y POL, E. (1994). El concepto de identidad social urbana: una aproximación entre la Psicología Social y la Psicología Ambiental. *Anuario de Psicología*, 62, pp.5-24.

VAN DELDEN, H., DÍAZ-PACHECO, J., SHI, I. y VAN VLIET, J. (2012). Calibration of cellular autómata based land use models: lessons learnt from practical experience. *En:* PINTO, N.N., DOURADO, J. y NATÁLIO, A., eds., Oporto. Department of Civil Engineering, University of Coimbra, pp.295-297.

VILLAMOR, G.B., TROITZSCH, K.G. y VAN NOORDWIJK, M. (2013). Validating human decision making in an agent-based land-use model. *20th International Congress on Modelling and Simulation (Modsim2013)*, pp.2110-2116.

VIVIENDA, M.D. (2010). *Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español*.

WAGNER, D.F. (1997). Cellular automata and geographic information systems. *Environment and Planning B*, 24, pp.219-234.

WHITE, R. (1998). Cities and Cellular Automata. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, pp.111-125.

WHITE, R., ENGELEN, G. y ULJEE, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high resolution modeling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B*, 24, pp.323-343.

WHITE, R., ENGELEN, G. y ULJEE, I. (2015). *Modeling Cities and Regions As Complex Systems: From Theory to Planning Applications*, MIT Press.

WILENSKY, U. (1999). NetLogo. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.

WOOLDRIDGE, M. y JENNINGS, N.R. (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10, pp.115-152.

El presente trabajo debe ser citado como:

CANTERGIANI, C.C. (2017) ***Desarrollo de un prototipo de Modelo Basado en Agentes para la simulación del crecimiento urbano.*** **Tesis doctoral presentada para la obtención del grado de doctor en el Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente (Universidad de Alcalá).**

ANEXOS

ANEXO 1.

PROTOCOLO ODD

Conforme mencionado en el bloque introductorio de esta investigación, el Protocolo ODD fue publicado en 2006 para normalizar las descripciones de Modelos Basados en Agentes publicados (Grimm *et al.*, 2006). El esquema se ha actualizado más de una vez, considerando la incorporación de nuevos conceptos y elementos al listado original, aunque aquí se utilizará la versión original, dada la complejidad añadida de las nuevas versiones (Polhill, 2010, Müller *et al.*, 2013), y que no cambia sustancialmente la descripción del modelo AMEBA. En cualquier caso, el objetivo principal es hacer dichas descripciones más comprensibles y completas y así reducir las críticas que habitualmente reciben los desarrolladores de estos modelos por considerarlos irreproducibles en la mayoría de los casos.

La estructura del Protocolo ODD original se divide en tres apartados principales: Vista General, Conceptos de Diseño y Detalles. El primero describe cuestiones generales del modelo y se despliega en tres secciones: su propósito, definición de variables y escala, y el proceso de visualización y cronograma de desarrollo. El apartado de Conceptos de Diseño se describe en una sección única, donde se presenta una serie de conceptos que se podrían discutir en el modelo, como por ejemplo: emergencia, adaptación, predicción, interacciones, entre otros. Por último, la parte de Detalles también se descompone en tres: la forma de inicialización, la información de entrada disponible y los posibles submodelos (Figura A.1).

Revisión	Propósito
	Escalas y variables de estado
	Revisión del proceso e itinerario
Conceptos de diseño	Conceptos de diseño
Detalles	Inicialización
	Entradas
	Submodelos

Fuente: Traducido de (Grimm *et al.*, 2006).

Figura A.1. Contenido del Protocolo ODD.

A continuación se presenta el cumplimiento del Protocolo ODD para el modelo integrado presentado en el Capítulo 7 de este trabajo. Se ha optado por poner también en evidencia las preguntas que guían el cumplimiento de las diferentes partes de este protocolo, dispuestas por investigadores del Laboratorio de Simulación de Dinámicas Socio-Históricas de la Universidad de Barcelona[30], y que en algunos casos pueden considerarse de difícil interpretación por sus términos rebuscados y sus significados complejos. Cabe destacar que ni todas las preguntas pueden, o tienen que ser contestadas dado que pueden tratar de objetivos, niveles y detalles no tan amplios como los descritos en la estructura del protocolo.

[30] http://sct.uab.cat/lsds/es/content/protocolo-odd (último acceso: abril/2017)

1. PROPÓSITO

¿Cuál es el propósito del modelo?
¿Con qué objetivo se ha desarrollado?
¿Para qué se va a utilizar?

El prototipo es un Modelo Basado en Agentes desarrollado para simular el proceso de crecimiento urbano a escala supramunicipal, considerando el comportamiento integrado de tres agentes: planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Se trata de un modelo explícitamente espacial, por lo que prácticamente todas las variables incluidas se pueden distribuir a lo largo del territorio. El ensayo se realizó con los datos disponibles para un conjunto de 18 municipios que componen el Corredor del Henares (Madrid). El modelo está diseñado para evaluar su utilidad como una herramienta de apoyo a la planificación urbana y la ordenación del territorio.

2. ENTIDADES, VARIABLES DE ESTADO Y ESCALAS

¿Qué tipo de entidades conforman el modelo (agentes/individuos, unidades espaciales, medioambiente, colectividades)?
¿Qué variables de estado o atributos internos caracterizan a tales entidades?
¿En qué unidades se expresaron tales variables o atributos?
¿Cuál es la extensión espacial y temporal del modelo?
¿Con qué nivel de precisión espacial y temporal se realizará la simulación?

ENTIDADES (AGENTES Y ENTORNO)

En un modelo como el que se presenta, sería posible considerar como agentes todos los elementos que presentasen determinada característica dentro del mismo sistema, no obstante, para esta aplicación, se optó por hacer una ligera diferenciación entre lo que se consideran agentes y entorno. Por lo tanto, se consideran `agentes´ aquellos actores humanos que presentan un comportamiento que lleva a la toma de decisión, y que además influyen directamente en el crecimiento urbano del área de estudio: los planificadores urbanos, los promotores inmobiliarios y la población. Cada uno de ellos presenta un comportamiento diferente, y actúa sobre el mismo territorio, aunque sus objetivos difieren considerablemente, tanto en escalas temporal como espacial, como se muestra a continuación:

- *Planificadores urbanos*: actúan sobre el área de estudio en un ámbito general, y pretenden cambiar la zonificación del suelo asignando nuevas áreas urbanizables.
- *Promotores inmobiliarios*: intervienen en áreas más reducidas y tienen como objetivo encontrar zonas disponibles y con características de interés para ampliar el parque de viviendas y construir edificaciones de tres diferentes estándares.

- *Población*: se dividen en tres grupos según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo. Es el único de los agentes que está distribuido físicamente a lo largo del área de estudio, asignados a las edificaciones residenciales correspondientes. Cabe resaltar que la población no se representa individualmente, sino en pequeñas agrupaciones que pueden compararse a los hogares.

Las otras entidades que están presentes en el modelo integrado no toman decisiones y por ello no son considerados agentes, y componen el grupo al que llamamos elementos del *entorno*. Dos de ellos cambian de estado a lo largo de su ejecución conforme actúen uno u otro agente, como es el caso de la zonificación del suelo o las edificaciones. Los demás, son elementos que componen el sistema, y que son llevados en consideración a la hora de tomar una decisión, como es el caso de los espacios protegidos, equipamientos públicos, redes de comunicación viaria, entre otros. Un listado de estas entidades se presenta en la tabla A.1 a continuación. Aunque no explícitamente, el MI considera todas las variables (tablas 4.1, 5.1 y 6.2) utilizadas en los submodelos independientes.

Entidad	*Estado / Atributo*	*Papel en el modelo*
Zonificación legal del suelo	Capa espacial clasificada según el suelo sea zonificado como: urbano, urbanizable, sistemas generales y otros	Es una capa espacial de partida que cambia a lo largo de la ejecución del modelo según actúen los planificadores urbanos, que convierten superficies con clases diferente a la urbana o urbanizable, en nuevas urbanizables
Edificación	Capa espacial que indicación la existencia o no de vivienda en cada pixel. En caso afirmativo, presenta atributo asociado, indicando el número de viviendas y su tipología	Es la base de referencia para distribución de la población en el modelo. Esta capa se amplía según actúen los promotores inmobiliarios, que tienen como objetivo promover el desarrollo de más viviendas
Población	Es distribuida espacialmente en las viviendas existentes, cuya su tipología es directamente transferida a la población, diferenciando su estatus en el modelo en población con renta alta, media o baja	Población actúa de forma diferenciada según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo, eligiendo viviendas según preferencia espacial, capacidad, ocupación, característica de la población asentada, etc.
Restricción ambiental	Distribución espacial indicando tres opciones de áreas de restricción: base, con RN2000 y con IV (ver figura 4.2)	Delimita espacialmente el ámbito de actuación del agente planificador urbano, restringiendo las zonas donde no es posible urbanizar por restricciones físicas o legales

Tabla A.1. Descripción de variables directas consideradas para la ejecución del Modelo Integrado.

ESCALAS (EXTENSIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL)

El área de estudio en la cual se realizó el ensayo del modelo es el Corredor del Henares, que cubre una superficie de 624 km^2 (al representarla en pixeles de 50x50 metros, equivale a un panel de visualización en *NetLogo* de 800x800 unidades). Destacamos que la extensión espacial de las variables presentadas en la tabla A.1 coincide con la totalidad del área de estudio y son introducidas para una fecha concreta en el arranque del modelo.

Para la ejecución, adoptamos una unidad-base correspondiente a cuatro meses, considerada en el submodelo de población. El submodelo de promotores inmobiliarios se ejecuta anualmente, correspondiente a tres ciclos del submodelo de población. Por último, se considera que el submodelo de planificadores urbanos se activa a un ritmo más lento, es decir, en intervalos de 5 años. Sin embargo, estas referencias se definieron con el objetivo único de contextualizar el modelo en una situación más realista y más fácilmente entendible por los usuarios externos, dado que las unidades podrían representar otros intervalos de tiempo según los parámetros definidos por el usuario en la interfaz y, principalmente, en función del objetivo y alcance esperado en la simulación.

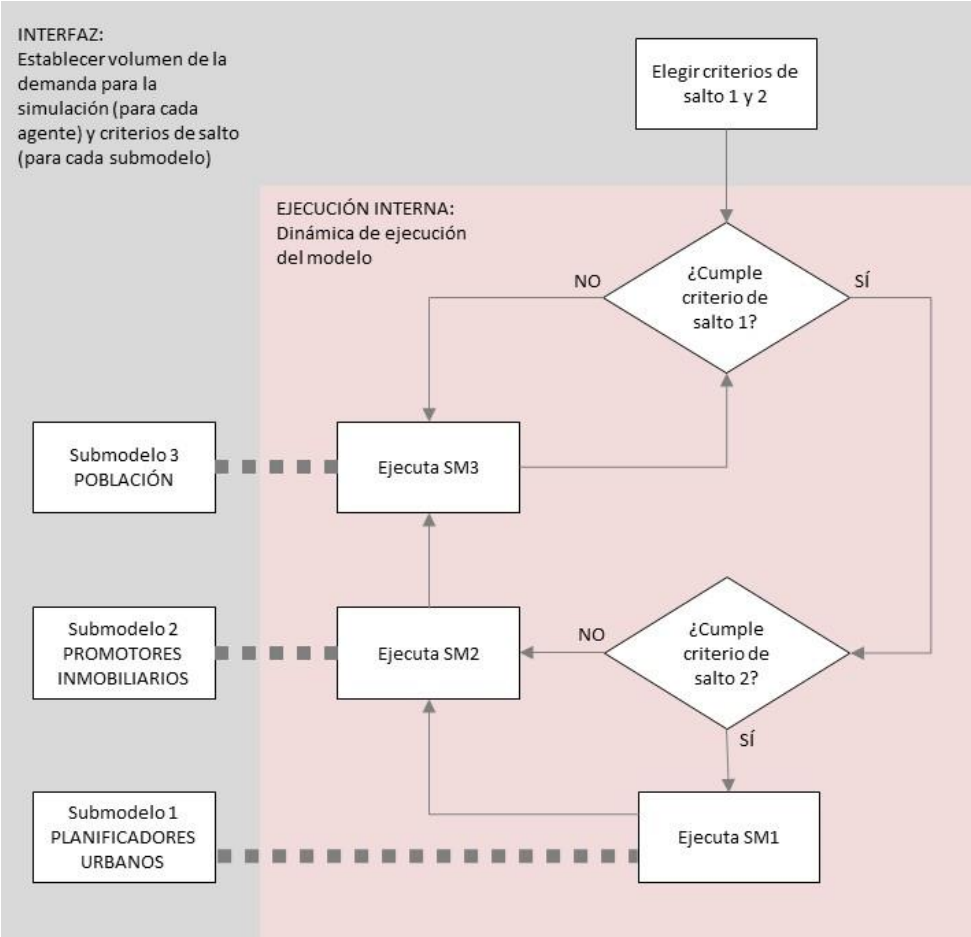
3. RESUMEN DEL PROCESO Y SU PLANIFICACIÓN

¿Qué entidad hace qué?
¿En qué orden se ejecutan los diferentes procesos?
¿En qué orden ejecutan distintas entidades un mismo proceso?
¿Cómo se modeliza el tiempo, mediante saltos discretos o como un continuo temporal en el que suceden tanto procesos continuos como sucesos discretos?

El prototipo presentado considera tres submodelos independientes e integrados. El primer simula la asignación de nuevo suelo urbanizable por los planificadores urbanos, el segundo, la ampliación del parque de viviendas por los promotores inmobiliarios, y el tercero, el cambio de residencia por la población. En este sentido, el crecimiento urbano es considerado la suma de dos procesos: la transformación territorial (primer y segundo submodelo) y la ocupación residencial (tercer submodelo).

El modelo parte de una situación donde hay una zonificación del suelo vigente, una distribución de viviendas con diferentes cantidades de población asignada. A partir de este punto inicial, el modelo hace consultas a los umbrales (máxima superficie urbanizable ocupada por edificación y máximo número de edificaciones totalmente ocupadas) definidos por el usuario en su interfaz. Estos dos parámetros, a los que llamamos ´saltos`, funcionan como sensores, y conducen a la ejecución primeramente de aquél submodelo que cumpla con estos criterios. Seguidamente, define indirectamente el orden de ejecución y las posibles repeticiones para que alcancen su objetivo, que es establecido por el usuario en la interfaz del modelo a partir del volumen de superficie a clasificarse como urbanizable, número de nuevas viviendas y crecimiento

de población. Por lo tanto, hay algunos procesos que dependen de variables externas, es decir, aquellas definidas por el usuario en la interfaz del modelo, y otros que dependen de variables internas, como aquellos porcentajes que serán consultados continuamente para verificar el cumplimiento de los criterios de salto. Es esquema que muestra esta secuencia se puede apreciar en la figura A.2 a seguir.



Fuente: Elaboración propia.

Figura A.2. Arquitectura del modelo integrado según proceso externo (nivel usuario) o interno.

4. CONCEPTOS DE DISEÑO

4.1. Principios fundamentales:

¿Qué conceptos, teorías, hipótesis teóricas subyacen en el diseño del modelo?
¿Qué estrategias de modelado subyacen en el mismo diseño?
¿Qué relación guardan estas asunciones con el propósito del estudio?
¿Cómo se tienen en cuenta en la modelización?
¿Se utilizan en el nivel de los submodelos (como hipótesis micro-fundamentales) o en el nivel del sistema (como teorías macro-dinámicas)?
¿Proporcionará el modelo indicios respecto a estos principios fundamentales, como por ejemplo su alcance, su utilidad en escenarios reales, su validación o indicaciones para su modificación?
¿Utiliza el modelo teorías consolidadas o novedosas?

Modelar el crecimiento urbano es considerado un reto, ya que se trata de un fenómeno muy complejo donde interactúan elementos de distintas dimensiones, como la ambiental, la económica, social, cultural o institucional. Por ello, su simulación en el marco de un MBA resulta ser una contribución importante, dado que considera el comportamiento de agentes que actúan directamente en el cambio de configuración del territorio. Se trata de un aporte aún más significativo al suponer que puede considerarlo un apoyo fundamental a las tareas de planificación urbana a nivel supramunicipal, teniendo en cuenta que en cuestiones urbanas los MBA son mayoritariamente construido a nivel local. En este sentido, todos los elementos del modelo tienen características similares, y cubren la totalidad del área de estudio, subrayando la escala supramunicipal del modelo.

Para la escala propuesta, los tres agentes presentados entendemos representan los principales inductores de la expansión urbana, cada uno actuando en su ámbito particular, pero interfiriendo en el comportamiento de los demás. Cabe resaltar que en esta etapa no se plantean introducir condiciones adversas a las planteadas inicialmente, como podría ser el incumplimiento de la zonificación, ocupación de áreas protegidas, comportamientos antiéticos por parte del planificador o promotor inmobiliario u otras interesantes de estudiar a más largo plazo.

El modelo integrado está estructurado de forma que los parámetros de entrada puedan partir con diferentes pesos, permitiendo al usuario crear diferentes escenarios de futuro. Esta misma capacidad consiste en una buena herramienta de validación, es decir, que en este caso los propios escenarios permiten comprobar el correcto funcionamiento del modelo, por lo que se los puede considerar un análisis de sensibilidad.

4.2. Emergencia:

¿Qué resultados son modelados como resultados emergentes de rasgos adaptativos o de comportamiento de los individuos?

¿Qué resultados del modelo se espera que varíen de forma compleja y tal vez imprevisible ante un cambio de las características particulares de individuos o entorno?

¿Qué resultados del modelo que están ya impuestos por las reglas y por tanto dependen menos de los comportamientos de los individuos?

Todos los resultados son, de cierta forma, emergentes. Los resultados parciales resultantes de la ejecución de los submodelos independientes se generan de acuerdo al comportamiento de cada uno, y excepto el de planificadores urbanos que tiene un carácter más determinístico, los demás generan variaciones entre los productos de la simulación. También es emergente el orden de actuación de cada agente, que puede ejecutarse una o repetidas veces antes que arranque el siguiente. Este proceso se define de acuerdo a los criterios de salto definidos por el usuario, pero no es posible predecir su evolución de antemano. El cambio en cualquier de los parámetros disponibles puede llevar a la producción de resultados y dinámica totalmente adversos.

4.3. Adaptación:

¿Qué rasgos adaptativos tienen los individuos?

¿Qué reglas tienen para tomar decisiones o modificar su comportamiento en respuesta a cambios en sí mismos o en el entorno?

¿Estos rasgos intentan incrementar algún tipo de indicador de éxito individual relacionado con sus objetivos (ej.: "desplázate a la posición que disponga de una productividad mayor", asumiendo que productividad es un indicador de éxito)?

¿O simplemente los individuos reproducen ciertos comportamientos que se asumen implícitamente como conducentes al éxito o la adaptación (ej.: "desplázate hacia la derecha un 70% del tiempo")?

No se ha planteado en este modelo ningún proceso de adaptación.

4.4. Objetivos:

¿Qué objetivos persiguen los individuos mediante los procesos de adaptación que rigen sus comportamientos?

¿Cómo se pueden medir tales objetivos, así como su grado de cumplimiento?

¿Qué criterios usan los agentes individuales para evaluar alternativas cuando tienen que tomar decisiones?

El objetivo de cada agente está definido al principio del proceso (ampliar la superficie de áreas urbanizables en "x", crear "x" nuevas edificaciones residenciales, considerar un crecimiento demográfico de "x"), y no cambia tras haber sido cuantificado por el usuario o la simulación haya sido puesta en marcha. A lo largo de la ejecución, el modelo cambia internamente una serie de valores de diferentes variables, a las que algunas se presentan en cuadros informativos en la interfaz (por ejemplo, el número de edificación, cantidad de población insatisfecha, número de

repeticiones de cada submodelo, porcentajes actuales correspondientes a los criterios de salto). Dichos valores se actualizan y son continuamente consultados por los agentes a lo largo de la ejecución para determinar su comportamiento en función del objetivo que quiere alcanzar.

No se plantean en este modelo alternativas para la toma de decisión.

4.5. Aprendizaje:

¿Cambian los rasgos adaptativos a lo largo del tiempo como consecuencia de la experiencia?
¿Cómo se dan tales cambios?
¿Se trata de cambios conscientes, incluso planificados, o son simplemente respuestas a un entorno en evolución?
¿Se dan procesos de co-evolución por influencia mutua entre características individuales y del entorno?

El presente modelo no tiene en consideración este aspecto, es decir, los agentes no tienen la capacidad de aprender a partir de sus acciones previas.

4.6. Predicción:

¿Cómo predice un agente las condiciones futuras que experimentará?
¿Cómo influyen tales predicciones sobre los procesos de adaptación y de aprendizaje?
¿Qué elementos, propios y del entorno, utiliza un agente individual para realizar sus predicciones?
¿Qué modelos internos (razonamiento) utilizan los agentes para estimar sus condiciones futuras?
¿Qué modelos utilizan para estimar las consecuencias futuras de sus comportamientos?
¿Qué supuestos tácitos implican tales modelos de razonamiento y racionalidad?

En este modelo, no se considera la predicción de condiciones futuras por parte de los agentes. El cambio de estado de las variables presentes en el modelo proviene de la alteración de una situación inducida por factores preestablecidos en su presente, que no son predecibles. En el presente caso, la previsión cuantitativa del cambio a producirse es directamente introducida por el usuario en la definición de los parámetros de entrada, y es respetada y considerada por cada agente individualmente.

4.7. Percepción:

¿Qué variables de estado, internas o del entorno, se asume que perciben los agentes?
¿Qué modelo de medida usan los agentes para tal percepción?
¿Qué otros agentes o entidades son percibidas, y en concreto mediante qué atributos?
¿Mantienen los agentes una memoria o mapa a largo plazo de sus percepciones?
¿Cuál es el alcance de las señales que un agente puede percibir, local o global?
¿Si la percepción es a través de una red social, su estructura es impuesta o emergente de la simulación?
¿Los mecanismos mediante los que los agentes obtienen información están modelados explícitamente, o se asumen como dados?

Los agentes de este modelo perciben su entorno de diferentes formas. Se supone que los planificadores urbanos conocen la realidad completa del territorio, es decir, actúan en función de variables que abarcan la totalidad de la extensión del área de estudio de forma determinística. Los promotores inmobiliarios, a su vez, sólo tienen conocimiento de un área reducida, donde controlan únicamente el conjunto de variables allí presentes, y elegir aquellas áreas que coincidan con su interés. Por último, la población percibe un entorno bastante más restricto, también definido en la interfaz, para elegir la mejor entre las viviendas disponibles.

El modelo, al estar integrado, permite que el agente tenga información sobre las actualizaciones resultantes del comportamiento de los demás, es decir, los promotores inmobiliarios consideran las nuevas áreas urbanizables creadas por los planificadores urbanos, y la población conoce de antemano la ubicación y ocupación de nuevas viviendas.

4.8. Interacción:

¿Qué tipos de interacciones se asumen como relevantes entre los agentes?
¿Se trata de interacciones directas, en las que los encuentros entre agentes influyen sobre los mismos?
¿Hay interacciones indirectas, como en caso de competir por un recurso intermedio?
¿Si las interacciones implican comunicación, cómo se han modelado tales procesos comunicativos?

En este modelo las interacciones existentes entre los tres agentes son indirectas. Los resultados independientes de cada submodelo sirven como dato de entrada para que actúe el siguiente agente, induciendo a una ampliación de las posibles alternativas disponibles, seguida de un consecuente cambio de comportamiento.

En el caso de considerar la expulsión de agentes en el submodelo de población, experimentan internamente un mayor grado de interacción, ya que en algún caso pasan a tomar la decisión de ocupar una vivienda tras evaluar sus prioridades y preferencias, así como el nivel de vulnerabilidad de los demás.

4.9. Aleatoriedad:

¿Qué procesos se han modelado asumiendo que son, total o parcialmente, aleatorios?
¿Se utiliza la aleatoriedad para generar variabilidad en procesos para los que no se considera importante modelizar sus causas?
¿Se utiliza aleatoriedad para generar sucesos o comportamientos que ocurren con una frecuencia específica conocida?

El prototipo intencionalmente no considera aleatoriedad en las acciones de los planificadores urbanos, ya que se trata de un modelo determinístico. Sin embargo, los modelos de promotores inmobiliarios y de población introducen cierto grado aleatoriedad al considerar en su proceso la atención únicamente en una zona de análisis, seleccionada internamente y de forma aleatoria en cualquier posición del área de estudio.

Concretamente en el submodelo de población existe internamente una variable inicial que establece su poder adquisitivo de acuerdo al status de la vivienda a la cual está asignada. Al ejecutarlo, hay un porcentaje que cambia este estado de forma también aleatoria, para generar el conflicto y su consecuente insatisfacción e interés por cambiarse de residencia. Al ser de esta forma, a cada ejecución pueden emerger resultados diferentes.

4.10. Colectivos:

¿Los individuos forman o pertenecen a agregaciones que influyen y son influidas por los mismos individuos?
¿Cómo se representan tales colectividades?
¿Tales colectivos son una propiedad emergente del comportamiento de los individuos?
¿Son los colectivos simplemente definiciones del modelador, es decir, conjuntos de entidades con sus propios atributos y comportamientos?

La población es el único agente de este modelo que se podría considerar colectivos. Se dividen en tres grupos dependiendo de su poder adquisitivo. Esta clasificación se establece a principio de la simulación y puede variar de acuerdo al tiempo de asentamiento en una misma vivienda, que al alcanzar un límite preestablecido, se adaptan e igualan su status económico.

La población influye una a la otra en el sentido de que la ocupación de un grupo de viviendas puede llevar a alcanzar su capacidad máxima, por lo que se excluirían de las opciones viables de la siguiente población para buscar una vivienda disponible. Es cierto que la población se conecta e integra de tal forma que, en algunos casos, es posible ocupar una edificación inicialmente sin disponibilidad, siempre que se permita, en función de la combinación de características de la población residente, su expulsión[31].

4.11. Observación:

¿Qué datos se generan y recopilan a partir de la simulación a efectos de análisis?
¿Cómo son recopilados tales datos, y en qué momento o momentos?
¿Se utiliza la totalidad de los datos generados, o sólo una muestra a imitación de lo que sucede habitualmente en un estudio empírico?

Los resultados se resumen en tres capas espaciales, además de la información del gráfico que indica el ritmo de ejecución de los submodelos. Conjuntamente, estos productos permiten evaluar cómo se ha producido el proceso de expansión y ocupación urbanas, así como entender la relación existente entre las acciones de los tres agentes. Tras el término de la ejecución del

[31] Este proceso se realiza internamente en el modelo integrado, y explícitamente en el submodelo de población, cuyo proceso se explica en detalle en el capítulo 6.

modelo (que puede ser interrumpido cuando convenga), es posible generar las nuevas capas referentes a la clasificación del suelo, distribución de viviendas y su ocupación por la población.

5. INICIALIZACIÓN

¿Cuál es el estado inicial del modelo, esto es, en el momento t=0 de la ejecución de la simulación?

¿Cuantas entidades forman la sociedad virtual inicialmente, y qué valores, exactos o como distribución aleatoria, tienen las variables de estado de las entidades?

¿Es siempre idéntica o puede variar entre diferentes ejecuciones de la simulación?

¿La inicialización corresponde a un estado del mundo real, esto es, está empíricamente calibrada (data-driven), o los valores son arbitrarios?

¿Si se trata de una situación inicial experimental, cómo corresponden los valores arbitrarios a hipótesis concretas a contrastar?

La primera ejecución del modelo arranca con la distribución inicial del suelo clasificado, de viviendas existentes con información de status y capacidad, y de población asignada a cada una. Esta información se basa en datos reales para el Corredor del Henares, por lo que la cantidad de agentes al principio es siempre la misma. Sin embargo, para la población, hay una serie de características que las definen, y que son matizadas antes de empezar la ejecución, aunque este proceso en el modelo integrado se encuentra internalizado.

Esta misma configuración vuelve a cargarse siempre que el usuario opte por reiniciar el modelo; caso contrario, la simulación parte de la última distribución y da continuidad al proceso de simulación.

Cabe destacar que es también en su inicialización que el prototipo permite al usuario especificar directamente en la interfaz el volumen del cambio a simular por cada agente, así como definir los criterios para el salto entre submodelos.

6. DATOS DE ENTRADA

¿Utiliza el modelo datos de fuentes externas (ficheros de datos, u otros modelos) para representar procesos que varían en el tiempo durante la simulación?

El modelo cuenta con una cantidad importante de datos obtenidos de fuentes externas, por ejemplo, la red de carreteras, equipamientos públicos, mapa de productividad del suelo, distribución de viviendas con información de estatus, entre otros. Estos datos se encuentran debidamente incorporados en la programación del modelo y no sufren cambios en el espacio o en el tiempo a lo largo de su ejecución. El prototipo no cuenta, en esta etapa, con variables externas cambiables con el tiempo, es decir, que se carguen o modifiquen en momentos puntuales de la ejecución.

7. SUBMODELOS

¿Qué modelos representan, con detalle, los procesos listados en el apartado (3) de procesos y planificación?

¿Cuáles son los parámetros, dimensiones y valores de referencia de cada modelo?

¿Qué ecuaciones o algoritmos permiten representar cada modelo?

¿Cómo se han diseñado o seleccionado tales modelos?

¿De qué otros sistemas se han "extraído" o "inspirado" los modelos para su uso actual?

¿Cómo se justifica la verificación y la validez de cada modelo utilizado?

¿Qué referencias y literatura relevante se puede aportar para cada submodelo, respecto a su implementación independiente, contraste, calibración y análisis?

Los tres submodelos que componen el modelo integrado son los de planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población, que funcionan de forma independiente. Dichos submodelos se ejecutan según los parámetros especificados internamente en la programación del modelo integrado. Los valores de algunos parámetros que en los submodelos independientes permitían variación, fueron fijados con el objetivo de minimizar la complejidad en su configuración inicial. Esta solución nos permitió cumplir el objetivo de este prototipo, que es poder simular el sistema de crecimiento urbano, comprendido por las acciones integradas de los planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población[32].

[32] Para más referencia sobre las características particulares de los submodelos, se recomienda leer los Capítulos 4, 5 y 6 de esta tesis donde son presentados en detalle.

ANEXO 2.

SINTAXIS DEL MODELO INTEGRADO

(PROGRAMACIÓN EN NETLOGO)

Código parcial de la programación em *NetLogo* del modelo integrado[33]:

```
extensions [ gis ]
globals [(...)]
breed [(...)]
patches-own [(...)]
personas-own [(...)]

to setup
  __clear-all-and-reset-ticks

;PARAMETROS FIJOS SUBMODELO 1
set k2  1                    ;Preferencias espaciales  distancia a peligro  0.0 a 1.0  coef
set k3  0.5                  ;distancia a urbano  0.0 a 1.0  coef
set k4  0                    ;distancia a carreteras  0.0 a 1.0  coef
set k5  0                    ;distancia a equip. salud y educación  0.0 a 1.0  coef
set k1_alta  0               ;Productividad agrícola  alta  0 a 100  %
set k1_media  10             ;media  0 a 100  %
set k1_baja  90              ;baja  0 a 100  %
;set terreno_urb  12000     ;Terreno urbano    400 a 40.000  pixeles VARIABLE!!!!!!!!!
;PARAMETROS FIJOS SUBMODELO 2
;set edif-a-construir  3500 ;Edificación a construir    100 a 3.000  número VARIABLE!!!!!!!!!
set coef_cara  40            ;Proporción según precio  cara  0 a 100  %
set coef_media  90           ;media  0 a 100  %
set coef_barata  70          ;barata  0 a 100  %
set radio-de-busqueda  10 ;radio de búsqueda    1 a 30  pixeles
set k1c  50                  ;preferencias espaciales  distancia a carreteras - ALTO  0.0 a 1.0  coef
set k2c  30                  ;distancia a urbano - ALTO  0.0 a 1.0  coef
set k3c  20                  ;distancia a transporte público - ALTO  0.0 a 1.0  coef
set k1m  33                  ;distancia a carreteras - MEDIO  0.0 a 1.0  coef
set k2m  33                  ;distancia a urbano - MEDIO  0.0 a 1.0  coef
set k3m  33                  ;distancia a transporte público - MEDIO  0.0 a 1.0  coef
set k1b  20                  ;distancia a carreteras - BAJO  0.0 a 1.0  coef
set k2b  40                  ;distancia a urbano - BAJO  0.0 a 1.0  coef
set k3b  40                  ;distancia a transporte público - BAJO  0.0 a 1.0  coef
;PARAMETROS FIJOS SUBMODELO 3
;crecim_pob                  ;3  ;Crecimiento de la población  0 a 20  % VARIABLE!!!!!!!!!
set alta-renta 25            ;máx. crec. renta alta  0 a 100  %
set media-renta 50           ;máx. crec. renta media  0 a 100  %
set baja-renta 25            ;máx. crec. renta baja  0 a 100  %
set cambio_tipo_pob 10    ;cambio inicial de tipología de la pob  0 a 15  %
set radio-de-busqueda-m3 15      ;media  0 a 30 pixeles
; mismo nombre del modelo 2
set nivaguante 7             ;número de veces, contador 0 a 10
;set num-nueva-edif 50     ;número absoluto  0 a 100

;carga datasets y patches submodelo 1, 2, 3 (...)

ask patches with [area_estudio > 0][
  if npob > capmax [set capmax npob]  ;para hacer coherentes los datos, por si la poblacion sobrepasa la capacidad
  if (npob > 0) and (npob < 100) [set npob 100] ;si la población es menor que 100 y no es cero, que consideren 100 para que al
dividir haya por lo menos un agente
  if (capmax > 0) and (capmax < 100) [set capmax 100] ;si la población es menor que 100 y no es cero, que consideren 100 para que
al dividir haya por lo menos un agente
  set pcolor 49  ]
ask patches with [(area_estudio > 0) and ((clasif2003_v03 = 1) or (clasif2003_v03 = 2))][set pcolor 7] ;gris claro, clasificado como
urbano o urbanizable
ask patches with [g3_nviv >= 1][set pcolor 4] ;gris oscuro, pixeles donde hay vivienda
ask patches with [area_estudio <= 0][set pcolor white]

ask patches [
  set nviv g3_nviv                    ;el número de vivienda va cambiando, el g3 es el inicial y no cambia
  set nuevaviv 0
  set npob    round (npob / 100)      ;para hacer manejable la cantidad de  tortugas
  set npobini npob
  set capmax  round (capmax / 100)   ;para hacer manejable la cantidad de  tortugas
  set disponible 0
  set personavpas 0
```

---

[33] (...) indica corte en el código

```
  set muertos 0
  set expulso 0
(...) ]

ask patches [
   set util 0
   set prioridad -9999
   set prioridad1 0]

crea-personas
nueva_edif
set modelo 0
setup-plot1
display-municipios

set num_repeticiones_SM2 0  ;es un contador para saltar del SM2 al SM1
set num_repeticiones_SM3 0  ;es un contador para saltar del SM3 al SM2
end

(...)


to ejecuta_modelo_integrado
let ciclico? false
while [not ciclico?] [

        if ( Salto_a_SM2 = "Por número de ejecuciones" ) and (num_repeticiones_SM3 >= Num_ejec_SM3) [ ;if1
          set num_repeticiones_SM3 0
          show (word "a ejecutar SM2 " date-and-time)
          modelo2
          show (word "SM2 ejecutado " date-and-time)
          set num_repeticiones_SM2 num_repeticiones_SM2 + 1

          if ( Salto_a_SM1 = "Por número de ejecuciones" ) and (num_repeticiones_SM2 >= Num_ejec_SM2) [ ;if3
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
          ] ;finif3

          if ( Salto_a_SM1 = "Por % de área urbanizable edificada" ) and ( Porcentaje-AUbz-edificada <= ( ((count patches with
[(area_estudio > 0) and ((nueva_clas = 2) or (clasif2003_v03 = 2)) and (nviv > 0)]) * 100) / (count patches with [(area_estudio > 0)
and (nueva_clas = 2)]) ) ) [ ;if4
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
          ] ;finif4

        ] ;finif1

        if ( Salto_a_SM2 = "Por % de residencia libre" ) and ( Porcentaje-Edif-ocupada <= ( ((count patches with [(area_estudio > 0)
and (nviv >= 1) and (npob >= capmax)]) * 100) / (count patches with [(area_estudio > 0) and (nviv >= 1)]))) [ ;if2
          set num_repeticiones_SM3 0
          show (word "a ejecutar SM2 " date-and-time)
          modelo2
          show (word "SM2 ejecutado " date-and-time)
          set num_repeticiones_SM2 num_repeticiones_SM2 + 1

          if ( Salto_a_SM1 = "Por número de ejecuciones" ) and (num_repeticiones_SM2 >= Num_ejec_SM2) [ ;if3
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
          ] ;finif3

          if ( Salto_a_SM1 = "Por % de área urbanizable edificada" ) and ( Porcentaje-AUbz-edificada <= ( ((count patches with
[(area_estudio > 0) and ((nueva_clas = 2) or (clasif2003_v03 = 2)) and (nviv > 0)]) * 100) / (count patches with [(area_estudio > 0)
and (nueva_clas = 2)]) ) ) [;if4
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
          ] ;finif4
```

```
        ] ;finif2

        if ( Salto_a_SM1 = "Por número de ejecuciones" ) and (num_repeticiones_SM2 >= Num_ejec_SM2) [ ;if3
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
        ] ;finif3

        if ( Salto_a_SM1 = "Por % de área urbanizable edificada" ) and ( Porcentaje-AUbz-edificada <= ( ((count patches with
[(area_estudio > 0) and ((nueva_clas = 2) or (clasif2003_v03 = 2)) and (nviv > 0)]) * 100) / (count patches with [(area_estudio > 0)
and (nueva_clas = 2)]) ) ) [ ;if4
            show (word "a ejecutar SM1 " date-and-time)
            modelo1
            show (word "SM1 ejecutado " date-and-time)
            ;set ciclico? true
        ] ;finif4

    show (word "a ejecutar SM3 " date-and-time)
    modelo3
    show (word "SM3 ejecutado " date-and-time)

] ;finwhile ciclico
guardar-ubz
guardar-newedif
guardar-distpob
end


to modelo1
  set modelo 1
  do-plot1
  show selecciona ;"seleciona" es donde llama el procedimiento suelo-util
end

(...)


to modelo2
  set modelo 2
  do-plot1
  construye-vivienda
end

(...)


to modelo3
    set modelo 3
    set num_repeticiones_SM3 num_repeticiones_SM3 + 1
    do-plot1
    recoloca
end

(...)
```

ANEXO 3.

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS DESTACADOS

Aguilera Benavente, F.; Gómez Delgado, M. y **Cantergiani, C.C**. (2010) "Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano". *Ciudad y Territorio-Estudios Territoriales*, nº42 (165-166), pp. 481-195.

Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano

F. Aguilera Benavente (1) & M. Gómez Delgado (2) & C. C. Cantergiani (2)

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

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

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

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

Los modelos de simulación en el campo del estudio de procesos y dinámicas urbanas son un instrumento de aplicación relativamente reciente (Wegener, 1994), aunque su surgimiento se pueda ubicar allá por los años cincuenta (Batty, 2005). No obstante los fundamentos teóricos sobre los que se asientan los modelos de simulación urbana pueden situarse aún más atrás en el tiempo, en trabajos como la teoría de los lugares centrales de Christaller y las modificaciones de Lösch, que comenzarían a influir de forma directa o indirecta en el estudio de los cambios en los usos del suelo, así como en la búsqueda de patrones o tendencias en los mismos (Briassoulis, 2000).

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

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

Recibido: 07.09.2010; Revisado: 28.09.2010
e-mail: franab@ugr.es
Los autores agradecen a los evaluadores anónimos sus comentarios para la mejora del presente trabajo.
Trabajo realizado en el marco del proyecto de I+D+i: *SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante TIG del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad,* financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (referencia SEJ2007-66608-C04-00/GEOG).

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

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

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

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

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

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

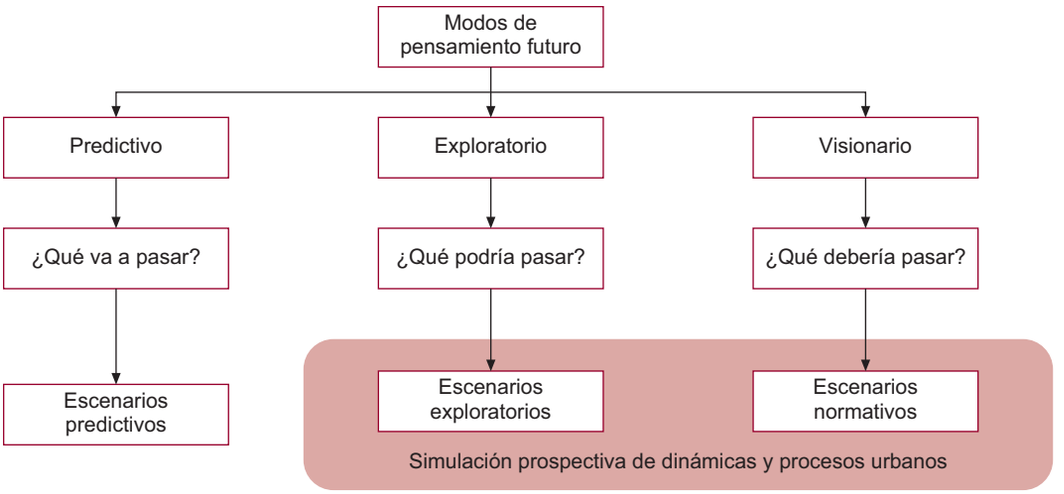


FIG. 1/ **Tipos de escenarios según Borjerson, y modos de pensamiento futuro**

Fuente: BORJERSON & *al*., 2006

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

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

- **Los escenarios predictivos,** que se mueven en el campo del pensamiento futuro de lo probable, tienen como objetivo predecir lo que es probable que suceda en un plazo de tiempo generalmente corto. Aunque estos escenarios se han empleado con profusión en disciplinas como las ciencias naturales, la economía o la demografía, en el contexto del crecimiento urbano su aplicación es hoy en día discutible (SCHWARTZ, 1991; BERDOULAY, 2009), dada la dificultad (o incluso imposibilidad) de predecir fenómenos de carácter tan complejo como los procesos urbanos (BLECIC & CECCHINI, 2007). Por ello, se entiende que estos escenarios no sean los más adecuados para su aplicación en el ámbito de la simulación prospectiva del crecimiento urbano.
  Por el contrario, los otros dos tipos de escenarios sí tienen un encaje más adecuado en el pensamiento prospectivo, tratando de reflejar tanto futuros posibles *(escenarios exploratorios)* como deseables *(escenarios normativos)* de los crecimientos urbanos.
- **Los escenarios exploratorios,** en este ámbito, muestran *diversas* evoluciones *posibles* de los crecimientos, generalmente en una escala temporal del medio plazo, en función del comportamiento futuro de un conjunto de factores. A través de este tipo de escenarios, la *simulación prospectiva* puede explorar tanto las consecuencias de posibles decisiones tomadas en el proceso planificador, como de diferentes contextos socioeconómicos, facilitando el proceso de toma de decisiones y fomentando la discusión con los agentes implicados en el proceso planificador (BERDOULAY, 2009).
- **Los escenarios normativos** por su parte, permiten discutir e imaginar las metas deseables para el crecimiento urbano, así como de los instrumentos y criterios necesarios para poder alcanzarlas. A través del empleo de estos escenarios la simulación prospectiva también podría indagar sobre las formas, patrones e intensidades óptimos del crecimiento urbano, así como sobre los cambios necesarios para poder alcanzar dichas metas deseables.

3. Modelos para la simulación prospectiva del crecimiento urbano

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

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

No obstante, de acuerdo con los modos del pensamiento exploratorio y normativo de los que se sirve la *simulación prospectiva,* y sin pretender ni mucho menos realizar una clasificación exhaustiva, algunos de los principales modelos de simulación del crecimiento urbano se pueden presentar agrupados en dos grupos principales: aquellos de una mayor aplicabilidad para la simulación de *escenarios exploratorios* como pueden ser los modelos basados en autómatas celulares o basados en agentes; y aquellos de mayor aplicabilidad en la simulación *de escenarios normativos,* como son la EMC y la lógica borrosa. No obstante, esta división no supone que los diferentes modelos presentados tengan utilidad exclusiva para la simulación de escenarios de un único tipo, sino que es posible emplearlos en la simulación de ambos, aunque sus principales características (flexibilidad, tipo de medio real o virtual, etc.) sí que los harán más idóneos para la simulación de uno u otro tipo (FIG. 2).

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

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

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

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

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

Fuente: Elaboración propia

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

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

Es posible explicar de una forma más sencilla el funcionamiento de los AC mediante su ejemplo más académico y conocido (O'SULLIVAN & TORRENS, 2000), el *Game of Life,* de John Conway, en el que se modelizaba, a través de reglas muy simples, el nacimiento, la muerte y la supervivencia de una colonia de células. Los resultados obtenidos por Conway fueron asombrosos: a partir de un conjunto de reglas sencillas y de una situación inicial de partida, el modelo era capaz de generar patrones de elevada complejidad que eran realmente insospechables a partir de la configuración inicial de células vivas. Este hecho provocó que los AC emergieran como una herramienta para la representación de sistemas complejos y la investigación de sus dinámicas (BENENSON & TORRENS, 2004).

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

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

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

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

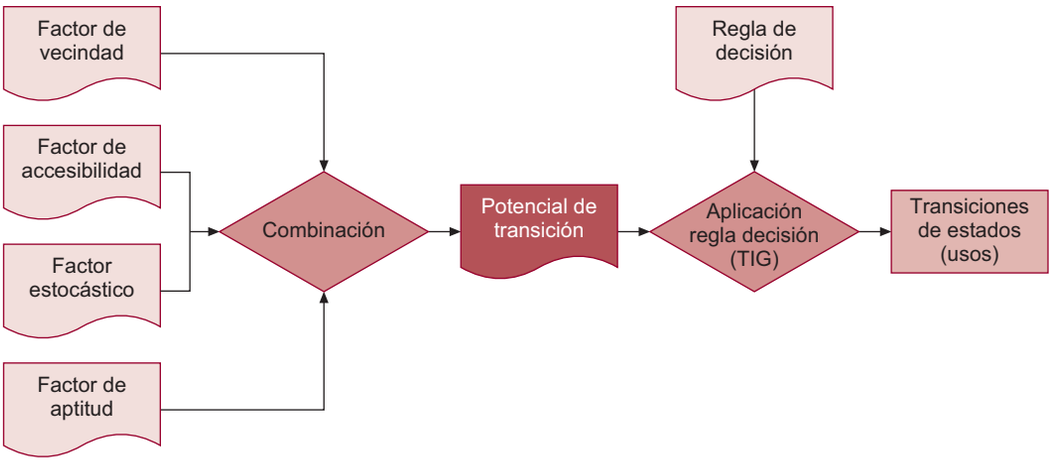


FIG. 3/ **Esquema del funcionamiento de un modelo de simulación**

Fuente: AGUILERA, 2008

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

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

Fuente: Elaboración propia

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

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

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

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

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

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

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

Fuente: Elaboración propia

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

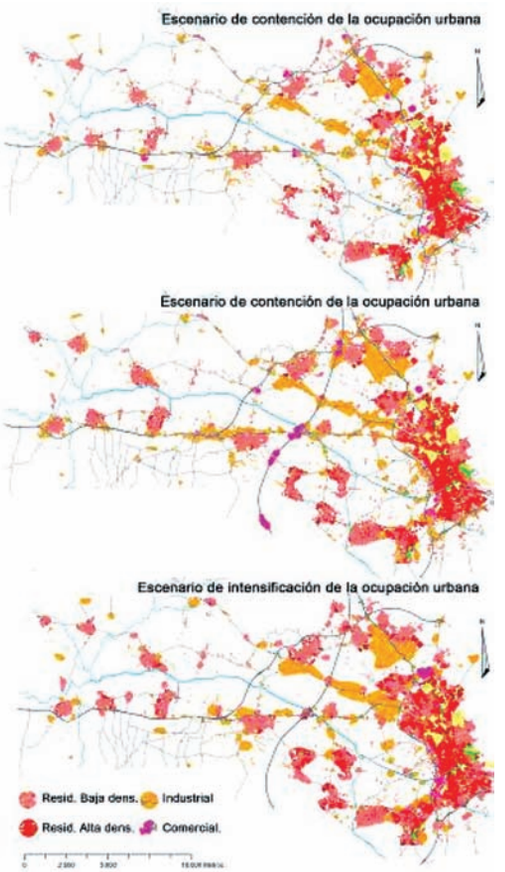


FIG. 6/ **Simulación prospectiva de tres escenarios exploratorios de crecimiento urbano para el Área Metropolitana de Granada (año 2020)**

Fuente: AGUILERA, 2008

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

De forma general, los Modelos Basados en Agentes (*Agent Based Models,* o ABM) están integrados por un conjunto de agentes o entidades parcial o totalmente autónomas que actúan de manera racional o reactiva de acuerdo con sus percepciones del exterior y el estado de su conocimiento, con el objetivo de alcanzar sus propios intereses (AGUILERA ONTIVEROS, 2000), relacionándose entre sí y con su medio para alcanzar un objetivo concreto (llegar a un determinado lugar, alcanzar un beneficio, tener la mayor influencia posible…). Algunos investigadores insisten en que un agente debe presentar un comportamiento adaptativo, limitando el concepto de agente a aquellos que pueden, de alguna forma, aprender de su medio y cambiar su comportamiento en conformidad a ello (CASTLE, 2006). FERBER (1999) sin embargo, agrupa los agentes según la complejidad de su comportamiento en *reactivos* (responden y envían mensajes según objetivos que no pueden modificar), *intencionales* (establecen prioridades y jerarquizan planes según sus metas) o *sociales* (razonan sobre metas y estrategias de los demás agentes).

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

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

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

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

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

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

Un buen ejemplo a este respecto lo constituye el modelo HI-LIFE (FONTAINE, 2008), cuyo objetivo principal es modelar la demanda residencial en la región policéntrica de East Anglia, Reino Unido. Este modelo simula patrones urbanos de usos del suelo en una escala regional, integrando el conocimiento cualitativo de las preferencias de localización residencial de diferentes agentes, con los análisis cuantitativos de las dinámicas de crecimiento urbano, para un período de 25 años. La preferencia de los agentes se define principalmente por la etapa de su ciclo de vida (infancia, familias con y sin hijos, vejez) y sus cambios, identificado como el factor predominante de decisiones de localización residencial, superando incluso motivos económicos. Los resultados muestran que un ABM puede simular dónde, cuándo y de quién puede derivar la demanda de nuevos desarrollos residenciales.

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

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

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

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

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

En este proceso es determinante el establecimiento de la capacidad de acogida de cada punto del territorio para recibir una actividad (GÓMEZ OREA, 1994), lo que nos permitirá seleccionar, posteriormente, aquellas localizaciones que presenten la máxima capacidad para albergar la actividad en cuestión[2]. El uso combinado de técnicas de EMC y SIG resuelve satisfactoriamente este procedimiento como lo demuestra el número elevado de trabajos que se han elaborado en este sentido (THILL, 1999), ya sea relacionado con la evaluación de desarrollos forestales, agrícolas, industriales, creación de corredores naturales, selección de zonas a ser preservadas, etc. (DAI & *al*., 2001; JOERIN & *al*., 2001; PÉREZ & *al*., 2002; PHUA & MINOWA, 2005; BAJA & *al*., 2007; CARMO GIORDANO & SETTI RIEDEL, 2008; REZAEI-MOGHADDAM & KARAMI, 2008; VÍA GARCÍA & MUÑOZ MUNICIO, 2008), con la localización de distintos tipos de equipamientos e instalaciones (SIDDIQUI & *al*., 1996; BOSQUE SENDRA & *al*., 1999; MALCZEWSKI & JACKSON, 2000; CHANG & *al*., 2008; HOSSAIN & *al*., 2009), con la gestión de cuencas hidrográficas (MARTÍN & *al*., 1999; DEGIOANNI & *al*., 2000), pero también con otros aspectos importantes relacionados con la planificación como la evaluación de distintas alternativas relacionadas con grandes infraestructuras (COLORNI & *al*., 1999; MORIN, 1999).

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

Se ha de destacar que, a diferencia de las otras técnicas mencionadas en este artículo, la EMC no ha sido habitualmente utilizada de manera estrictamente prospectiva para simular distintos escenarios de futuro crecimiento urbano. Sin embargo, y como podemos ver en el listado adjunto, la tendencia ha cambiado en los últimos años y se han realizado algunos ensayos en este sentido. No obstante en algunos casos tan sólo se realiza una proyección de población en la que basar la futura demanda de suelo urbano y en otros no se menciona con suficiente detalle cómo se ejecuta esa simulación a futuro y en qué está basada.

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

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

4. Discusión y conclusiones

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

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

[2] Es posible encontrar abundante y detallada información de la utilización de estas técnicas en un entorno SIG en cualquiera de los manuales existentes sobre estos temas (MALCZEWSKI, 1999; GÓMEZ DELGADO & BARREDO, 2005, entre otros).

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

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

Fuente: Elaboración propia

yor relevancia en la esfera internacional, como son los modelos basados en agentes y en autómatas celulares, así como aquellos que emplean técnicas de evaluación multicriterio. Para ello, se han recopilado algunos de los trabajos de mayor relevancia y actualidad representativos del estado de la cuestión en cada caso, facilitando el acceso a referencias concretas y prácticas que permitan la puesta en marcha de trabajos similares en este materia. Igualmente, y para el caso de los AC y de las técnicas de EMC, se presentan resultados de trabajos realizados por los autores, en los que se aplican estas técnicas en ámbitos metropolitanos españoles (concretamente Madrid y Granada), junto con el diseño de escenarios, que a juicio de los autores, constituyen la otra herramienta fundamental que completa los instrumentos de la simulación prospectiva. Es por ello que se ha incorporado también en el presente artículo una breve discusión sobre el diseño de escenarios y sus tipos.

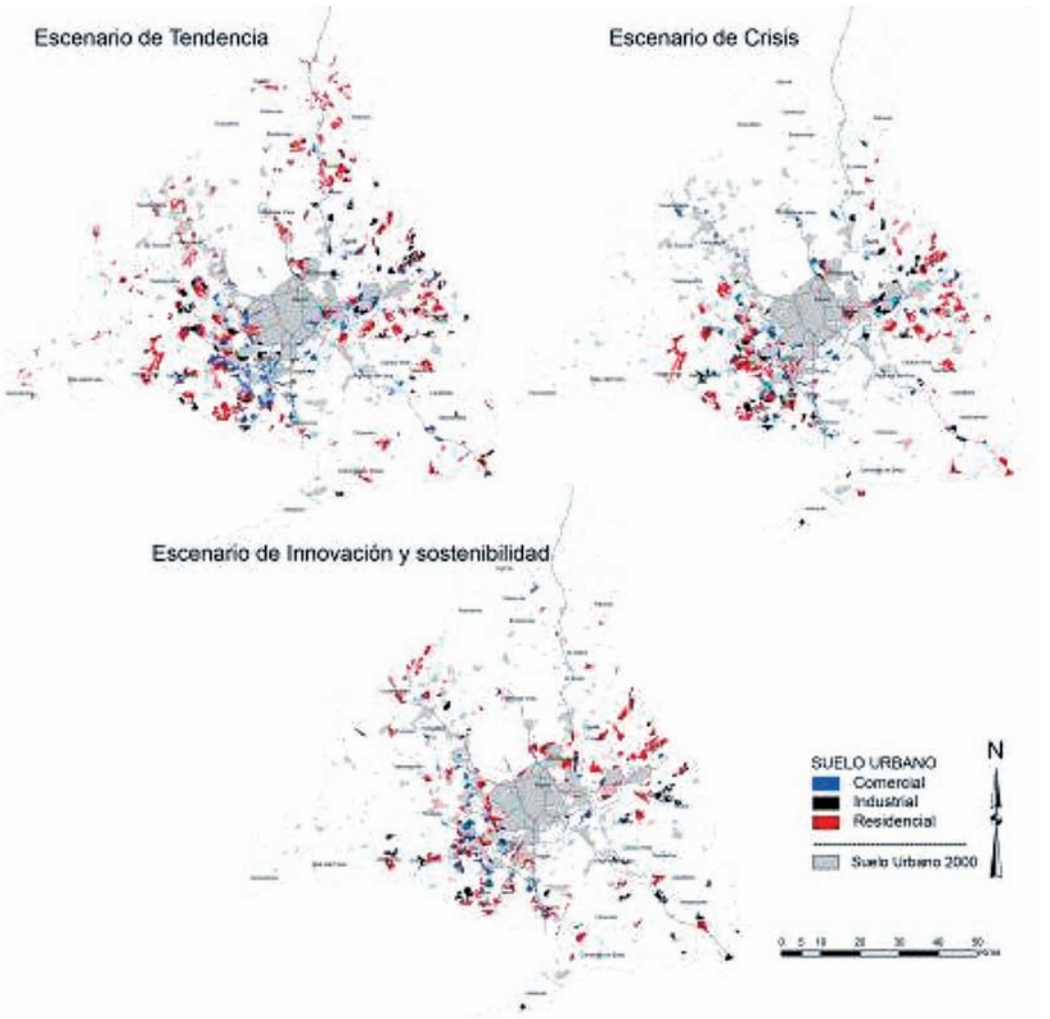


FIG. 8/ **Resultados de asignación de suelo residencial y productivo (industrial y comercial) para el año 2020 en la Comunidad de Madrid, en tres escenarios de crecimiento urbano**

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

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

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

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

Este último aspecto, finalmente, abriría un campo para la integración del diseño y simulación de escenarios con los procesos de planeamiento a diversas escalas, que condujese a la elaboración de planes más adaptables a futuros inciertos y cambiantes, la adopción de estrategias adecuadas para diferentes tipos de contextos futuros, la generación de planes por etapas o fases condicionadas por la materialización de unos u otros escenarios futuros, etc.

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

5. Bibliografía

AGUILERA, F. (2008): *Análisis espacial para la ordenación ecopaisajística de la Aglomeración Urbana de Granada,* tesis doctoral, Universidad de Granada.

AGUILERA ONTIVEROS, A. (2000): "Simulaciones multiagente de ambientes urbanos", *Vetas, revista de El Colegio de San Luis,* Año 2, 5, mayo-agosto de 2000: 205-224.

BAJA, S. & D. M. CHAPMAN & D. DRAGOVICH (2007): "Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning", *Environmental Modeling & Assessment,* 12: 171-184.

BARREDO, J. I. & M. KASANKO & N. Y. MCCORMICK & C. LAVALLE (2003): "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata", *Landscape and Urban Planning,* 64: 145-160.

BARREDO, J. I. & L. DEMICHELI & C. LAVALLE & M KASANKO & N. MCCORMICK (2004): "Modelling future urban scenarios in developing countries: an aplication case study in Lagos, Nigeria", *Environment and Planning B: Planning and Design,* 32: 65-84.

BATTY, M. (2005): *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals,* The MIT Press.

BENENSON, I. & P. M. TORRENS (2004): *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena,* John Wiley & Sons, Ltd.

BERDOULAY, V. (2009): "La historia de la geografía en el desafío de la prospectiva", *Boletín de la A.G.E.,* 51: 9-23.

BLECIC, I. & A. CECCHINI (2008): "Design beyond complexity: Possible futures-Prediction or design? (and techniques and tools to make it possible)", *Futures,* vol. 40: 537-551.

BORJERSON, L. & M. HOJER & K. H. DREBORG & T. EKVALL & G. FINNVENDEN (2006): "Scenario types and techniques: Towards a user's guide", *Futures,* vol. 38: 723-739.

BOSQUE SENDRA, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica,* Ed. Rialp. Madrid.

— & M. A. DIAZ MUÑOZ & M. GÓMEZ DELGADO & V. M. RODRÍGUEZ ESPINOSA & A. E. RODRÍGUEZ DURÁN & A. VELA GAYO (1999): "Un procedimiento, basado en un SIG, para localizar centros de tratamiento de residuos", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense,* 19: 295-323.

BRIASSOULIS, H. (2000): "Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches", en: *http://www.rri*.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm [mayo, 2007].

CARMO GIORDANO, L. & P. SETTI RIEDEL (2008): "Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: a case study of the city of Rio Claro, Sao Paulo, Brazil", *Landscape and urban planning,* 84: 301-311.

CARSJENS, G. J. (2009): *Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes,* tesis doctoral, Universidad de Wageningen.

CARVER, S. (1991): "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information sytems", *International Journal of Geographical Information Systems,* 5 (3): 321-339.

CASTLE, C. J. E. (2006): "Developing a Prototype Agent-Based Pedestrian Evacuation Model to Explore the Evacuation of King's Cross St. Pancras Undergroud Station", *CASA Working Paper Series,* 108.

— & A. T. CROOKS (2006): "Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations", *UCL Working Papers Series*.

COLORNI, A. & E. LANIADO & S. MURATORI (1999): "Decision support systems for environmental impact assessment of transport infrastructures", *Transportation Research Part D4,* 1-11.

CHANG, N. & G. PARVATHINATHAN & J. B. BREEDEN (2008): "Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region", *Journal of Environmental Management,* 8: 139-153.

DAI, F. C. & C. F. LEE & X. H. ZHANG (2001): "GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study", *Engineering Geology,* 6: 257-271.

DEGIOANNI, A. & A. CAMARASA BELMONTE & F. MORENO SANZ (2000): "Bases metodológicas para la evaluación, uso y gestión sostenible de los recursos agrarios. Aplicación a la cuenca de Santa Catalina, Argentina", en AGUADO & GÓMEZ DELGADO (eds.): *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible,* Actas del IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección de la AGE: 290-311.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2006): "Urban Sprawl in Europe", *EEA Report,* 10/2006.

EPSTEIN, J. M. & R. AXTELL (eds.) (1996): *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up,* MIT Press, Washington DC.

FERBER, J. (1999): *Multiagent systems: An introduction to distributed artificial intelligence,* Addison-Wesley, Nueva York.

FONT, A. (2004): *L'explosió De La Ciutat,* COAC i Fòrum Universal de les Cultures de Barcelona, Barcelona.

FONTAINE, C. M. & M. D. ROUNSEVELL (2009): "An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape", *Landscape Ecology,* 24: 1237-1254.

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

GALACHO JIMÉNEZ, F. B. & J. A. ARREBOLA CASTAÑO (2008): "Aplicación del modelo de evaluación de la capacidad de acogida para la valoración de la aptitud física del territorio respecto a sectores de planeamiento urbanístico", en L. HERNÁNDEZ & J. M. PARREÑO (eds.): *Tecnologías de la Información Geográfica para el desarrollo territorial,* Servicio de publicaciones y difusión científica de la ULPGC, Las Palmas de Gran Canaria: 43-55.

GENELETTI, D. & I. VAN DUREN (2008): "Protected area zoning for conservation and use: a combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation", *Landscape and urban planning,* 85 (2): 97-110.

GIMBLETT, H. R. (2002): "Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Technologies for Modeling and Simulating Social and Ecological Phenomena", en H. R. GIMBLETT (ed.): *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes,* Institute Studies on the Sciences of Complexity Santa Fe: 1-20.

GÓMEZ DELGADO, M. & J. I. BARREDO CANO (2005*): Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio,* Editorial RA-MA, Paracuellos de Jarama.

— (2008): "Towards a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region", en M. PAEGELOW & M. T CAMACHO (eds.): *Modelling Environmental Dynamics,* Springer-Verlag, Berlín.

GÓMEZ OREA, D. (1994): *Ordenación del territorio. Una aproximación desde el Medio Físico,* Editorial Agrícola Española, Madrid.

HAN, J. & Y. HAYASHIA & X. CAOB & H. IMURAA (2009): "Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China", *Landscape and Urban Planning,* 91: 133-141.

HOSSAIN, M. S. & S. R. CHOWDHURY & N. G. DAS, (2009): "Integration of GIS and multicriteria decision analysis for urban aquaculture development in Bangladesh", *Landscape and urban planning,* 90 (3-4): 119-133.

JOERIN, F. & M. THÉRIAULT & A. MUSY (2001): "Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment", *International Journal of Geographical Information Science,* 15 (2): 153-174.

LAMELAS GRACIA, M. T. (2009): "Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: aplicación a la localización de suelo industrial", *GeoFocus,* 9: 28-66.

LIGMANN-ZIELINSKA, A. & R. L. CHURCH & P. JANKOWSKI (2008): "Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation", *International Journal of Geographical Information Science,* 22 (6): 601-622.

LI, X. & Q. YANG & X. LIU (2008): "Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata", *Landscape and Urban Planning,* 86: 17-186.

LIU, Y. & X. LV & X. QIN & H. GUO & Y. YU & J. WANG & G. MAO (2007): "An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe", *Landscape and Urban Planning,* 82: 233-246.

MALCZEWSKI, J. (1999): *GIS and Multicriteria Decision Analyisis,* John Wiley & Sons Inc., Nueva York.

— (2002): "Fuzzy screening for land suitability analysis", *Geographical & Environmental Modelling,* 6 (1): 27-39.

— (2006): "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 8: 270-277.

— & M. JACKSON (2000): "Multicriteria spatial allocation of educational resources: an overview", *Socio-economic planning sciences,* 34: 219-235.

MARIEN, M. (2002): "Future Studies in the 21st Century: a reality based view", *Futures,* 34: 261-281.

MARTIN, N. & B. ST-ONGE & J. P. WAAUB (1999): "Geographic tools for decision making in watershed management", en J. C. THILL (ed.): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information sciences approach,* 309-334, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot.

MATTHEWS, R. B. & N. G. GILBERT & A. ROACH & G. POLHILL & N. M. GOTTS (2007): "Agent-based land-use models: a review of applications", *Lanscape Ecology,* 22: 1447-1459.

MOLERO MELGAREJO, E. & A. L. GRINDLAY MORENO & J. J. ASENSIO RODRÍGUEZ (2007): "Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio", *GeoFocus,* 7: 120-147.

MORIN, D. M. (1999): "GDSS in highway planning: their use and adoption", en J. C. THILL (ed.): *Spatial Multicriteria Decision Making and Analysis. A geographic information sciences approach,* 149-174, Ashgate Publishing Ltd., Aldershot.

O'SULLIVAN, D. & P. TORRENS (2000): "Cellular Models of Urban Systems", *CASA Working Paper Series,* 22.

PHUA, M. & M. MINOWA (2005): "A GIS-based multicriteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia", *Landscape and Urban Planning,* 71: 207-222.

PLATA ROCHA, W. (2010): *Descripción, análisis y simulación del crecimiento urbano mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El caso de la Comunidad de Madrid*. Tesis doctoral, Universidad de Alcalá.

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

Cantergiani, C.C. (2011) "Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica". *Serie Geográfica*, nº17, pp. 29-43. ISSN 1136-5277 (Disponible en: http://dspace.uah.es/dspace/handle/10017/14343, último acceso: abril/2017)*

MODELOS BASADOS EN AGENTES APLICADOS A ESTUDIOS URBANOS: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA

Carolina de Carvalho Cantergiani
Universidad de Alcalá
Departamento de Geografía
Calle Colegios, 2
28801 Alcalá de Henares
Madrid
Tel.: +34 91 8854482
e-mail: carolina.carvalho@alu.uah.es

Resumen
Los Modelos Basados en Agentes (MBA) son un tipo de modelo prospectivo relativamente nuevo cuyas características permiten realizar simulaciones urbanas a escala regional, aunque hasta el momento hayan sido más aplicados a escala intra urbana, y mayoritariamente en otros campos de estudio (como la economía, ciencias políticas o la ecología). Sus principales características, tales como la capacidad de integrar el comportamiento de los agentes (que en este caso coinciden con los actores involucrados en el proceso de crecimiento urbano) a los cambios territoriales, los diferencian de otros modelos comúnmente aplicados a simulaciones urbanas. Los MBA permiten, a partir de (1) un conjunto de agentes, (2) un medio sobre el cual actúan y (3) unas reglas de comportamiento, simular los complejos fenómenos urbanos generados de forma agregada a partir de un patrón espacial resultante de comportamientos individuales. La diferencia de comportamiento observada por ese cambio de escala, del individual al agregado, permite estudiar cómo se generan los procesos urbanos y también manipular las variables de entrada para generar distintos escenarios. Mientras otros modelos de simulación se limitan a estudiar tendencias pasadas o diseñar escenarios en base a componentes fijos, o como mucho su transición según relación de vecindad existente en base a formulaciones matemáticas y estadísticas, los MBA están construidos, además, en el marco de la simulación informática, lo que permite interpretaciones más realistas y mayor flexibilidad al considerar también el comportamiento de los agentes involucrados y sus relaciones. Este documento pretende presentar una revisión teórica de los Modelos Basados en Agentes aplicados a simulaciones urbanas, exponiendo su base teórica, componentes, estructura, aplicaciones, así como sus principales potencialidades y deficiencias.

Palabras Clave: Modelos Basados en Agentes, simulación urbana, simulación de escenarios.

Abstract
Agent-Based Models (ABM) are relatively new prospective models with characteristics that allow urban simulations at regional scales, although mostly applied at intra-urban scale so far. Their main characteristics, as the ability to link the behavior of the agents (in this case, coincident with actors of urban growth process) to territorial changes, distinguish them from other models commonly applied to urban issues. ABM allows, within (1) a set of agents, (2) an environment in which agent act over, and (3) a set of behavior rules, to simulate urban complex phenomena that generate spatial patterns in an aggregate way derived from individual behaviors. The observed differences for these changes on scale – from an individual to an aggregate – help us to study how urban processes are generated and also to manipulate the inputs in order to generate different

Fecha de Recepción: Febrero de 2011
Fecha de Aceptación: Mayo de 2011

scenarios. While other simulation models are limited to study past trends or to design scenarios based on static components or, even beyond, consider transition rules with respect to the neighborhood in the base of mathematics and statistics, ABM are built on the framework of informatics simulation, allowing more realistic interpretations and higher flexibility by considering the agents behavior and their relations. This document presents a theoretical review on Agent-Based Models applied to urban studies, regarding their concept, components, structure, applications, and also identifying their potentialities and limitations.

Key Words: Agent-Based Models, urban simulation, scenarios simulation.

1.- Introducción

Los procesos urbanos son fenómenos de gran relevancia en la coyuntura actual de desarrollo territorial en el mundo. Su complejidad reside, principalmente, en el intento de controlar su expansión y buscar un equilibrio entre las relaciones territoriales y las demás – ambientales, culturales, sociales, económicas, y otras.

Entre las muchas formas disponibles para intentar comprender las dinámicas urbanas y los procesos territoriales, destacan los modelos espaciales, que de alguna manera representan el territorio y permiten estudiar algunos procesos, aproximándonos al entendimiento de los cambios observados entre el pasado y el presente, o incluso permitiendo proyectar otros hacia el futuro.

Entre el conjunto de modelos de simulación de cambios de usos del suelo y crecimiento urbano más avanzados en la actualidad (y también entre los más complejos), se encuentran los Modelos Basados en Agentes *(Agent-Based Models)*. Se trata de un modelo híbrido que abarca algunas características de los modelos celulares (como los Autómatas Celulares, AC), pero también puede incorporar propiedades de modelos de dinámicas de sistemas, estadísticos o de flujos económicos, etc. Es un modelo que además permite a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009), o entender cómo el propio sistema afecta al individuo (Grimm y Railsback, 2005). Su mayor aporte reside en el hecho de que ofrece una forma de incorporar la influencia del proceso de toma de decisiones sobre el territorio de forma mecánica, formal y espacialmente explícita, tomando en cuenta las interacciones sociales, procesos adaptativos y tomas de decisiones en diferentes escenarios (Matthews *et al.*, 2007).

Los MBA tienen un amplio rango de aplicaciones; además de la ecología, otras disciplinas tratan sistemas complejos compuestos de entidades autónomas, incluyendo las ciencias sociales, economía, demografía, geografía y ciencias políticas (es posible encontrar un número importante de ejemplos en Grimm *et al.*, 2006). En las ciencias sociales en general, las aplicaciones de MBA muestran un elevado potencial de modelización y simulación, facilitando el entendimiento de algunos fenómenos complejos y dando soporte a la planificación y comprensión de impactos territoriales.

Para O'Sullivan y Haklay (2000), está claro que los geógrafos y los planificadores tienen un papel importante en este campo de investigación, tanto en el plano teórico como en el práctico, contribuyendo principalmente al desarrollo de los aspectos espaciales de estos modelos. Sin embargo, las aplicaciones en el ámbito urbano están todavía infra-exploradas si consideramos su elevado potencial de modelización. Dada la escasa literatura que sobre estos modelos existe hoy día en español, la presente revisión e introducción teórica pretende aportar a la comunidad hispana un mayor conocimiento sobre los MBA y fomentar su investigación y desarrollo.

Así, se presentan en este documento sus principales conceptos y características, abarcando sus componentes, estructura y funcionamiento, partiendo de la literatura existente y de reflexiones propias. En resumen, este documento pretende presentar brevemente los MBA cuyas aplicaciones ofrecen muchas potencialidades y posibilidades en estudios de simulación de la expansión urbana, tema objeto de interés de este artículo.

2.-Características Generales de los Modelos Basados en Agentes

Los MBA, como concepto, surgen en la década de los años 60, época de exploración de modelos de simulación territoriales, y más concretamente en el seno de las ciencias de la computación y ligados a la investigación de la inteligencia artificial de los años 70. Sin embargo, en este momento la atención se centró en otro tipo de modelos, principalmente debido a las todavía escasas capacidades informáticas y un escepticismo generalizado en cuanto a simulaciones espaciales. Así, este y otros modelos no fueron ampliamente desarrollados hasta muchos años después. A lo largo de las décadas de los 80 y 90, se redescubrieron los modelos individualistas y de pensamiento – en contraposición con el enfoque estructuralista y Marxista del período anterior (O'Sullivan y Haklay, 2000). En este momento se desarrollaron numerosos modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, aunque en su mayoría con perfiles prácticamente estáticos y con énfasis principalmente en la transición de estado entre celdas vecinas, abarcando la microsimulación, las redes neuronales y los autómatas celulares. A partir de los 90, inmersos ya en la sociedad del conocimiento y de la información (Castells, 1996, 1997, 1998[1]), los MBA ganaron popularidad en las ciencias sociales, en el intento de reproducir aspectos espaciales y demográficos para la mejor comprensión de la evolución de la sociedad. En la última década la oleada de estudios de modelos basados en agentes se ha fortalecido, y con ella muchas plataformas y grupos de investigación dedicados a estos temas.

La simulación basada en modelos celulares, entre ellos los MBA, ha generado una nueva visión de la modelación. La introducción de los modelos celulares tiene su origen en los estudios de Von Neumann y Ulam, ambos matemáticos que investigaban las celdas y sus relaciones de vecindad. A partir de su trabajo, estos modelos evolucionaron dando lugar a los Autómatas Celulares (AC), cuya principal representación se plasma en el Juego de la Vida de Conway. Este modelo sencillo funciona de forma que, a partir de una secuencia de celdas, con un estado determinado, unas reglas de transición y en función del comportamiento respecto a la vecindad inmediata, cada unidad se comporta de forma dinámica cambiando su estado inicial y conformando patrones espaciales. Los modelos celulares se desarrollaron a partir de estas primeras investigaciones para posicionarse como un tipo de modelo de potencial elevado de simulación y alta capacidad de modelación, especialmente adecuados para estudios de crecimiento urbano. Estos modelos evolucionaron (y siguen evolucionando) hacia otros tipos que incorporan nuevos desafíos en cuanto a la modelación. Es el caso de los modelos basados en agentes, que reúnen aspectos de movilidad, comportamiento e interacciones entre agentes y el medio.

Respecto a la utilización de MBA aplicados a las ciencias sociales, destaca uno de los primeros modelos –la segregación en la ciudad–, desarrollado por Thomas Shelling en la década de los 70 (Shelling, 1971). Dicho modelo demuestra cómo la segregación puede emerger de elecciones individuales, aun cuando todos los individuos sean razonablemente tolerantes.

Entre los primeros modelos multi-agentes merece especial atención el *Sugarscape* desarrollado por Epstein y Axtell (1996) a mediados de los 90 para estudios de fenómenos sociales. Este es un buen ejemplo de MBA que, aunque cuente con agentes relativamente simples, produce un rango de resultados interesantes sobre la emergencia de redes sociales, comercio y mercados, y diferenciación cultural. El *Sugarscape* modela una sociedad artificial donde los agentes se mueven en una malla regular, y donde cada celda dispone de una cantidad de "azúcar" que se renueva gradualmente, y con la que, además, los agentes ubicados en dichas celdas pueden alimentarse. Sin embargo, las cantidades de esta componente varían espacialmente en cada localización y de acuerdo a la cantidad de azúcar comido previamente; los agentes tienen como objetivo sobrevivir y para eso tendrán que moverse en búsqueda de más alimento. Si cosechan más azúcar de lo que pueden comer inmediatamente, pueden guardar para más adelante o, en variaciones más complejas del modelo, pueden negociarlo con otros agentes (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Nigel Gilbert y su libro *Social Simulation: Simulation for the Social Scientist* (Gilbert y Troitzsch, 2005), así como la creación del *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASS)*, refe-

1 Citado en O´Sullivan y Haklay (2000).

rencia mundial en temas de simulación en ciencias sociales en la actualidad, constituyen referencias importantes en la revolución que ha supuesto este campo de estudio.

2.1.- Estructura Básica De Un Modelo Basado En Agentes

El principal elemento de un MBA, y como el propio nombre indica, son los **agentes**, pero también lo es el **medio** en el que se localizan, así como la **relación** entre estos agentes, o entre ellos y su medio, plasmados a través de reglas de comportamiento. En este apartado se presentan algunos de los principales conceptos de cada componente de los MBA, cómo funcionan e interactúan estos elementos y cuál es su papel dentro del modelo. Por último, se definen los Modelos Basados en Agentes a partir de estos tres elementos fundamentales.

Aunque pueda resultar sencillo visualizar un agente y comprenderlo dentro del contexto de los modelos de simulación, conceptualizarlo puede resultar un tema complejo. Muchos investigadores han presentado distintas definiciones, sin llegar todavía a un consenso de cómo definir un agente. Algunos modeladores consideran que un agente pueden ser componentes independientes (ej. personas, hogares, coches, instituciones, etc.); otros insisten en que además su comportamiento debe ser adaptativo para que sea considerado un agente, refiriéndose a aquellos componentes que pueden, de alguna forma, aprender de sus medios y cambiar su comportamiento conforme a éstos (Castle y Crooks, 2006). En ese segundo grupo se encuentra Gilbert, que plantea que el objetivo del diseño de un agente es crear programas que interactúan de forma inteligente con su medio (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Ciertamente la inteligencia es un elemento común en todas las concepciones de agentes, pero también lo es su rol en el modelo en cuanto a su comportamiento y su relación con otros agentes y su medio. Así, para Michael Batty, los agentes son objetos que no tienen ubicación fija, pero que actúan e interactúan uno con el otro, así como con el medio sobre el cual se desarrollan, de acuerdo a un determinado propósito (Batty, 2005).

De todas formas, estas y otras características son comunes a los agentes que protagonizan los MBA, y en las cuales, con pequeñas variaciones, coinciden la mayoría de los modeladores (Wooldridge y Jennings, 1995; Franklin y Graesser, 1996; Epstein, 1999; Macal y North, 2005; Torrens y Benenson, 2005; etc.). A continuación se presenta una serie de características que deben poseer los agentes, a partir de la compilación y conclusiones de estos autores:

- **Autónomo:** gobierna sin influencia de control centralizado, es capaz de procesar información e intercambiarla con otros agentes para tomar decisiones independientes;

- **Heterogéneo:** no existe un individuo medio, aunque pueden existir grupos de agentes que se generan desde abajo hacia arriba (fenómeno *bottom-up*), resultando una fusión de individuos autónomos similares;

- **Activo:** ejerce influencia independiente en una simulación. Aun así, puede ser activo de las siguientes formas: proactivo/orientado a metas (reacciona según un objetivo a alcanzar), reactivo/perceptivo (percibe su alrededor y otros elementos), racional limitado (capacidad de solucionar problemas por deducción para mejorar su situación, aunque con percepción limitada), interactivo/comunicativo (se comunica con otros agentes), móvil (puede recorrer el espacio en un modelo) o adaptativo (puede cambiar su estado dependiendo de su estado actual, adaptándolo a partir de una forma de memoria o aprendizaje).

Además, los agentes, cuando representan personas, transmiten la naturaleza propositiva de las actividades humanas, donde con frecuencia se les atribuye cierto grado de intencionalidad (creencia, motivos, emociones, etc.), libre arbitrio y poder para alcanzar sus propios objetivos (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Finalmente, Franklin y Graesser (1996) formalizan la definición de agente autónomo como un sistema situado en un medio (y parte de él), que lo siente y actúa sobre este medio a lo largo del tiempo en función de su propio interés, y así lograr lo que pretende en el futuro. Por ejemplo, es común que los estudios de crecimiento urbano consideren las personas como agentes, pero también puede serlo las edificaciones, los hogares, las empresas, comercios, los políticos, entre otros.

Por otro lado, y no menos importante, el **medio** sobre el cual se sitúan los agentes tiene especial relevancia en los MBA, ya que define el espacio en que estos operan, sirviendo de soporte a su interacción con ese medio y otros agentes (Castle y Crooks, 2006). Según Epstein (Epstein y Axtell, 1996) el medio es un elemento separado de los agentes, en el cual operan y con el cual ellos interactúan. Por ejemplo, la zonificación urbana o el uso del suelo pueden ser un buen ejemplo en cuanto a análisis territoriales en el ámbito urbano.

Los agentes en un MBA interactúan entre ellos y con el medio a partir de unas **reglas de transición**, en función de su comportamiento, su estado y sus intereses. Conforme señala Epstein y Axtell (1996), las reglas que motivan el comportamiento de los agentes se plasman en las variaciones de relaciones entre ellos y el exterior (otros agentes o el medio). Esta capacidad de percibir el espacio, interactuar con los demás elementos, cambiar o mantener su estado, buscar alcanzar un objetivo, permiten a los agentes relacionarse y comportarse de determinada manera, cuyas respuestas serán el elemento motivador de la simulación. Aquellas relaciones agente-medio determinan el movimiento, y resultan de los intereses de los agentes, así como de la relación espacial de distancia, disponibilidad, ocupación, preferencias, entre otros. Por ejemplo, un determinado grupo de población puede desear estar ubicado cerca de una infraestructura de transporte público, valorando espacios con estas características al decidir cambiar su localización. Las reglas medio-medio pueden definirse a través de procesos de autómatas celulares, que consisten en ramificar el espacio en una malla de celdas usualmente regulares, cuyo estado asignado cambia en el tiempo siguiente acorde al estado de las celdas vecinas y una serie de reglas de transición. Es el caso de los cambios de los usos del suelo por la influencia de los usos adyacentes. Finalmente las reglas agente-agente, son definidas en función de la relación existente entre ellos y principalmente de sus características (activo, independiente, seguidores, reproductores, etc.). Así, estas relaciones pueden ser de acoplamiento, combate o negociación. La segregación social es un claro ejemplo de esta relación, al estar interesado un determinado grupo en localizarse en un ambiente con elementos de similares características.

Al entender qué son los agentes, cómo pueden interactuar con otros agentes y con su medio, y qué determinan las reglas de comportamiento planteadas, resulta fácil comprender el concepto de **Modelos Basados en Agentes**. En primer lugar, la mayoría de los autores está de acuerdo en que los MBA están compuestos de múltiples agentes interactivos ubicados en un medio simulado o modelado. En estos modelos, es necesario especificar una relación entre agentes, conectándoles entre sí y/o con otras entidades del sistema, y cuyas características se definen en función de sus percepciones del exterior y del estado de su conocimiento, con el objetivo de alcanzar sus propios intereses. Estas relaciones pueden ser definidas de varias formas, desde una reacción simple hasta aquellas orientadas a metas (dependiendo del tipo de agente y sus características). Independientemente del tipo de agentes que componen el modelo, su comportamiento puede ser programado para ejecutarse de forma sincronizada o descompasada (Ferber, 1999; Aguilera Ontiveros, 2000; Axelrod, 2005; Castle y Crooks, 2006).

Técnicamente, el término Modelos Basados en Agentes se refiere al uso de métodos computacionales para investigar procesos y problemas que se consideran sistemas dinámicos de agentes interactivos (Smith *et al.*, 2009), y cuya estructura de elementos, interacciones y cambio de estado se visualiza en la Figura 1.

Respecto al término MBA, existe toda una variedad de acrónimos en la literatura, pero en la mayoría de los casos tienen idéntico significado o aluden a conceptos bastante similares. Así, encontramos denominaciones tan variadas como *Agent-Based Computational Modelling/ABCM, Agent-Based Social Simulation/ABSS, Agent-Based Computation Simulation/ABCS, Agent-Based Modelling and Simulation/MBAS, Individual-Based Models/IBM* (aunque este último es más utilizado en ecología).

Quizás merecería la pena destacar el término Sistemas Multi-Agentes – SMA (o *Multi-Agent Systems - MAS*), porque se confunden mucho con los MBA y no coinciden del todo en su concepción. El campo de los MAS (apenas aplicado a las ciencias sociales) es bastante reconocido en investigaciones basadas en Inteligencia Artificial, y aunque los MBA también presenten raíces en ese campo, no están limitados al diseño y comprensión de agentes artificiales. Por lo tanto, la diferencia entre estos dos modelos va más allá de una forma diferente de denominación.

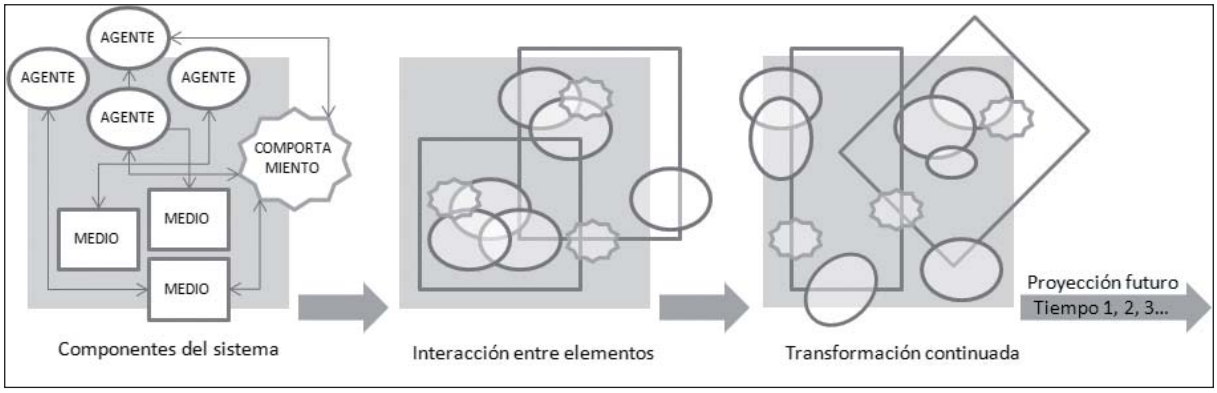


Figura 1.- Esquema de funcionamiento de un MBA.

2.2.- Aspectos Técnicos

En cuanto a los aspectos técnicos de los MBA, sus estructuras son más complejas que las de los modelos analíticos tradicionales y, como consecuencia, son más difíciles de analizar, entender y comunicar. Además, tampoco están adecuadamente descritos en muchas publicaciones existentes, o resultan de difícil lectura, incompletos o ambiguos y, por tanto, menos accesibles. Ello hace que la mayoría de los modelos publicados no sea fácilmente reproducible (Grimm *et al.*, 2006).

Por esa razón, Grimm *et al.* (2006) decidieron proponer un protocolo para resolver los principales problemas en cuanto a la descripción de los MBA, al cual llamaron *ODD (Overview, Design concepts and Details)*. Esta puede ser considerada la primera iniciativa para establecer un protocolo de descripción de un MBA, lo que es un paso prometedor en cuanto a la aplicación de modelos basados en agentes a las ciencias sociales y otros campos afines (Polhill, 2010).

Además de la correcta y clara descripción del modelo, también es fundamental conocer la **plataforma** sobre la cual se desarrollan. Los MBA requieren una base informática para asociar los agentes, reglas, relaciones, y permitir la correcta ejecución del modelo. Actualmente existen distintas plataformas sobre las cuales se pueden desarrollar, basadas en diferentes lenguajes de programación, interfaz o sistemas operativos, así como también existen distintos programas, modelos, herramientas y aplicaciones para MBA.

Algunos autores han elaborado ya estudios donde se analizan los programas según algunas características útiles para apoyar la elección de la plataforma y sistemas de simulación y modelación más adecuados, identificando los criterios clave a ser consultados para tomar esa decisión (Parker *et al.*, 2001; Serenko y Detlor, 2002; Tobias y Hofmann, 2004; Railsback *et al.*, 2006; Castle y Crooks, 2006; Smith *et al.*, 2009). Los elementos más citados en estas compilaciones son: SWARM, RePast, NetLogo y StarLogo, AgentSheet, OBEUS, MASON, AsCape, AnyLogic, CORMAS. Una selección importante provee licencia con código abierto, permitiendo a los modeladores desarrollar sus propias creaciones sobre el trabajo previo de otros investigadores. Esto minimiza el tiempo y coste en la creación de nuevos modelos (Parker, 2005), lo que, sin duda, siempre resultará enriquecedor desde el punto de vista científico.

Aunque existan amplias opciones en cuanto a la aplicación de MBA, Castle y Crooks (2006) resaltan que existe una serie de limitaciones en cuanto al uso de estos sistemas de modelación o simulación. Entre ellos el esfuerzo sustancial para comprender cómo diseñar e implementar un modelo en algunos programas; la dificultad de comprensión o aplicaciones diferentes del código de programación de modelos producidos por otros investigadores; la exigencia de tener un conocimiento previo del lenguaje de programación requerido; o la posible falta de funcionalidades deseadas o requeridas.

Desafortunadamente, además de las desventajas presentadas, podemos afirmar que la relación entre el poder de simulación de los programas existentes y la dificultad para desarrollarlo suele ser directamente proporcional, principalmente por el alto nivel de complejidad en cuanto al comportamiento humano en modelos, por ejemplo, de cambios de ocupación del suelo. Según Agar-

wal *et al*. (2002), en la modelación, las dos dimensiones básicas que definen un estado inicial sobre el cual los procesos biofísicos y humanos acontecen son el tiempo (ejecución a corto o largo plazo) y el espacio (representación espacial de los datos). Pero, en los modelos que incorporan procesos humanos, como es el caso de los MBA, aparece una tercera dimensión presentada como toma de decisiones humana (capacidad en cuanto al tratamiento de procesos de decisión humanos). La complejidad del modelo se indica según la combinación de diferentes niveles que se representan en estas tres dimensiones. El siguiente esquema explica los niveles de complejidad de algunos tipos de modelos de estudios de cambios de ocupación del suelo (Figura 2). En ese gráfico, los MBA se podrían localizar en el punto coincidente de los niveles máximos de todos los ejes.

Otro desafío destacable es la integración entre los MBA y los SIG. En principio pueden estar vinculados de diferentes formas y a diferentes niveles. Los modelos pueden leer los datos espaciales del mundo real a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) o también potencialmente publicar resultados en un formato legible por éste. Si las funcionalidades SIG son solicitadas en tiempo de ejecución, se pueden crear modelos integrados, que pueden ser: (1) programas SIG y MBA independientes que se comunican vía archivos independientes; (2) modelos que utilizan programas independientes pero que se comunican a través de base de datos compartidas o memoria virtual y; (3) modelos *stand-alone* que implementan funcionalidades SIG dentro del propio modelo MBA (Parker, 2005). De todas formas, pocos MBA poseen una interacción completa entre el proceso de simulación y la representación en un SIG. Entre ellos un modelo que destaca, en cuanto al desarrollo de herramientas que permitan esa conexión, es el *RePast* (a través de la extensión *Agent Analyst* de ArcGIS).

Todo lo expuesto refuerza la dificultad de implementar los componentes de un MBA en un modelo, ya que se debe tener en cuenta los diferentes agentes, su heterogeneidad y subagrupación, las relaciones con el exterior (otros agentes o el medio), la dinámica de interactuación entre todos los elementos de forma simultánea, el aspecto temporal de cambios y la representación espacial. La difícil tarea de estructurar el modelo y ponerle a punto de ejecución puede ser minimizada – aunque no eliminada – con la programación orientada a objetos, que ofrece un marco excelente que facilita estos tipos de representación y, además, permite la descripción de autómatas simples y colectivos de forma adecuada (Smith et al., 2005).

2.3.- Verificación y Validación

Una vez desarrollado, todo programa computacional debería ser verificado para saber si el mo-

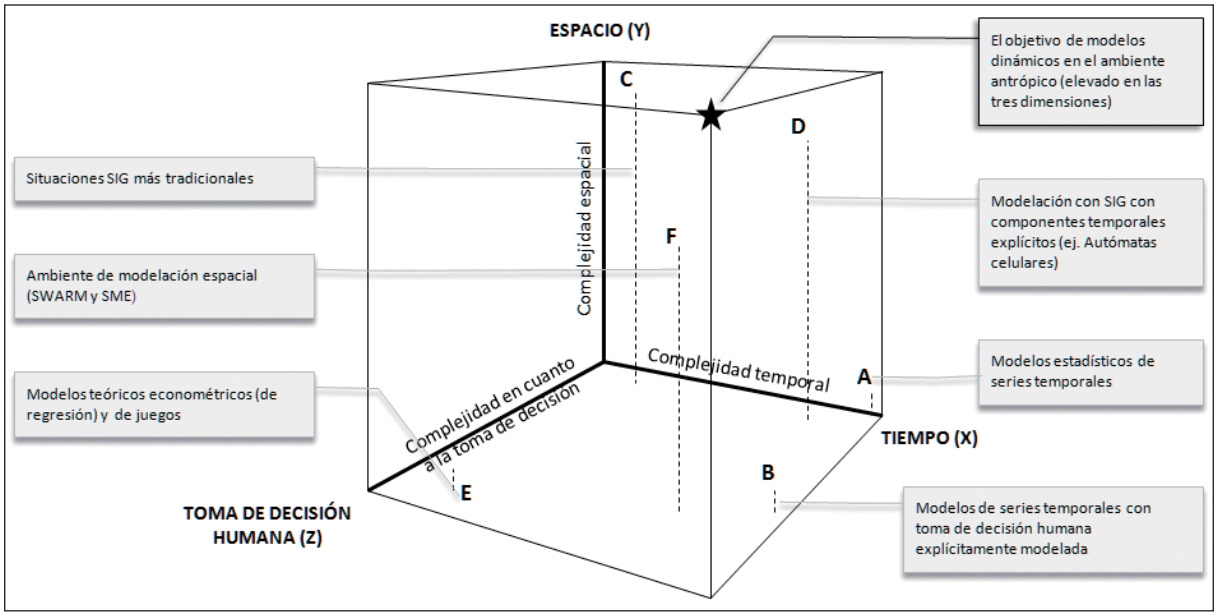


Figura 2.- Nivel de complejidad de modelos de cambios de usos del suelo según los tres niveles de complejidad (adaptado y traducido de Agarwal *et al*., 2002).

delo está correctamente construido e implementado y se comporta conforme a lo esperado. Esta validación interior (Axelrod y Tesfatsion, 2006) puede ser llevada a cabo a través del análisis de los resultados en distintas situaciones. En general podemos decir que la dificultad reside en que un programador no puede conocer si los resultados no esperados son reflejo de un error en el programa computacional (un *`bug´*), errores lógicos del modelo, o una consecuencia de una característica emergente del propio modelo (Gilbert y Terna, 1999[2]). Por ese motivo, realizar este procedimiento resulta especialmente difícil en simulaciones complejas. La ejecución repetida del modelo puede producir resultados diferentes, lo que complica aún más el proceso de verificación (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Una vez verificado el modelo, debería procederse a su calibración y validación. La calibración consiste en comprobar si la configuración de la estructura y los valores de los parámetros del modelo reflejan correctamente el mundo real, lo que normalmente requiere datos de procesos a micro-nivel (Castle y Crooks, 2006). Con la validación se pretende asegurar si el comportamiento del modelo corresponde al comportamiento del objetivo para el que fue diseñado (Gilbert y Troitzsch, 2005). Esta validación debería realizarse a través de la comparación de los resultados obtenidos con datos semejantes del mundo real (Castle y Crooks, 2006). Aún así, un modelo no puede simplemente clasificarse como válido o no válido, ya que estas dos clases son los extremos de distintos grados de validez (Law y Kelton, 1991[3]). Además, hay que tener presente que en un MBA se modelan situaciones futuras basadas en una serie de variables de entrada que pueden alterarse según el escenario deseado, no existiendo datos reales futuros con los que comparar los resultados, por lo que su validación completa resulta bastante difícil.

Por otro lado, también es deseable la ejecución de un análisis de sensibilidad del modelo que nos aporte información sobre la robustez de los resultados (Castle y Crooks, 2006). El objetivo de este proceso es saber hasta qué punto el modelo es sensible a pequeños cambios en los parámetros y condiciones iniciales, permitiendo volver a analizar los resultados después de cambiar sutilmente los datos de entrada (Gilbert y Troitzsch, 2005). Sin embargo hay que tener en cuenta que los sistemas complejos pueden exhibir cambios bruscos y repentinos en el comportamiento del sistema como resultado de ligeras perturbaciones en los datos de entrada (Manson, 2007).

Calibración y validación son sin duda las dos cuestiones más difíciles respecto a la aplicación y desarrollo de un MBA. Aunque pueda haber correspondencia entre el resultado del modelo y el mundo real, eso no supone una condición suficiente para concluir que el modelo está correctamente elaborado (Gilbert, 2005). Los estudios de análisis de sensibilidad son un poco más comunes y necesarios cuando estos modelos se utilizan para la simulación de situaciones futuras que no pueden ser contrastadas con datos reales. En estos casos sólo es posible llevar a cabo una validación parcial. Aunque todavía esta práctica no es muy habitual y es un tema todavía abierto y pendiente, encontramos ya en la literatura algún ejemplo en este sentido. Así, Acosta-Michlik *et al.* (en prensa) analizan las variaciones que un modelo de cambios de usos del suelo podría sufrir al variar algunos de los parámetros globales de entrada y de las reglas de decisión de los agentes (en este caso agricultores).

3.- Aplicación de Modelos Basados en Agentes en los Estudios Urbanos

La simulación en las ciencias sociales se ha visto influenciada de forma significativa por el desarrollo de la teoría de los autómatas celulares (en la física y matemática) y de la ciencia de la computación (inteligencia artificial distribuida y tecnología de agentes) (Gilbert y Troitzsch, 2005). En general, los modelos utilizados en estas simulaciones suelen producir diferentes tipos de análisis y escenarios prospectivos, que pueden ser desagrupados en predictivos (carácter descriptivo), exploratorios (carácter explicativo), o normativos (deseado) (Parker *et al.*, 2001; Aguilera Benavente *et al.*, 2010).

2 Citado en Castle (2006).

3 Citados en Castle y Crooks (2006).

3.1.- Tipos de Escenarios de Simulación Urbana

En la literatura encontramos algunas clasificaciones de escenarios de simulación según el tipo de resultado que se pretenda obtener. Partimos de la suposición de que los escenarios de simulación de crecimiento urbano son, en principio, prospectivos, correspondiéndose generalmente con situaciones futuras probables, posibles o deseables. De esa forma, los tres tipos de escenarios producidos (predictivos, exploratorios y normativos), varían según la orientación futura que representan (Aguilera Benavente *et al.*, 2010). En la tabla 1 se resumen algunas características de estos tres grupos, compilados a partir de trabajos de varios modeladores.

El primer grupo representa escenarios probables, que tienen como objetivo conocer lo que puede suceder en un plazo de tiempo generalmente corto (Aguilera Benavente *et al.*, 2010). Dentro de estos escenarios predictivos, hay una ramificación que se basa, o en las predicciones *per se*, o en las técnicas *what if?* (¿qué sucedería si...?). Este último se considera más adecuado en estudios de simulación de expansión urbana por permitir generar varias posibilidades según variaciones en los datos de entrada, lo que es muy útil en función de la gran complejidad del fenómeno y de la dinámica acelerada de los cambios urbanos. Este grupo enfatiza principalmente los resultados y la validez del modelo.

El segundo grupo, de escenarios exploratorios, muestra evoluciones posibles de crecimiento, y contestan a la pregunta ¿qué puede pasar? , en el caso de que un planteamiento u otro se elija en base a una teoría o hipótesis. Los dos ramos de este grupo son escenarios externos y estratégicos (Börjeson *et al.*, 2005). Mientras el primero se centra en las evoluciones de los sistemas como consecuencia de factores que escapan al campo de acción del planificador, como son los aspectos globales, económicos, etc., los estratégicos describen una serie de posibles consecuencias en base a decisiones estratégicas. El principal enfoque de los escenarios exploratorios se centra en las decisiones a tomar.

ESCENARIO	PREDICTIVOS	EXPLORATORIOS	NORMATIVOS
Pregunta	¿Qué pasará?	¿Qué puede pasar?	¿Qué debería pasar?
Escenarios futuros	Probable	Posible	Imaginario
Carácter	Descriptivo	Explicativo	Deseado
Objetivos	• Extrapolar tendencias • Evaluar escenarios • Predecir estados futuros • Imitar el mundo real	• Explorar teorías • Generar hipótesis • Probar hipótesis	• Discutir metas deseables • Imaginar el futuro ideal
Variación de escenarios	*Predicción o what if?*	Externos o estratégicos	De optimización o de transformación
Énfasis	Resultados y validez	Decisiones a tomar	Planteamiento de transformaciones necesarias
Resultados	Esperanza de que esté bien	Ejerce cierto control sobre los resultados	Control total sobre resultados
Modelos más comúnmente utilizados	MBA	MBA, CA, Regresión logística	CA, AMC (multicriterio)

Tabla 1.- Resumen de las características de los distintos tipos de modelos prospectivos de simulación urbana (compilado a partir de Couclelis, 2001; Parker *et al.*, 2003; Börjeson *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2009 y Aguilera Benavente *et a*l., 2010).

Por último, los escenarios normativos consisten en generar escenarios óptimos según metas deseables. Este grupo responde a la pregunta ¿qué debería pasar?, y su enfoque está principalmente en el planteamiento de las transformaciones necesarias para alcanzar un estado determinado.

Así dicho, los tres grupos de escenarios, predictivos, exploratorios y normativos, tienen enfoques distintos y algunos modelos son más comúnmente usados en una u otra orientación. En el caso de los MBA, concretamente en aplicaciones urbanas, pueden encajarse en uno o más de los enfoques presentados, ya que se consideran como un laboratorio en miniatura, donde los atributos y el comportamiento de los agentes y el medio en el cual se establecen pueden ser alterados, y sus repercusiones pueden ser observadas a lo largo de la ejecución de varias simulaciones (Castle y Crooks, 2006). De esta forma, encajarían en los escenarios *what if?* por tratarse de un modelo que sirve, no solo para extrapolar tendencias, sino también para visualizar las probables modificaciones en el territorio a partir de cambios en las variables iniciales. Por otro lado, los MBA podrían utilizarse en el contexto de escenarios exploratorios estratégicos, por plantear cómo la realidad debería, o sería, bajo determinadas circunstancias, aunque no pretende reproducir sistemas actuales (Parker et al., 2003). Por último, aunque todavía no es muy común, también empiezan a aparecer en la literatura estudios de MBA en el contexto de estudios normativos (Hollander y Wu, 2011).

3.2.- Potencialidades y Deficiencias de los MBA

En el contexto de los modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, y más concretamente a los temas urbanos, los MBA son considerados modelos muy adecuados. Las principales características de los modelos basados en agentes son la posibilidad de considerar el comportamiento de los agentes al estudiar los cambios territoriales; permitir el movimiento libre de los agentes en el área de estudio, no estando restringidos a una vecindad inmediata (pudiendo ser los agentes, incluso, entidades no espaciales); y la capacidad de capturar fenómenos emergentes, que reflejen el comportamiento individual en la aparición de patrones espaciales. Algunos autores consideran los MBA modelos idóneos para trabajar con fenómenos complejos (como las dinámicas urbanas) debido a la relativa facilidad que estos presentan para incorporar algunas de sus características, como autoorganización, caos, adaptación, etc.

A pesar de tales opiniones, es innegable que los fenómenos complejos poseen algunas características que los hacen difíciles de modelar. La principal de ellas es la emergencia, que se caracteriza por la aparición de patrones macroscópicos que surgen a partir de interacciones locales de entidades individuales (Epstein y Axtell, 1996). Los MBA son capaces de capturar estetipo de fenómenos, pero también son bastante sensibles a las condiciones iniciales del sistema y a pequeñas variaciones en las reglas de interacción (Couclelis, 2001), resultando difícil la reproducción de productos idénticos a partir de la ejecución del mismo modelo.

Además de la capacidad de capturar fenómenos emergentes, otra de las principales ventajas que los MBA ofrecen en cuanto a las simulaciones espaciales es que éstas se benefician de las posibilidades de movilidad que ofrecen. La implementación de las interacciones entre los agentes puede ser fácilmente gestionada según el espacio, redes o una combinación de estructuras. Los MBA pueden regular comportamientos basados en interacciones en una distancia y dirección específicas. Así, estos modelos disponen de un marco robusto y flexible para sintonizar la complejidad de los agentes (por ejemplo, su comportamiento, grado de racionalidad, habilidad de aprender y evolucionar, y reglas de interacción).

Por otro lado, es sabido que cada simulación está modelada de forma que responda a las necesidades particulares según los intereses del modelador o exigencia del usuario final, y lo mismo sucede con los MBA. Por su planteamiento inicial en cuanto a la selección de agentes, medios y reglas de interacción (pero principalmente por los factores subjetivos a ellos vinculados), estos modelos son difícilmente replicables en otras áreas de estudio de forma directa. En este sentido, y tal y como afirman Castle y Crooks (2006), estos modelos, como otros muchos, son tan útiles como el propósito por el cual fueron construidos.

Finalmente, entre las principales limitaciones técnicas habría que destacar que los MBA contemplan los sistemas modelados a un nivel de detalle que normalmente involucra la descripción de atributos y comportamientos de muchos agentes y sus interacciones con el medio (Castle y Crooks, 2006). Esto estaría en clara contraposi-

ción con el principio KISS *(Keep It Short and Simple)*, que apoya la elaboración y diseño de modelos sencillos y de fácil comprensión. Según Axelrod (2005), la simplicidad es un factor positivo en el desarrollo de los MBA y su complejidad intrínseca no debe encontrarse en las suposiciones del modelo, sino en los resultados simulados.

A pesar de las limitaciones presentadas, la investigación con aplicaciones de MBA en simulaciones de expansión urbana despierta un creciente interés y desarrollo. Las potencialidades que presentan, en contraposición a las deficiencias que se puedan identificar, los hacen bastante adecuados para estudiar el comportamiento de los agentes y los cambios territoriales resultantes de sus interacciones.

3.3.- Aplicaciones

Como ya se ha mencionado, los MBA desde su aparición han sido aplicados a numerosos y variados campos. En geografía, fue sólo en la última década cuando empezaron a ser considerados como un modelo de interés, especialmente al ser aplicables al estudio de dinámicas territoriales, integrando fenómenos sociales y económicos, aspectos clave de la geografía humana. Aunque encontremos algunas aplicaciones en este campo, si nos ceñimos a los estudios de crecimiento urbano, apenas encontramos en la bibliografía trabajos basados en MBA, principalmente al compararlo con su amplia y previa aplicación en otros campos. A continuación presentaremos una breve selección de aplicaciones de MBA a estudios de simulación de expansión urbana, la mayoría a escala intra-urbana.

En primer lugar habría que mencionar los trabajos del grupo de investigación de CASA *(Centre for Advanced Spatial Analysis – University College London)*, dirigido por Michael Batty. Uno de ellos simula la evacuación de peatones en la estación de metro *King´s Cross St. Pancras* en Londres (Castle, 2006), a partir de la definición de movimientos y comportamientos individuales que se convierten en movimientos agregados en casos de emergencia; o el control y análisis del comportamiento de multitudes en el desfile de Carnaval de *Notting Hill* (Batty *et al*., 2003) donde se simula el movimiento de las personas en la calle, estudiando la formación de cuellos de botella e intentando reducir la congestión hasta que se pueda planificar una solución segura en cuanto a las rutas establecidas. También destacamos el modelo STREETS (Schelhorn *et al*., 1999), que simula el movimiento de peatones en un distrito urbano, que a su vez tienen actividades y destinos pre-definidos y programados. El objetivo del modelo es entender las rutas alternativas que trazan los agentes influenciados por su localización y elementos de atracción.

Uno de los pocos ejemplos de aplicaciones de MBA a escala regional lo constituye el modelo HILIFE *(Household Interactions through LIFE Cycle Stages)* (Fontaine y Rousevell, 2009), cuyo objetivo principal es modelar la demanda residencial en la región policéntrica de East Anglia – Reino Unido. Este modelo simula patrones urbanos de usos del suelo en una escala regional, integrando el conocimiento cualitativo de las preferencias de localización residencial de diferentes agentes (población) con los análisis cuantitativos de las dinámicas de crecimiento urbano, para un período de 25 años. En este modelo, la preferencia de los agentes se define principalmente por la etapa de su ciclo de vida (infancia, familias con o sin hijos, vejez) y sus cambios, identificado como el factor predominante de decisiones de localización residencial (cercanía a elementos de atracción territorial), por encima, inclusive, de motivos económicos (Figura 3).

Otro ejemplo es el modelo OBEUS *(Object-Based Environment for Urban Simulation)*, que ha sido una referencia importante en cuanto a MBA aplicados a escala regional, ya que fue diseñado específicamente para simulación de fenómenos urbanos. Este modelo pretende ser el nivel operativo de la teoría de los *Geographic Automata Systems* (GAS) (Benenson y Torrens, 2004), que sostiene que los conceptos de los CA y los MBA podrían estar idealmente combinados. Los GAS consideran que un sistema urbano está compuesto por objetos fijos (casas, carreteras) o no-fijos (personas, coches) relacionados. Un trabajo destacable es la simulación de la distribución de residencia étnica en Tel Aviv entre 1955-1995, que es ocupado conjuntamente por árabes y judíos. El modelo demuestra la importancia de aspectos cualitativos en la elección de residencia a través de MBA (Benenson *et al*, 2002; Benenson y Torrens, 2005). Según estos autores, GAS y OBEUS pueden servir como un marco universal para simulaciones urbanas orientadas a objetos.

El modelo SLUDGE *(Simulated Land Use Dependent on Edge Effect Externalities)*, creado por Dawn Parker (2005) y desarrollado en la plataforma *RePast*, es un modelo combinado de MBA

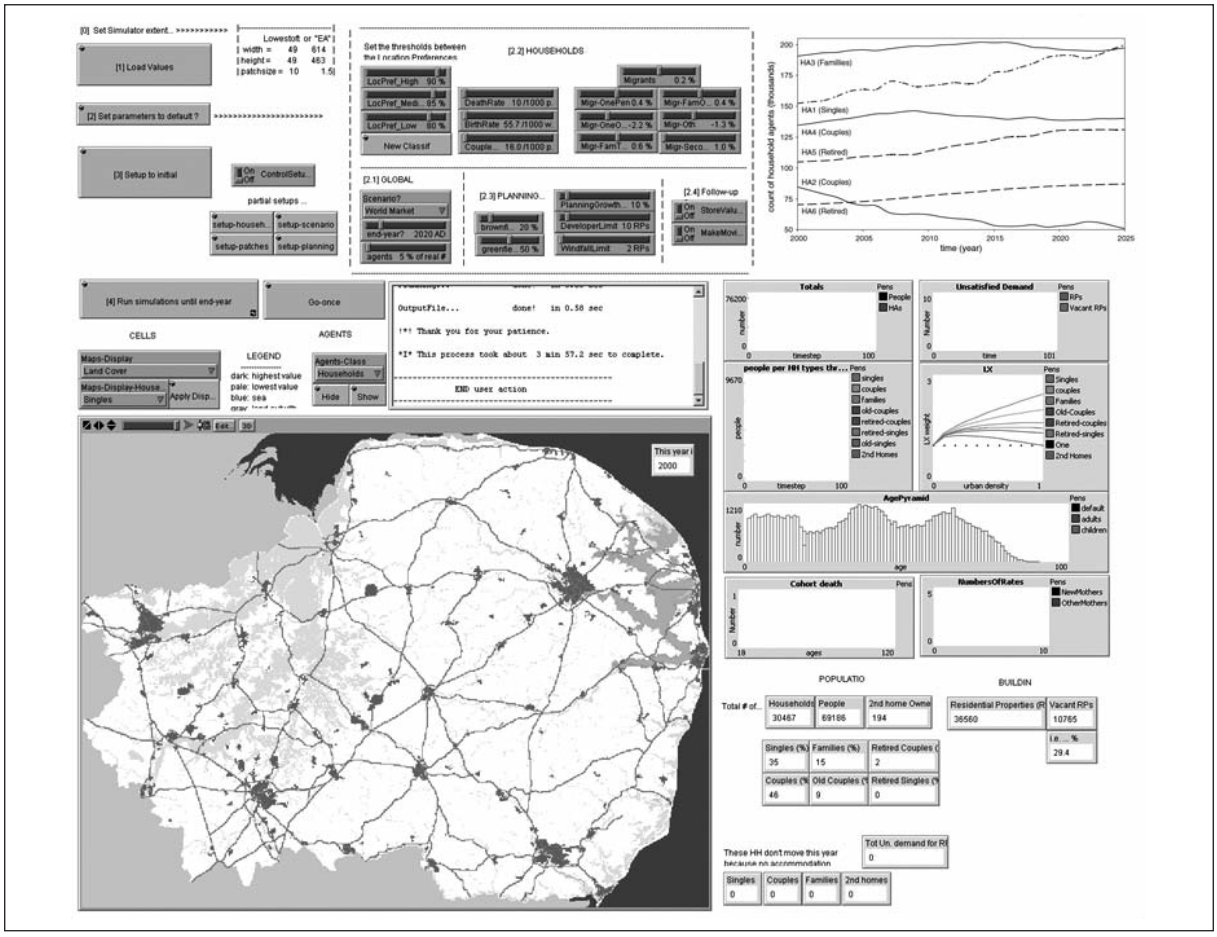


Figura 3.- Interface del modelo HI-LIFE en NetLogo y proyección demográfica de agentes para simulación de 25 años (Fontaine y Rounsevell, 2009).

y AC, diseñado para el estudio de la influencia articulada de externalidades y costes de transporte en función de la distancia, en los patrones de usos del suelo. Aunque se aplica principalmente a temas relacionados con la agricultura sería posible, con algunos ajustes, replantear su aplicación a simulaciones de crecimiento urbano.

Por último, el proyecto SLUCE *(Spatial Land Use Change and Ecological Effects)* y su modelo SOME (SLUCE´s Original Model for Exploration), desarrollado sobre la plataforma SWARM, tiene como objetivo explorar la dinámica de crecimiento en la franja urbano-rural, teniendo en cuenta la influencia del patrimonio paisajístico en el desarrollo de estas áreas.

En España, existen investigaciones de modelos basados en agentes aplicados a áreas distintas a la urbana. Por ejemplo, publicaron recientemente documentos sobre estos temas el Grupo de Investigación en Sistemas Complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto para Sistemas Complejos y Físicos Cros disciplinares – IFISC de la Universidad de las Islas Baleares y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el Centro de Ingeniería de Sistemas Sociales – INSISOC de las Universidades de Valladolid y Burgos, el Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial – IIIA del Consejo Superior de Investigaciones Científicas o el Centro de Tecnología de Información Inteligente – CETINIA de la Universidad Rey Juan Carlos. Sin embargo, por el momento desconocemos la existencia de aplicación de MBA enfocado a estudios de simulación de crecimiento urbano a escala regional en España.

4.- Conclusiones

En este artículo hemos pretendido presentar una visión general de la base teórica de los MBA, su definición, sus componentes y las principales aplicaciones, especialmente en el ámbito urbano. A partir de esta introducción teórica y de la discusión realizada a lo largo de este documento, po-

demos extraer algunas conclusiones principales. En primer lugar, queremos destacar que los Modelos Basados en Agentes constituyen un modelo innovador y prometedor respecto a otros modelos aplicados a simulación de la expansión urbana, debido principalmente a la potencialidad que presenta para incorporar aspectos del comportamiento individual de los agentes en fenómenos emergentes que generan un patrón espacial agregado.

Por ese motivo, en el campo de la geografía (aunque todavía no hayan sido ampliamente aplicados) estos modelos basados en agentes tienden a ocupar un espacio importante por demandar cada vez más, y especialmente en simulaciones de crecimiento urbano, una conexión fuerte de los MBA con la distribución espacial y temporal del fenómeno estudiado, así como por la interacción que pueden incorporar respecto a los cambios territoriales y dinámicas socioeconómicas.

En cuanto a los productos generados por los MBA, es evidente que los resultados obtenidos pueden ayudar a anticipar interacciones del sistema, modelar estructuras, generar escenarios y simular posibles evoluciones en el tiempo y en el espacio de fenómenos complejos. Estos, a su vez, pueden servir como apoyo a la toma de decisiones en el campo de la planificación urbana y la ordenación territorial en general.

Aunque estos modelos hayan tenido resultados bastante aceptables en el mundo científico, dado los artículos publicados recientemente, todavía existen algunas dificultades para realizar la verificación, validación y calibración de los MBA. De todas formas, ya existen algunos estudios en los que se han desarrollado procedimientos para elaborar modelos cada vez más robustos. Este tipo de análisis es necesario a la hora de estudiar fenómenos complejos como los urbanos, particularmente sensibles a las condiciones de partida del modelo.

A pesar de que el desarrollo de este tipo de modelos ha sido muy prolífico en los últimos años, todavía existe una laguna importante en cuanto a la descripción de los mismos, lo que impide entender en profundidad muchos de ellos e intentar reproducirlos. Esta deficiencia podría solucionarse a través de la aplicación del protocolo ODD. Otra limitación de los MBA estaría relacionada con su estructuración, porque aunque permitan simular fenómenos y generar resultados complejos, a la vez deben ser simples, por lo que se genera una interesante discusión respecto a la contraposición del principio *KISS versus* la complejidad intrínseca de estos modelos.

Quizás por los motivos presentados, o por otros aquí no identificados, se observa que hasta el momento no hay muchas aplicaciones en el ámbito urbano a escala regional. Concretamente en España, tampoco son suficientemente conocidas las investigaciones con MBA en el campo de las ciencias sociales (y particularmente en aplicaciones urbanas), aunque se han desarrollado otros tipos de estudios principalmente en el campo de la ecología, la informática y la economía.

Dado lo presentado, concluimos que hay una necesidad de ahondar en este campo de investigación aplicado a la simulación de fenómenos urbanos y generación de escenarios futuros. Este artículo pretende ser un primer paso para dar a conocer la existencia de los MBA a la comunidad hispana, presentar los aspectos principales de su estructura y sus potencialidades en cuanto a aplicaciones urbanas, y al mismo tiempo motivar el desarrollo de investigaciones en la línea de los modelos basados en agentes.

Agradecimientos

La autora de este trabajo agradece a su directora de tesis Dra. Montserrat Gómez Delgado por las acertadas correcciones y los comentarios valiosos realizados en esta revisión teórica. De igual forma, se agradece a los revisores anónimos de este trabajo por sus aportaciones y críticas constructivas, que permitieron realizar mejoras importantes.

Bibliografía

Acosta-Michlik, L., M.D. Rounsevell, M. Bakker, A. Van Doorn y M. Gómez Delgado (aceptado y en prensa). An agent-based model to assess land use change in a traditional agricultural landscape of Portugal. *Land Use Policy*.

Agarwal, C., G.M. Green, J.M. Grove, T.P. Evans y C.M. Schweik (2002). *A Review and Assessment of Land-Use Change Models - Dynamics of Space, Time, and Human Choice*. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA.

Aguilera Benavente, F., M. Gómez Delgado y C.C. Cantergiani (2010). Instrumentos de simulación

prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio* 165-166:481-496.

Aguilera Ontiveros, A. (2000). Simulaciones multiagentes de ambientes urbanos. *Vetas* Año II, 5:205-223.

Axelrod, R. (2005). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences, en: J.P. Rennard (Eds.). *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*. Idea Group, Hersey, PA.

Axelrod, R. y L. Tesfatsion (2006). A guide for newcomers to agent-based modeling in the social sciences, en: L. Tesfatsion y K.L. Judd (Eds.). *Handbook of Computational Economics. Agent-based computational economics*. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.

Batty, M., ed. (2005). *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Massachusetts Institute of Technology.

Batty, M., J. Desyllas y E. Duxbury (2003). Safety in Numbers? Modeling Crowds and Designing Control for the Notting Hill Carnival. *Urban Studies* 40:1573-1590.

Benenson, I., I. Omer y E. Hatna (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning* B 29:491-512.

Benenson, I. y P.M. Torrens (2004). *Geographic Automata Systems: A New Paradigm for Integrating GIS and Geographic Simulation*. Southampton.

Benenson, I. y P.M. Torrens (2005). A Minimal Prototype for Integrating GIS and Geographic Simulation through Geographic Automata Systems, en: P. Atkinson, G. Foody, S. Darby y F. Wu (Eds.). GeoDynamics, CRC Press, Boca Raton, London, New York.

Berdoulay, V. (2009). La historia de la Geografía en el desafío de la prospectiva. *Boletín de la AGE* 51:9-23.

Börjeson, L., M. Höjer, K.-H. Dreborg, T. Ekvall y G. Finnveden (2005). *Towards a user´s guide to scenarios - a report on scenario types and scenario techniques*. Final Report. Sweden, Foundation for Environmental Strategic Research.

Castle, C.J.E. (2006). Developing a Prototype Agent-Based Pedestrian Evacuation Model to Explore the Evacuation of King´s Cross St. Pancras Undergroud Station. *CASA Working Paper Series* 108.

Castle, C.J.E. y A.T. Crooks (2006). Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. *CASA Working Papers Series* 110.

Couclelis, H. (2001). Why I No Longer Work with Agents: A Challenge for MBAs of Human-Environment Interactions, en: *Meeting the Challenge of Complexity: Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/Land-Cover Change* (eds. D.C. Parker, T. Berger y S.M. Manson):3-4. Irvine, California, USA.

Epstein, J.M. y R. Axtell (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington D.C., MIT Press.

Epstein, J.M. (1999). Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity* 4(5):41-60.

Ferber, J., ed. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Reading, MA, Addison-Wesley.

Fontaine, C.M. y M.D. Rounsevell (2009). An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape. *Landscape Ecology* 24:1237-1254.

Franklin, S. y A. Graesser (1996). Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. *Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag.

Gilbert, N. (2005). Agent-based social simulation: dealing with complexity. Centre for Research on Social Simulation.

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

Grimm, V. y S.F. Railsback, eds. (2005). *Individual-based modeling and ecology*. Princeton, NJ, Princeton University Press.

Grimm, V., U. Bergerb, F. Bastiansena, S. Eliassenc, V. Ginotd, J. Giskec, J. Goss-Custarde, T.

Grandf, S.K. Heinzc, G. Huseg, A. Hutha, J.U. Jepsena, C. Jorgensenc, W.M. Mooijh y Muller (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecology Modelling* 198:115-126.

Hollander, C.D. y A.S.Wu (2011). The Current State of Normative Agent-Based Systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 14(2):3.

Macal, C.M. y M.J. North (2005). Tutorial on Agent-based Modeling and Simulation. *Winter Simulation Conference* (eds M.E. Kuhl, N.M. Steiger, F.B. Armstrong y J.A. Joines).

Manson, S.M. (2007). Challenges in evaluating models of geographic complexity. *Environment and Planning* B 34:245-260.

Matthews, R.B., N.G. Gilbert, A. Roach, J.G. Polhill y N.M. Gotts (2007). Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22:1447-1459.

O'Sullivan, D. y M. Haklay (2000). Agent-based models and individualism: is the world agent-based?, *Environment and Planning* A 32:1409-1425.

Parker, D.C. (2005). Integration of Geographic Information Systems and Agent-Based Models of Land Use: Prospects and Challenges, en *GIS, Spatial Analysis, and Modeling* (eds D.J. Maguire, M. Batty y M.F. Goodchild):403-422. Redlands, California, Esri Press.

Parker, D.C., T. Berger y S.M. Manson (2001). Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. *International Workshop* (eds D.C. Parker, T. Berger y S.M. Manson). Irvine, California, USA.

Parker, D.C., S.M. Manson, M.A. Janssen, M.J. Hoffmann y P. Deadman (2003) Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the American Association of Geographers* 93(2):314-337.

Polhill, J.G. (2010). ODD Updated. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13:9.

Railsback, S.F. y V. Grimm (2009) *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*, Princeton University Press.

Railsback, S.F., S.L. Lytinen y S.K. Jackson (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *Simulations* 82:609-623.

Schelhorn, T., D. O'Sullivan, M. Haklay y M. Thurstain-Goodwin (1999). STREETS: An agent-based pedestrian model. *CASA Working Paper Series* 9.

Serenko, A. y B. Detlor (2002). Agent Toolkits: A General Overview of the Market and an Assessment of Instructor Satisfaction with Utilizing Toolkits in the Classroom
(ed http://foba.lakeheadu.ca/serenko/Agent_Toolkits_Working_Paper.pdf).

Shelling, T. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology* 1:143-189.

Smith, M.J.d., M.F. Goodchild y P.A. Longley (2009). *Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tool*. Leicester, Reino Unido, Matador.

Tobias, R. y C. Hofmann (2004). Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7, 1.

Torrens, P.M. y I. Benenson (2005). Geographic Automata Systems. *International Journal of Goegraphical Informations Science* 19:385-412.

Wooldridge, M. y N.R. Jennings (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review* 10:115-152.

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2014): "Desarrollo de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano: Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable*", XVI Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica (Teledetección y SIG en los estudios de paisaje y medio ambiente),* Universidad de Alicante, 25-27 junio 2014. (Disponible en: http://congresotig.ua.es/index.php/tig/tig2014/paper/view/12/92, último acceso: abril/2017)*

XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica
25, 26 y 27 de Junio de 2014. Alicante.

Desarrollo de un Modelo Basado en Agentes para la simulación del crecimiento urbano: Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable

Carolina Cantergiani[a*]; Montserrat Gómez Delgado[a]; Cesar Vergara[b]

[a]*Universidad de Alcalá - Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente*
[b]*Universidad de Sevilla - Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial*

Resumen

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) están siendo cada vez más utilizados en la simulación de sistemas espaciales complejos, como es el caso del crecimiento urbano. En la presente comunicación se introduce parte de un modelo desarrollado para la simulación de la expansión urbana en el Corredor del Henares (Madrid), concretamente el relacionado con los agentes *planificadores urbanos* que asignan nuevo suelo urbanizable en esta área de estudio. Este submodelo constituye una parte importante del modelo general, cuya simulación pretende mostrar propuestas de nuevas áreas urbanizables de acuerdo a unas determinadas preferencias espaciales. El potencial de fundamentar esta decisión en un MBA reside en una configuración flexible que permite que la importancia dada a cada capa sea modificable, posibilitando generar diferentes escenarios de simulación. El comportamiento de planificadores urbanos con diferentes perfiles – ambiental, económico, social, especulador u otros – puede ser simulado en función de los ajustes realizados en la configuración inicial. Las preferencias de estos agentes están basadas en elementos como: distancia a áreas urbanas consolidadas, transporte público o carreteras, y existencia de equipamientos de educación y salud. Los resultados muestran las posibles nuevas distribuciones de suelo urbanizable según los criterios elegidos, y se pueden ver gráficamente en la propia interfaz del programa, o generar archivos en diferentes formatos de salida.

Palabras clave: Simulación Basada en Agentes; Corredor del Henares; Crecimiento Urbano; Planificadores Urbanos; Clasificación del suelo; Escenarios de Simulación.

[*] *E-mail:* carolina.carvalho@uah.es

1. Introducción

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) están siendo cada vez más utilizados en la simulación de sistemas espaciales complejos, como es el caso del crecimiento urbano. Consiste en un modelo celular que considera el comportamiento de los agentes del sistema para realizar una simulación. Sus principales componentes son los propios agentes, el entorno y las relaciones que existen entre ellos, plasmadas en el modelo a través de reglas de decisión (Gilbert, 2008; Cantergiani, 2011). Además, es un modelo que permite a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009), o entender cómo el propio sistema afecta al individuo (Grimm y Railsback, 2005). Aunque los MBA se hayan aplicado intensivamente en disciplinas como ecología, economía, demografía, todavía está infra explorada su aplicación a ciencias sociales, y más en concreto a estudios sobre crecimiento urbano. Las publicaciones en este ámbito son muy novedosas y sólo recientemente empiezan a salir a la luz, principalmente se trata de estudios aplicados a escala local, pero también algunos a escala supramunicipal (Sanders et al., 1997; Barros, 2004; Benenson y Torrens, 2004; Fontaine y Rousevell, 2009), que es la utilizada en esta investigación. La aplicación de MBA para simulaciones urbanas está poco a poco extendiéndose debido a su elevado potencial de modelización, lo que facilita el entendimiento de estos fenómenos complejos.

El modelo en desarrollo pretende ser una herramienta para simular la expansión urbana en el Corredor del Henares (Madrid), y consta de submodelos independientes para cada uno de los tres agentes diseñados como protagonistas de este proceso: planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Se considera que el comportamiento conjunto principalmente de estos tres agentes, induce la dinámica urbana en el área de estudio. Los tres submodelos mencionados son independientes en su elaboración, pero dependientes funcionalmente, ya que los datos de entrada y los resultados obtenidos, así como la toma de decisión final, se generan en función de los productos de los demás submodelos, conforme se indica en la Figura 1.

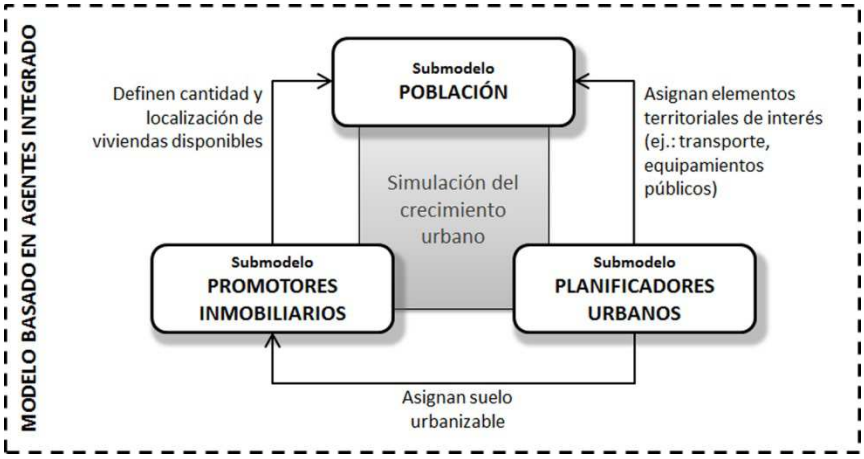


Fig. 1. Estructura del modelo basado en agentes integrado

Este documento se centra en mostrar el desarrollo del submodelo del comportamiento de los planificadores urbanos, que tiene como finalidad la asignación de nuevo suelo urbanizable y constituye una parte importante del modelo general. Consideramos que los planificadores urbanos ejercen una influencia sobre el territorio

que de cierta forma induce y dirige la futura ocupación residencial, a través principalmente de nuevas propuestas de clasificación del suelo.

Se sabe que la planificación urbana es un instrumento potente definido en las normativas urbanísticas españolas para ordenar el territorio, y aunque sea generalmente una herramienta con enfoque de arriba hacia abajo (*top-down*), está evolucionando a procesos más participativos. Ya decía Giddens en 1984 (Giddens, 1984) que las regiones y lugares no sólo se ven como espacios a ser planificados o diseñados por una autoridad, sino también como un medio que influye y es influenciado por interacciones de diferentes actores, por lo que la consideración de estos procesos de planificación en un MBA pueden ser acertadas – y principalmente cuando se basa en la escala supramunicipal propuesta.

A nivel regional, la Comunidad de Madrid carece de planes de ordenación territorial, por lo que se echa de menos decisiones uniformes en cuanto a disposiciones territoriales (Valenzuela Rubio, 2011). No obstante, a nivel municipal la revisión de la planificación, y en concreto la asignación de nuevas áreas urbanizables, se genera a partir de una serie de criterios espaciales obedeciendo ciertas normativas urbanísticas (de protección, edificatorias, etc.). Esta asignación es normalmente generada a partir del análisis geográfico simple de capas espaciales con información territorial gestionadas en un SIG. Sin embargo el potencial de fundamentar este submodelo en un MBA reside en proporcionar una configuración flexible que permite que la importancia dada a cada capa sea modificable, posibilitando generar diferentes escenarios de simulación. El comportamiento de planificadores urbanos con diferentes perfiles puede ser simulado en función de los ajustes realizados en la configuración inicial en cuanto a las preferencias espaciales sobre dónde asignar nuevas áreas urbanizables.

El área de estudio (Figura 2), al estar muy próxima al municipio de Madrid sufre de forma clara su influencia, constituyéndose en un corredor industrial y residencial importante hacia Guadalajara, cuyo eje central está compuesto por los municipios de Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares. Otros 14 municipios también son considerados para la aplicación del modelo, ya que en conjunto presentan una intensa y muy relacionada dinámica urbana. Por ello se considera un área de potencial interés para proceder a un análisis de la expansión urbana y simulación de su crecimiento, y teniendo en cuenta, además, que la mayoría de los municipios no poseen planificación urbana actualizada, por lo que puede constituir una herramienta muy útil de soporte a la planificación territorial.

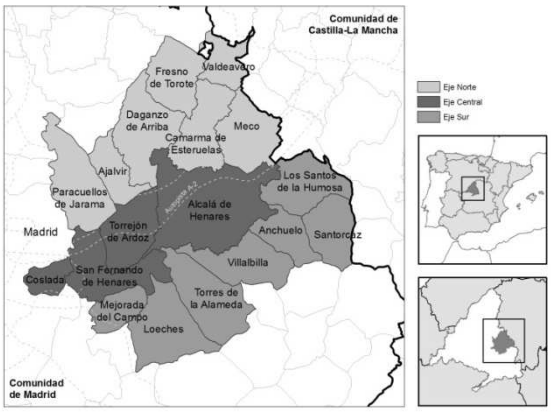


Fig. 2. Delimitación del Corredor del Henares, con sus ejes central, norte y sur.

2. Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable

En el submodelo dedicado a simular el comportamiento de los planificadores urbanos en cuanto a la asignación de nuevas áreas urbanizables, la toma de decisión podría diferenciarse según la orientación política o directrices urbanísticas, por ejemplo, sobre todo si consideramos el nivel municipal, pudiéndose presentar en cada municipio un comportamiento distinto. No obstante, en el planteamiento que se presenta, asumimos que los planificadores urbanos presentan un único comportamiento, y por lo tanto también serán representados por un único tipo y reglas de decisión para toda el área de estudio (en un contexto de planificación subregional o supramunicipal).

La descripción lógica de este submodelo, así como la presentación de su interfaz gráfica, facilitarán una mejor comprensión de la estructura y el funcionamiento del comportamiento a simular.

2.1. Lógica del modelo

Entre los elementos que podrían influir en el comportamiento de los planificadores urbanos, presentamos una selección de aquellos más significativos, considerando su disponibilidad y las escalas más adecuadas. Las variables se encuentran listadas en la Tabla 1, así como su forma de incorporación al modelo.

Tabla 1. Listado de variables a considerar por el planificador urbano para la asignación de áreas urbanizables.

Variables	Metadatos	Forma de incorporación al modelo
Clasificación del suelo	Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio de la CM (2003, 2006)	A través de la clasificación de suelos urbanos, urbanizables u otros, para delimitar el área de actuación del agente
Pendientes	Generado a partir del Modelo Digital del Terreno (CNTIG)	Como área de restricción al no poder asignar como urbanizables áreas con más de 10% de pendiente
Hidrografía	Base Cartográfica Nacional BCN200 (CNIG)	Como área de restricción al no poder asignar como urbanizables áreas a menos de 100m de los ríos
Espacios protegidos	Servicio de Información Ambiental de la CM (2011)	Como área de restricción al no poder asignar como urbanizables áreas como los Espacios Naturales Protegidos
Productividad agrícola	Reclasificación de datos de Usos del Suelo del Proyecto CORINE Land Cover (CNIG, 2006)	Como área de preferencia de asignación como urbanizables aquellas áreas menos productivas
Equipamientos no deseables	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (NOMECALLES)	Como área de preferencia al asignar como de interés aquellas más alejadas a estos equipamientos
Infraestructuras de carreteras	Adaptación de varias bases de datos (Servicio de Cartografía Regional de la CM y CNIG)	Como área de preferencia al asignar como de interés aquellas más próximas a las carreteras
Equipamientos de salud y educación	Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (NOMECALLES)	Como área de preferencia al asignar como de interés aquellas más próximas a ciertos equipamientos de salud y educación
Áreas urbanas consolidadas	Calculado a partir de información de la Clasificación del Suelo	Como área de preferencia al asignar como de interés aquellas más próximas a las áreas urbanas ya consolidadas

Para dar paso a la elaboración informática y gráfica de este submodelo, se desarrolló un diagrama esquemático en función de la acción que el agente realiza en cada fase. En una primera etapa es esencial definir la disponibilidad y distribución espacial de la superficie para su actuación (A), y en la siguiente, definir algunos criterios de interés espacial (B), tal como se detalla en la figura 3.

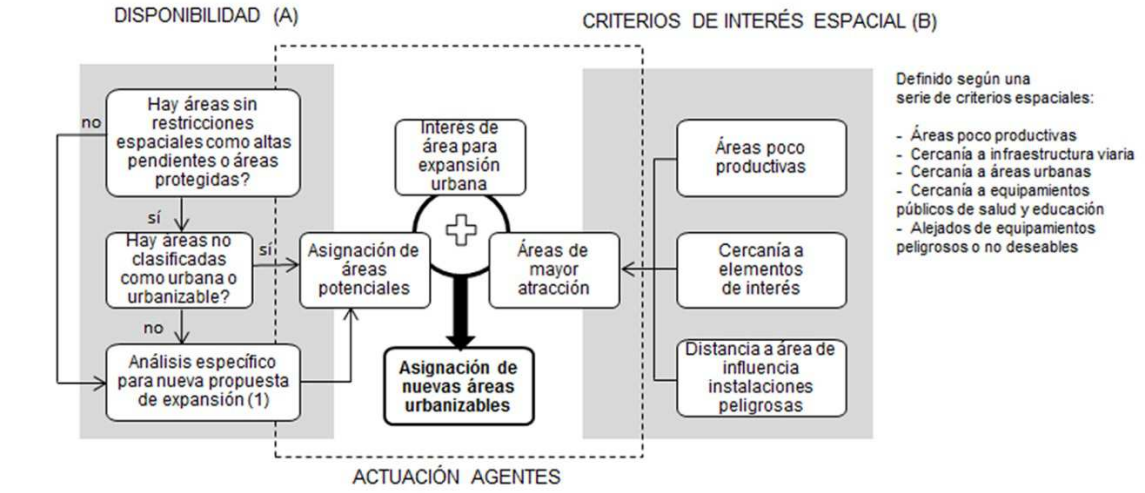


Fig. 3. Modelo conceptual de decisión del agente planificador urbano

Respecto a la disponibilidad de superficie para la actuación del planificador urbano, damos por supuesto que no es ilimitada, ya que no se puede asignar nuevas áreas como urbanizables en áreas de protección (Espacios Naturales Protegidos o riberas de ríos, por ejemplo), si ya es urbana consolidada, o si está en áreas con alta pendiente (superior al 10%), lo que en su caso la haría, en un principio, no apta para la urbanización. Partiendo de esta suposición, el primer paso es considerar una capa de restricción uniendo estos parámetros y limitando el área disponible.

La siguiente etapa consiste en definir un orden de preferencias en función de intereses según algunos criterios específicos, conforme se ve en la figura 3. Para que este modelo se pueda aplicar como un apoyo real a la planificación, estos parámetros se pueden variar conforme desee el usuario de acuerdo con un perfil específico, o quizás incluso conforme algún contexto sociopolítico. Esta asignación de pesos y porcentajes proporciona una flexibilidad al modelo, pues el usuario puede asignar diferentes niveles de importancia a cada una de las variables disponibles, y simular el resultado con diferentes escenarios de expansión de áreas urbanizables.

Otra dato de entrada fundamental del modelo es la cantidad de nuevas áreas urbanizables que se desea asignar en la simulación. La definición cuantitativa podría depender de varios factores, como la propia demanda de población o de los promotores inmobiliarios. En otros casos son inducidas por decisiones políticas y de intereses específicos en cuanto al desarrollo urbano en un determinado momento de apoyo a políticas más sociales, económicas o ambientales. En el presente caso, la dimensión del cambio dependerá del

propio usuario, que define este valor de expansión en la propia interfaz del programa para simular diferentes escenarios de expansión.

2.2. Interfaz gráfica

La interfaz de este submodelo consiste en tres bloques (figura 4). El primero consiste en la configuración inicial del sistema, que carga las capas de entrada y las representa espacialmente. El segundo bloque consiste en herramientas de interacción con el usuario a través de parámetros externos para la concreción de escenarios, que es donde se calibran los diferentes pesos a cada variable, así como donde se define la extensión de las nuevas áreas urbanizables que se pretenden localizar. El último es el bloque de las salidas y resultados, donde, posteriormente a la ejecución del modelo, se presenta espacialmente la asignación final.

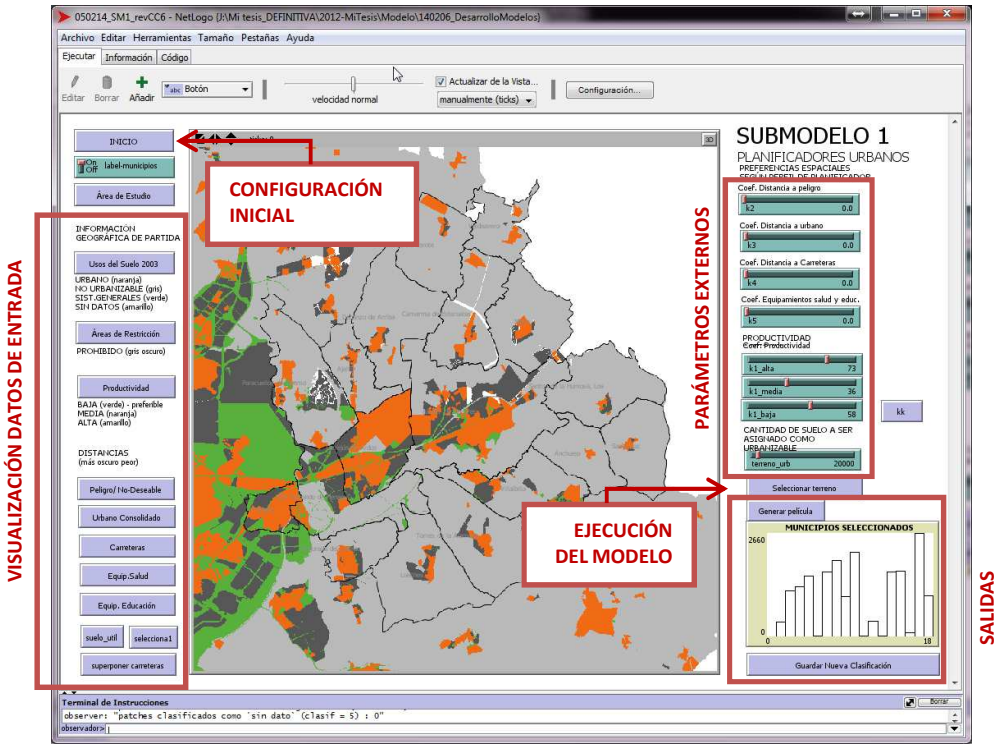


Fig. 4. Interfaz gráfica del submodelo de asignación de nuevas áreas urbanizables y sus herramientas de control

Los resultados pueden expresarse de diferentes formas en este submodelo:

- A través de la distribución espacial en el panel de visualización en la propia interfaz;
- Como gráfico de barras permitiendo una comparación visual de las nuevas superficies de áreas urbanizables en cada municipio, también en la interfaz del submodelo;
- En un archivo exportado en formato tabular que indica cada municipio con su respectivo código (para permitir posterior integración a un Sistema de Información Geográfica), contando también con la superficie total del municipio, la nueva superficie de suelo urbanizable y el porcentaje de ésta respecto al total;

- En un video exportado que muestra la distribución gradual de las nuevas superficies urbanizables representada dinámicamente en función de la ocupación de los espacios disponibles y las preferencias definidas en la configuración inicial.

Este submodelo fue desarrollado en la plataforma *NetLogo*, versión 5.0.3 (Wilensky, 1999) por disponer de una interfaz intuitiva y sencilla, y que a la vez permite la obtención de resultados muy visuales de los cambios producidos entre la situación inicial y la simulada. Además, otra ventaja importante es que el *NetLogo*, en sus últimas versiones, permite intercambio directo con datos geográficos en formato SIG, a través de extensión específica.

3. Resultados y conclusiones

Como ejemplo de su funcionamiento, simulamos un escenario aleatorio para un planificador de perfil más ambiental/conservador, y por ello con alto nivel de protección de áreas de elevada producción agrícola, y con especial atención a áreas cercanas a equipamientos no deseables (peligrosos o molestos), así como a la proximidad a áreas urbanas ya consolidadas (optimización de recursos). Suponiendo una demanda de nuevo suelo urbanizable de 30km^2, se ejecutó el modelo y se llegó a la siguiente distribución espacial (figura 5).

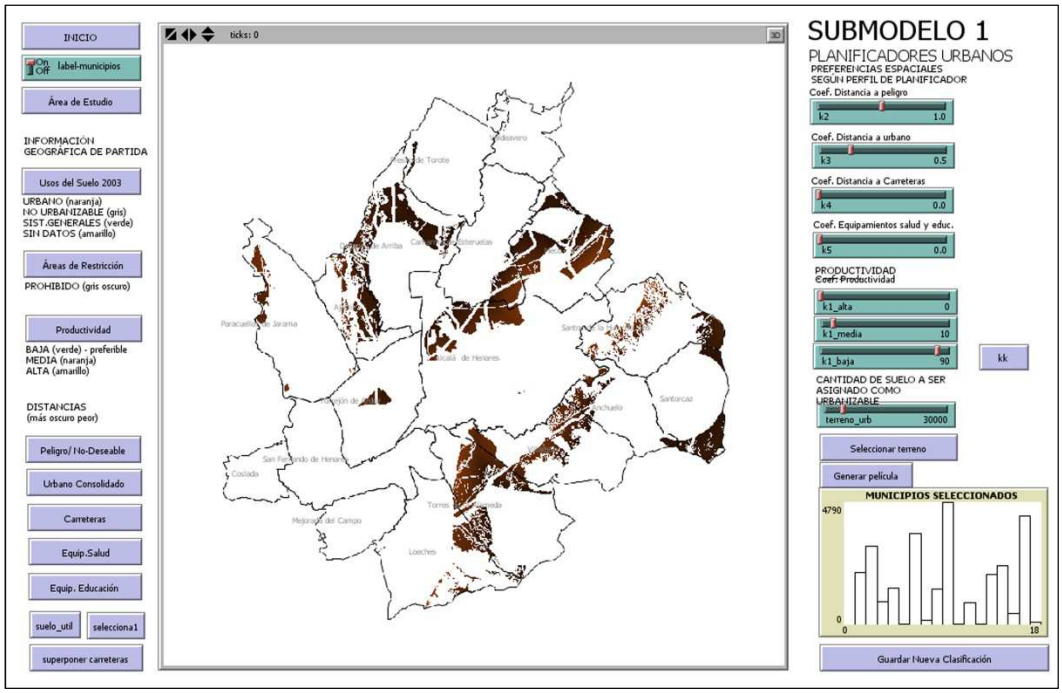


Fig. 5. Ejemplo de simulación de asignación de nuevas áreas urbanizables.

Los resultados de este ensayo son relativamente esperados, con propuesta para asignación de áreas urbanizables principalmente junto a las ciudades existentes, y de forma compacta, más sostenible. Los productos de salida (gráficos y tabla) muestran los porcentajes de estas áreas para cada municipio, presentando mayor porcentaje de conversión en áreas menos productivas y con menos restricciones (como es

el caso de Meco, Ajalvir y Torres de la Alameda con 34%, 26% y 24% de su superficie, respectivamente). Los resultados y comparaciones entre diferentes simulaciones no es el enfoque de este trabajo y por ello no se presentará en detalle, aunque pronto se espera publicarlo.

Aunque el potencial de un MBA reside en la posibilidad de considerar y atribuir diferentes comportamientos a los agentes que participan en la toma de decisiones (plasmados a través de un cambio espacial), este modelo en concreto no lo hace. En este caso, los agentes son entes con un perfil específico que toman una decisión espacial a partir de cruces de información geográfica y estadística, por lo que se podría concluir que su decisión es prácticamente determinística. Sin embargo, para que esté debidamente integrado y ejecutado el modelo final, es fundamental que este proceso decisorio esté planteado en el marco de un MBA, y que sea luego fácilmente ensamblado con los demás submodelos.

En este caso, el potencial del submodelo presentado en esta investigación reside principalmente en los escenarios que se puedan crear a partir de los datos disponibles. Con diferentes variaciones en los parámetros de entrada del sistema, se pueden generar simulaciones futuras muy interesantes, y que a su vez pueden servir de herramienta de apoyo a los planificadores urbanos en materia de ordenación territorial y desarrollo urbanístico. Hasta el momento, se desconoce el uso de MBA para apoyo a los planificadores urbanos, por lo que la presente propuesta se considera un avance en este sentido.

Por otro lado, otro resultado importante presentado en este documento es la estructuración del submodelo en sí mismo. Su desarrollo programático; la elección de las capas adecuadas para representar el comportamiento de los planificadores urbanos a escala supramunicipal; el procesamiento de los datos disponibles para calibración de la configuración de entrada, fueron los principales desafíos en la elaboración de este submodelo. En este sentido, consideramos que el programa es capaz de generar escenarios de simulación según diferentes comportamientos de planificadores urbanos.

Agradecimientos

Proyecto SIMURBAN2: Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias (Ref.: CSO2012-38158-C02-01).

Referencias

Cantergiani, C. C. (2011). Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica. *Serie Geográfica*, *17*, 29-43. Disponible en: http://geogra.uah.es/revista/pdfrevista17/OK-02-articulo_Carol_Cantergiani_pags_29_a_44.pdf

Railsback, S. F., & Grimm, V. (2009). A Course in Individual-based and Agent-based Modeling: Princeton University Press.

Grimm, V., & Railsback, S. F. (2005). Individual-based modeling and ecology. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Gherin-Pace, F., & Bura, S. (1997). SIMPOP: a multi-agents system for the study of urbanism. Environment and Planning B, 24, 287-305.

Barros, J. (2004). Urban Growth in Latin American Cities. Exploring urban dynamics through agent-based simulation. Doctor of Philosophy, Bartlett School of Graduate Studies, Bartlett School of Architecture and Planning, University College London, University of London, London. Retrieved from http://www.dpi.inpe.br/cursos/environmental_modelling/joana_phd_thesis.pdf

Benenson, I., & Torrens, P. M. (2004). Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena: John Wiley & Sons, L.

Fontaine, C. M., & Rounsevell, M. D. A. (2009). An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape. Landscape Ecology, 24(9), 1237-1254.

Giddens, A. (1984). The Constitution of Society: Outline of the Theory of Structuration. Cambridge: Polity Press.

Gilbert, N. (2008). Agent-Based Models. Sage Publications.

Proyecto SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante TIG del crecimiento urbano actual. Evaluación de sus sostenibilidad (2013). Proyecto de investigación del Departamento de Geografía, Geología y Medio Ambiente de la Universidad de Alcalá. Página web: www.geogra.uah.es/simurban/

Valenzuela Rubio, M. (2010). La planificación territorial de la Región Metropolitana de Madrid. Una asignatura pendiente. Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada, 47 (2).

Wilensky, U. (1999). NetLogo. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

Cantergiani, C.C.; Barros, J. y Gómez Delgado, M. (2014). "How real estate agents behavior affects urban growth: an Agent-Based Model approach". En: Miguel, F.J., Amblard, F., Barceló y Madella (Eds.) *Advances in Computational Social Science and Social Simulation.* Proceedings of the Social Simulation Conference. Barcelona, Cataluña (España), Septiembre 1-5 septiembre 2014. (Disponible en: http://ddd.uab.cat/record/125597, último acceso: abril/2017)*

How real estate agents behavior affects urban growth: an agent-based model approach

Carolina C. Cantergiani
Geology, Geography and Environment Department, University of Alcalá, C/Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, SPAIN
Email: carolina.carvalho@uah.es

Joana Barros
Department of Geography, Environment and Development Studies, Birkbeck University of London, 32 Tavistock Square, London, UK WC1H 9EZ
Email: j.barros@bbk.ac.uk

Montserrat Gómez Delgado
Geology, Geography and Environment Department, University of Alcalá, C/Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares, SPAIN
Email: montserrat.gomez@uah.es

Abstract*—During the early 2000s Spanish territory has suffered major transformations due to fast urbanization. The main actors involved on this process are: urban planners, real estate agents and population. This paper presents an Agent-Based Model (ABM) which simulates the behavior of those three agents in order to better understand how the interaction of those different actors contributes to the process and produces changes in the territory in the form of urban growth. This study is applied to the Corredor del Henares, an area of 18 municipalities at Madrid Region in Spain. The paper presents the overall model with particular focus on the behavior of Real Estate Agents. Preliminary results suggest the model is capable to produce realistic scenarios and, thus, help to improve the understanding of the dynamics of urban growth in Corredor del Henares.

I. Introduction

The present paper studies the process of urbanization and urban growth in Spain. Urbanization in Spain can be described as a three-stage process involving three types of actors: urban planners, real estate agents, and population. The process starts by the choice for new urbanizable areas by urban planners following national, regional and local policies. On a second phase, real estate agents will chose where to promote new residential developments. Finally, the population will select their places to live based on their individual preferences and according to their income possibilities.

In order to better understand this urbanization process, we introduce a model that simulates this process using Agent-Based Modeling (ABM) techniques. ABM is particularly suitable for this case because it allows each of the actors' behavior to be simulated individually as well as how they, together, produce changes to the territory in the form of urban growth. ABM has been often used for urban growth simulation, mostly applied to local level (for examples, see [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9]), although some few examples of application at sub-regional level can be found (see [10] [11] [12] [13]).

The present study simulates the urban growth process in the Spanish region called *Corredor del Henares*. This subregional area, composed by 18 municipalities, had a phase of very rapid urban development during the housing bubble in the late 1990s and early 2000s, in particular along the transport lines (motorway and railway) which links Madrid to Guadalajara. In addition to the strong influence of the city of Madrid, the complexity of the dynamics of urban growth in the area is increased by the large number of municipalities regulating the development as well as conflict between urban development and conservation of protected environmental areas in specific locations within the region.

The next section will present the model for urban growth in the *Corredor del Henares* with particular focus on the simulation of Real Estate Agents. Hence, the next section presents the integrated model, followed by a more detailed section on the submodel of Real Estate Agents.

II. An ABM model for urban growth in the "*Corredor del Henares*"

The model developed in this research consists of three independent but integrated submodels, each simulating the behavior of one of the three actors of the urbanization process in Spain: urban planners, real estate agents, and population.

The first submodel simulates the ***Urban Planner***´s decision-making process, which consists of selecting new areas to be urbanized according to physical restrictions (i.e. protected areas, high slopes, proximity to hydrographic bodies), distance to elements of interest (i.e. roads or consolidated urban areas), and the amount of growth required to attend existing demand. These criteria are set as parameters and can be modified at initialization to generate different scenarios.

The second submodel focuses on ***Real Estate Agents*** decision making process on building new residential developments. As part of their behavior they must decide where to build new developments, how many developments must be built, their size, and their target economic group. The decision making process takes into account the legal status of the territory (defined by Urban Planners in submodel 1) as well as the areas which optimize their profits. This submodel will be further detailed in the next section.

This work was not supported by any organization

The third submodel simulates the process of residential location choice and occupation by the ***Population***. In this case, they look for the best place to move according to their economic restrictions and location preferences, such as distance to public transport network, education facilities, and so on.

The flowchart in Fig. 1 shows how the submodels are integrated, where the result of each submodel feeds into the next, in a chain-like process.

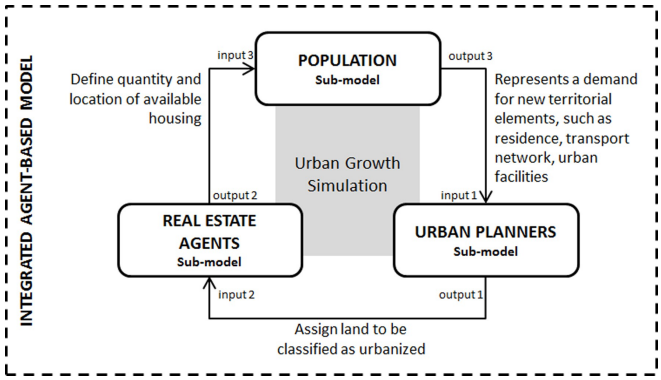


Fig. 1 Integrated decision model to simulate urban growth

III. HOUSING DEVELOPMENT SUBMODEL (REAL ESTATE AGENTS)

As mentioned, the submodel of Real Estate Agents behavior aims to simulate the development of new residential buildings. Their aim is to maximize profit and, as such, to create new residential developments that are attractive to potential buyers. This is achieved by selecting specific locations as well as building to the standards of the targeted economic group (high, medium and low). The current version of the submodel assumes all real estate agents have the same behavior but different behaviors will be incorporated in the next stage of the model development.

The set of criteria used by agents to select a location to build residences is presented in Table 1, below, and includes attributes such as zoning, housing standard, density, and distance to specific components. Residential developments can be targeted to high, medium or low income groups.

Fig. 2 shows the flowchart of the Real Estate Agent submodel where both the available territory after eliminating restrictive areas (A) and the agent's preferences for specific geographical location (B) are considered.

The model, developed in *NetLogo* [14], allows the creation of scenarios through the weighting of different variables, such as the status of new buildings, distances to elements of interest or social similarity with neighbors, and also through the definition of the number of new residence to simulate.

IV. CONCLUSION

The Real Estate Agents submodel allows the user to see the distribution of new settlements as well as have an overview of the dynamics of urban growth in the region of *Corredor de Henares*. By changing setting of parameters, the model can also simulate different scenarios, such as simulating the effect of real estate agents that have interest in developing a particular area or target a particular income group.

The model is still under development, with the final submodel (population) currently being finalized. As such, the model has not yet been validated. Once the development of all individual submodels is completed, sensitivity analysis tests will be carried out for each submodel as well as for the integrated model.

Different planning and economic scenarios (i.e. housing boom, recession) will be used to test the model's outcomes and validation will be performed with data from before and after the early 2000s 'housing boom'.

Preliminary results suggest the model is capable to produce realistic scenarios and, thus, help to improve the understanding of the dynamics of urban growth in the *Corredor del Henares* region. The model has potential to support future territorial decisions in the region and, thus, fulfill the main potential of ABM applied to urban studies at a sub-regional scale.

TABLE I.
VARIABLES THAT LEAD THE DECISION PROCESS OF REAL ESTATE AGENTS

Computer	How variables are incorporated in the model
Zoning	Classification of urban and developable land, that must be recognized by Real Estate Agents in order to find legal areas to build new residence
Housing standard	Distribution of different type of residential buildings (high, medium and low standard) according to their square meter average price
Density	Definition of collapsed areas and the occupation capacity of the existent or new buildings
Urban Consolidated Areas	Considered an element of interest in some cases, since the demand for new residence is sometimes higher on areas closer to urban centers
Public Transport Network	The proximity to public transport network is also included in the preferences of a group of people in order to choose where to live
Road Infrastructure	New development should be close to road infrastructure in order to be more attractive to a group of population

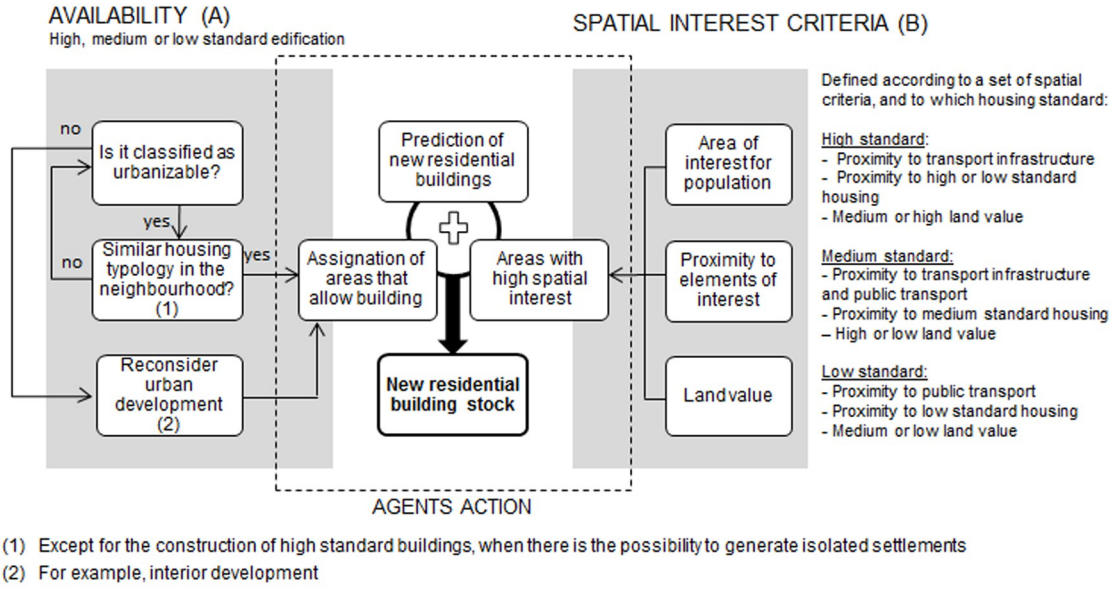


Fig. 2 Logic model of Real Estate Agents´ decision process

ACKNOWLEDGMENT

This work was developed in the framework of SIMUR-BAN2 Project: Geosimulation and environmental planning tools applied to territorial management at metropolitan areas. Application on intermediate scales (Ref.: CSO2012-38158-C02-01).

REFERENCES

[1] M. Batty, *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals.* Massachusetts Institute of Technology, 2005.

[2] I. Benenson, I. Omer, and E. Hatna, "Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv," *Environment and Planning B*, vol. 29(4), pp. 491-512, 2002.

[3] J. Dearden, A. Wilson, "The Relationship of Dynamic Entropy Maximising and Agent-Based Approaches in Urban Modelling." in A. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, and M. Batty (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems,* Springer, pp. 705-720, 2012.

[4] D. Ettema, "A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets." *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 35(1), pp. 1-11, 2011.

[5] F. F. Feitosa, Q. B. Le, and P. L. G. Vlek, "Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities." *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 35(2), pp. 104-115, 2011.

[6] T. Filatova, D. C. Parker, and A. Van Der Veen, "Agent-Based Urban Land Markets: Agent´s princing behavior, land prices and urban land use change." J*ournal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 12 (1)(3), 2009.

[7] B. Jiang, and H. R. Gimblett, "An Agent-Based Approach to Environmental and Urban Systems within Geographic Information Systems." in H. R. Gimblett (ed.), *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques (for Simulating Social and Ecological Processes),* Oxford University Press, pp. 171-189, 2002.

[8] R. Jordan, M., Birkin, and A. Evans, "Agent-Based Modeling of Residential Mobility, Housing Choice and Regeneration." in A. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, and M. Batty (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 511-524, 2012.

[9] P. M. Torrens, "Moving agent-pedestrians through space and time." *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 102(1), pp. 35-66, 2012.

[10] J. Barros, "Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach." in A. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, and M. Batty (eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 571-589, 2012.

[11] A. T. Crooks, A. Patel, and S. Wise, "Multi-Agent Systems for Urban Planning." in N. N. Pinto, J. A. Tenedório, A. P. Antunes, and J. Roca (eds.), *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories,* Hershey, PA: IGI Global, pp. 29-56, 2014.

[12] C. M. Fontaine, and M. D. A. Rounsevell, "An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape." *Landscape Ecology*, vol. 24(9), pp. 1237-1254, 2009.

[13] D. Pumain, and L. Sanders, "Theoretical principles in interurban simulation models: a comparison." *Environment and Planning A*, vol. 45, pp. 2243-2260, 2013.

[14] U. Wilensky, *NetLogo.* Evanston-IL, 1999. Retrieved from http://ccl.northwestern.edu/netlogo/

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2016). "Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid)". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 70, pp. 259-283. (Disponible en: http://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/2236/2124, último acceso: abril/2017)*

Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 70 - 2016, págs. 259-283

I.S.S.N.: 0212-9426
DOI: 10.21138/bage.2171

DISEÑO DE UN MODELO BASADO EN AGENTES PARA SIMULAR EL CRECIMIENTO URBANO EN EL CORREDOR DEL HENARES (COMUNIDAD DE MADRID)

Carolina Cantergiani
Montserrat Gómez Delgado
Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá
carolina.carvalho@uah.es, montserrat.gomez@uah.es

RESUMEN

Ante el impacto que la expansión urbana ejerce sobre el planeta y sobre su población, resulta esencial la utilización de técnicas de simulación que nos permitan elaborar escenarios sobre la evolución de estos sistemas. En este sentido, los Modelos Basados en Agentes (MBA) se presentan como una alternativa prometedora. Los MBA son modelos celulares y dinámicos que se basan en reglas de decisión y que permiten incorporar el comportamiento de los agentes involucrados en un determinado sistema. En esta investigación proponemos un diseño de un MBA para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid, España), teniendo en cuenta su dinámica urbana, los principales agentes involucrados en este proceso de expansión, su aspecto comportamental, así como la información espacial disponible. El principal objetivo es disponer de un diseño conceptual sólido, para posteriormente demostrar que los MBA pueden ser útiles como herramienta alternativa para simular el crecimiento urbano a escala subregional.

Palabras clave: modelos basados en agentes, simulación de crecimiento urbano, Corredor del Henares, Comunidad de Madrid (España), Sistemas de Información Geográfica.

Fecha de recepción: marzo 2014.
Fecha de aceptación: noviembre 2014.

ABSTRACT

Due to urban sprawl impact over the planet and the population, the use of simulation techniques that generate scenarios regarding the evolution of those systems is imperative. Agent-based models (ABM) are presented as a promising alternative. ABM is a dynamic cellular model based on decision rules guided by the behaviour of agents. In the present work, we propose the design of an ABM to simulate urban growth in `Corredor del Henares´ (Community of Madrid, Spain), considering its urban dynamics and the main involved agents, as well as their particular behaviour and the available data. The main goal is to have a solid conceptual design in order to prove, in a short time, that ABM can be an alternative tool to simulate urban growth at a sub-regional scale.

Keywords: agent-based models, urban growth simulation, `Corredor del Henares´, Community of Madrid (Spain), Geographic Information Systems.

I. INTRODUCCIÓN

El impacto que la expansión urbana está y seguirá ocasionando sobre el planeta y sobre la población que lo habita es innegable. Ante esta situación, resulta esencial la utilización de técnicas de simulación que nos permitan elaborar distintos escenarios sobre la evolución de estos sistemas y así planificar de una forma racional y sostenible los futuros desarrollos urbanos. En este sentido, es cada día más habitual la utilización de modelos de simulación por parte de científicos expertos en materia territorial. Estos modelos, enfocados a la simulación de escenarios futuros (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008; Carsjens, 2009; Hansen, 2010; Santé *et al*., 2010) se presentan como potentes herramientas para analizar y evaluar cuestiones ambientales y territoriales y, en general, cuestiones relacionadas con los procesos de toma de decisiones en planificación, contexto en el que se integra el presente trabajo.

En general, estos modelos utilizados en simulaciones aplicadas a las ciencias sociales suelen reproducir diferentes tipos de análisis y escenarios prospectivos, que pueden ser desagrupados en predictivos (carácter prescriptivo), exploratorios (carácter explicativo), o, en algunos casos, normativos (deseables u óptimos) (Parker *et al*., 2001; Aguilera Benavente *et al*., 2010). Para atender a los diferentes enfoques de estos tres grupos de escenarios, se pueden utilizar distintos tipos de modelos de simulación según la orientación deseada.

La aplicación de los MBA en el campo de la simulación urbana podría encuadrase en uno o más de los enfoques presentados (exploratorio, predictivo o normativo). Son considerados como un laboratorio en miniatura, donde los atributos, el comportamiento de los agentes y el medio en el cual se establecen pueden ser alterados, y sus repercusiones pueden ser observadas a lo largo de la ejecución de varias simulaciones (Castle y Crooks, 2006). De esta forma, encajarían en los escenarios *¿what if?* (exploratorios), por tratarse de modelos que sirven, no solo para extrapolar tendencias, sino también para visualizar las probables modificaciones que se producirían en el territorio a partir de determinados cambios en las variables iniciales. Por otro lado, los MBA también podrían utilizarse en el contexto de escenarios exploratorios estratégicos, por su capacidad para permitir plantear cómo la realidad debería ser, o sería,

bajo determinadas circunstancias, aunque sin pretender nunca reproducir los sistemas actuales (Parker, Berger y Manson, 2001).

De forma general, si acotamos el objetivo del modelo a los escenarios futuros de carácter exploratorio, y considerando su aplicación a cuestiones urbanas, los modelos más comúnmente empleados en estos casos son los modelos celulares. Aunque estos modelos se introdujeron ya en los años 60, siguen siendo actualmente muy utilizados y su evolución a lo largo de estos años ha generado una nueva visión de la simulación (Benenson y Torrens, 2004; Batty, 2005) que se ha traducido en el desarrollo de una multitud de herramientas para este fin (White *et al*., 1997; López *et al*., 2001; Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005; Paegelow y Camacho Olmedo, 2008; Aguilera Benavente *et al*., 2010; Plata Rocha *et al*., 2011). Quizás los modelos celulares más conocido en las ciencias sociales, por su amplia aplicación a estudios espaciales, sean los modelos basados en Autómatas Celulares (AC).

De forma general, estos modelos basados en AC funcionan de forma que, a partir de un conjunto de celdas, con un estado determinado, unas reglas de transición y en función de su comportamiento respecto a la vecindad inmediata, cada unidad se comporta dinámicamente cambiando su estado inicial y conformando patrones espaciales. Entre otros muchos documentos, podemos encontrar una compilación de numerosos trabajos de AC en los anales del Congreso *Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems* (Norte Pinto *et al*., 2012).

Los AC son, en cierta forma, el fundamento de otro tipo de modelo celular, los Modelos Basados en Agentes, que también presentan un elevado potencial de simulación urbana y alta capacidad de modelación. Los MBA se han visto influenciados de forma significativa, no sólo por el desarrollo de la teoría de los autómatas celulares (en la física y matemática), sino también por la ciencia de la computación (inteligencia artificial distribuida y tecnología de agentes) (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Aunque tanto los AC como los MBA partan de la misma estructura (celular), se basen en reglas de decisión y sean modelos altamente dinámicos, los MBA están poco a poco ocupando un vacío no cubierto por los AC, al agregar agentes en su configuración. A través de estos agentes, los MBA incorporan un aspecto comportamental, ya que éstos deben representar los principales elementos involucrados en el fenómeno estudiado y, a su vez, son los actores responsables de promover los cambios que se pretenden simular. Las características de algunos de los agentes como la intuición, el aprendizaje o la deducción, no se consideran en los mencionados AC (Cantergiani, 2011a).

De manera resumida podemos decir que los MBA son modelos celulares que simulan un determinado fenómeno a través del comportamiento de agentes autónomos que actúan teniendo en cuenta su estado y características propias, la percepción de su entorno, así como sus propios intereses, reflejados en una serie de reglas de decisión que les permiten a alcanzar un objetivo concreto, provocando los consecuentes cambios en la estructura inicial del sistema.

De esta forma, considerando las reacciones de los agentes ante un determinado fenómeno, los MBA permiten a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales, o entender cómo el propio sistema afecta al individuo (Railsback y Grimm, 2009).

El presente trabajo se centra en la aportación de los MBA a la exploración del fenómeno de crecimiento urbano a escala subregional y al mejor entendimiento de esta dinámica, con el objetivo de apoyar y mejorar las tareas de planificación. La Comunidad de Madrid (CM), donde se sitúa el área de estudio, presenta una intensa dinámica urbana en los últimos años que es importante comprender, y que hace más necesario, si cabe, la planificación del territorio que todavía queda por urbanizar, teniendo en cuenta, además, que se trata de una región con un volumen importante de territorio bajo diferentes figuras de protección.

Como hemos mencionado, los modelos celulares son idóneos para realizar análisis espaciales con un enfoque urbano, especialmente en la simulación de escenarios futuros. Sin embargo, la simulación urbana en España en general, y en la CM en particular, no está suficientemente explorada y menos si consideramos la utilización de MBA. Aun así, podemos encontrar algunos estudios que se centran en explicar la expansión urbana de la CM, en identificar sus principales factores o en definir patrones de crecimiento. Algunos de ellos proponen proyectar posibles desarrollos futuros a través de la modelización urbana utilizando distintas metodologías. Por ejemplo, Barredo Cano y Gómez Delgado (2008) proponen tres escenarios urbanos futuros basados en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) aplicados a la región de Madrid, simulados a partir de un modelo basado en AC. Otro ejemplo son los resultados del proyecto europeo TiGrESS (Encinas *et al*., 2006) que muestran un modelo conceptual de cambios de usos del suelo en la CM. En el proyecto SIMURBAN, se aplican técnicas de evaluación multicriterio y modelos basados en autómatas celulares para simular tres escenarios diferentes de crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid (Plata Rocha *et al*., 2010; Plata Rocha, Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2011). Por su parte, Gallardo y Martínez Vega (2012) aplican el modelo CLUE e IDRISI *Land Change Modeller* para estudiar y proyectar cambios en el mismo área de estudio. Asimismo, en el trabajo reciente de Van Delden *et al*. (2012) se emplean los AC con el modelo METRONÁMICA de RIKS (*Research Institute for Knowledge Systems*), para simular la expansión urbana regional. Estos son algunos ejemplos de aplicaciones afines a la del presente documento, y que además se aplican al mismo ámbito geográfico. Sin embargo, se desconoce la existencia de aplicación específica de modelos basados en agentes para simulación urbana en España.

Con vistas a cubrir este vacío, presentamos el diseño de un MBA propuesto para simular el crecimiento urbano en una parte de la CM, cuyo trabajo se enmarca en un contexto más amplio que intenta mostrar la utilidad de los MBA como herramienta alternativa para simular este crecimiento urbano a escala subregional, incluso presentando algunas ventajas sobre los AC.

II. LOS MODELOS BASADOS EN AGENTES APLICADOS A ESTUDIOS URBANOS

Los MBA, atendiendo a su estructura, están integrados por un conjunto de agentes o entidades, parcial o totalmente autónomas, que actúan de manera racional y reactiva de acuerdo con sus percepciones del exterior y el estado de su conocimiento, relacionándose entre sí y con su medio, con la intención de alcanzar un objetivo concreto.

Hasta el momento, los MBA han sido ampliamente utilizados en distintos campos como la ecología, la informática, la biología, la economía o las ciencias políticas o sociales (es

posible encontrar un número importante de ejemplos en Grimm *et al*. (2006)). En el ámbito de aplicación de MBA a las ciencias sociales, destacan dos de los primeros modelos desarrollados: el `Modelo de segregación´, de Thomas Shelling (1971) y el modelo `*Sugarscape´*, de Epstein y Axtell (1996). Sin embargo, estos modelos todavía no han sido suficientemente explorados en su aplicación a la simulación de fenómenos explícitamente espaciales como el crecimiento urbano.

Entre las aplicaciones urbanas de MBA, encontramos algunos ejemplos que se han centrado en analizar elementos a escala local considerando los individuos como agentes. En este sentido, hallamos trabajos que simulan los movimientos de coches y peatones en el tráfico urbano (Jiang, 2000; Torrens, 2012), dinámicas de evacuación de emergencia en ambientes cerrados teniendo en cuenta rutas, tiempo, condiciones de los agentes, etc. (Castle, 2007), modelos de segregación social (Benenson *et al*., 2002; Crooks, 2006; Feitosa *et al*., 2011), modelos de asignación de empleo y residencias (Crooks, 2006), dinámicas económicas de mercado relacionada con los usos del suelo y distribución residencial (Filatova *et al*., 2009; Ettema, 2011). Otras aplicaciones se detienen más en explicar fenómenos relacionados con la ciudad y la asignación de viviendas a un nivel intraurbano (Dearden y Wilson, 2012; Jordan *et al*., 2012).

La mayoría de los trabajos de MBA en el ámbito urbano se aplica a escala de individuo, pero dado que tienen funcionalidades que permiten analizar fenómenos complejos, consideramos que podrían aplicarse también a escalas menos detalladas (el histórico de aplicación de los MBA en otros campos de estudio sostiene esta hipótesis), y partimos del supuesto de que también pueden ser útiles para simular el crecimiento urbano a escala subregional.

En algunos casos se han planteado MBA con estos objetivos. Así, en el trabajo de J. Barros (2004) se lleva a cabo una modelización del crecimiento urbano en Latinoamérica estudiando concretamente el fenómeno de periferización en diferentes ciudades. Por otro lado, el modelo SIMPOP (Sanders *et al*., 1997) es un buen ejemplo de aplicación de dinámicas urbanas a escalas intermedias, que viene siendo desarrollado y perfeccionado hace algunos años. Siguiendo la misma línea de modelización del crecimiento urbano, Benenson y Torrens (2004) presentan en su libro una introducción teórica sobre la aplicabilidad de modelos como los MBA en análisis de la dimensión urbana y publican una serie de artículos relacionados (Torrens, 2006). Algunos otros ejemplos que sirven de referencia se encuentran en el libro de Heppenstall y otros (2012). Asimismo, muchos de los resultados de estos trabajos están todavía en fase de desarrollo, actualización o revisión, dando fe de la etapa inicial en la que se encuentra la modelización basada en agentes para aplicaciones urbanas en general.

Respecto a la estructura del presente documento, a continuación describimos el área de estudio donde se introduce la selección de los 18 municipios de la Comunidad de Madrid que constituye el Corredor del Henares. La caracterización del área de estudio sirve, además, de justificación para la definición de la estructura básica del modelo que se presenta en el siguiente apartado. El modelo teórico es presentado considerando sus agentes y elementos asociados traducidos en forma de variables de «atracción». En este punto se hace especial hincapié en la cuestión de la disponibilidad de datos teniendo en cuenta las necesidades del modelo, el área de estudio y la escala aplicada. En el apartado IV se presentan los

componentes particulares que formarían el modelo propuesto, a partir de la especificación de los motivos de su elección y descripción de la relación que tienen con el desarrollo urbano en el área de estudio – lo que vendrá a ser las reglas de comportamiento de los agentes.

III. ÁREA DE ESTUDIO: EL CORREDOR DEL HENARES (COMUNIDAD DE MADRID, ESPAÑA)

La Comunidad de Madrid (CM), con sus casi 9.000km^2, aglutina una población que se acerca a los 6,5 millones de habitantes, superando los 3 millones el municipio de Madrid, según datos de 2012 (INE, 2014). Debido a su posición estratégica a nivel nacional, concentra funciones importantes y es centro neurálgico de transporte, empleo, administración, entre otros. Estos factores propician una dinámica demográfica activa que, a su vez, refleja cambios territoriales muy significativos.

Su dinámica acelerada de cambios en el uso del suelo se refleja, principalmente, a través de las estadísticas de expansión de suelo urbano y urbanizable, definido por políticas territoriales. No obstante, aunque estas políticas sean un factor decisivo respecto a las dinámicas urbanas, no es el único responsable de la situación de impacto existente. La crisis económica que estalló en 2007 también es un elemento particular que tiene consecuencias territoriales evidentes. En el caso de la CM, el ritmo frenético de la `industria del ladrillo´ se ha minimizado, aunque los impactos generados en el período de expansión inmobiliaria se reflejan en el número espectacular de viviendas vacías y no terminadas. Un ejemplo de ello es el aumento en más de un 200% del número de viviendas libres iniciadas en la CM entre 1994 y 2004, que pasó de 19.000 a más de 60.000 viviendas, para luego caer a tan sólo 4.600 en los 5 años siguientes (Ministerio de Fomento, 2013).

Por otro lado, este desarrollo urbano acentuado no se dio exactamente en formato tradicional de crecimiento compacto, más bien se distribuyó a lo largo de los ejes de transporte más importantes, principalmente de las carreteras nacionales A-2 y A-4 (que conectan Madrid con Cataluña y con Andalucía, respectivamente). Más recientemente, el eje de la A-6 (que conecta Madrid con Galicia) mostró una evolución urbana destacada de segunda residencia, atraída por la Sierra de Madrid (Hewitt y Escobar Martínez, 2011). Los dos primeros ejes conforman lo que llamamos `corredores´ de expansión urbana – hacia el municipio de Toledo y de Guadalajara (este último, denominado Corredor del Henares).

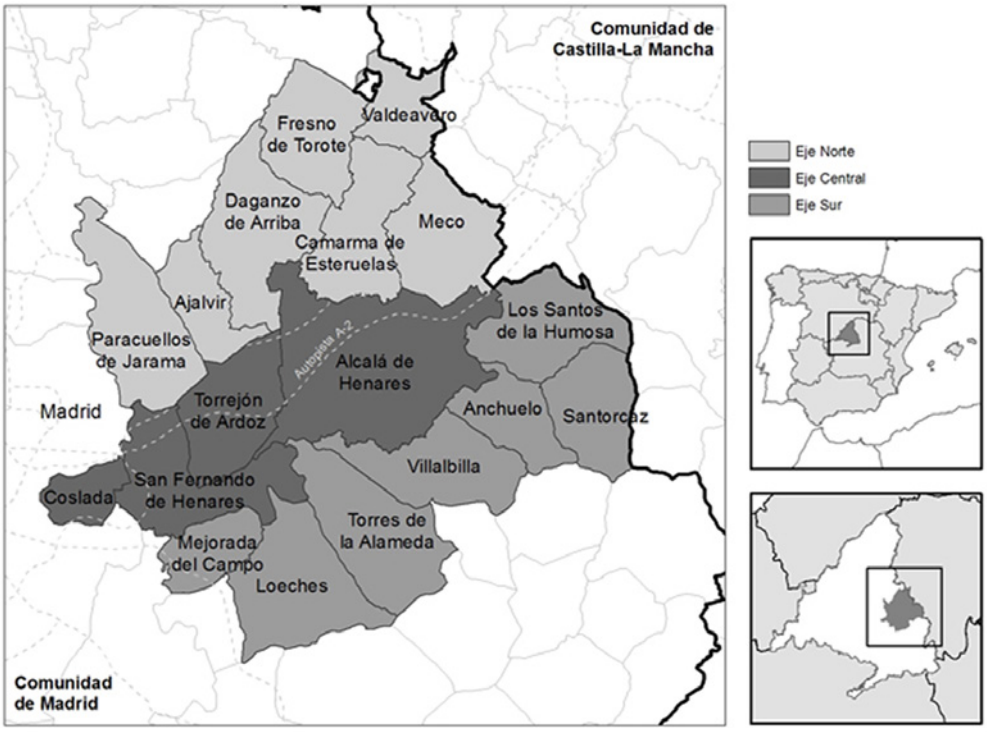
Debido a las limitaciones de aplicación espacial que todavía tienen los tipos de modelos como el propuesto, se ha seleccionado una parte de la región madrileña como área de estudio, concretamente el Corredor del Henares, que ha experimentado una intensa y compleja dinámica de cambios de usos del suelo en las últimas décadas.

A lo largo de los últimos años, el Corredor del Henares ha sido objeto de estudios realizados por distintos investigadores y organismos públicos. Su delimitación varía significativamente según el organismo que la propone y, principalmente, según el objetivo del estudio. Una revisión de estas distintas delimitaciones muestra un total acuerdo en cuanto a la especificación del eje central, definido por los cuatro municipios principales, que son Alcalá de Henares, Torrejón de Ardoz, San Fernando de Henares y Coslada. Algunas de estas selecciones se basan en análisis puramente temáticos (estadística, movilidad, calidad del aire), mientras otras presentan un perfil más territorial (Gómez Delgado, 1998; López De Lucio, 2003).

Tras un análisis detallado de las propuestas expuestas, realizamos una nueva selección basándonos en un análisis de dinámica urbana y algunas características de interés como aspectos funcionales, relación con la capital, crecimiento urbano reciente, accesibilidad, etc. La propuesta final de la delimitación del área aglutina 18 municipios (Figura Nº 1), cuya superficie es de 624 km^2, y cuya población asciende a 563.160 habitantes, según los datos del último censo, en 2011 (INE, 2014).

Aunque es sabido que el Corredor del Henares funcionalmente sobrepasa el límite autonómico y presenta una dinámica común y continuada hasta el municipio de Guadalajara (siguiendo el eje de la autopista nacional A-2), ya en otra Comunidad Autónoma (Castilla-La Mancha), nos limitamos a utilizar exclusivamente los municipios de la CM, principalmente debido a la disponibilidad de información necesaria (datos estadísticos y espaciales) para el desarrollo final del modelo, aunque en este trabajo se presente sólo su estructura teórica.

Figura 1
SITUACIÓN Y DELIMITACIÓN DEL CORREDOR DEL HENARES Y REPRESENTACIÓN DE LOS EJES CENTRAL, NORTE Y SUR



Fuente: elaboración propia.

En general, el desarrollo del Corredor del Henares varía según el período temporal de expansión, y por ello conviene analizarlo por ejes. El eje central siempre ha sido el inductor de básicamente todas las actividades generadas en el área de estudio, y consecuentemente ha

atraído población y desarrollo urbanístico. En este sentido, dividimos el área de estudio en un eje central que lo corta transversalmente, constituido por los cuatro municipios principales, y dos ejes, norte y sur, que presentan características particulares conforme se presenta más adelante.

El área de estudio experimentó un importante aumento de población en los años de explosión demográfica que siguieron al desarrollismo iniciado en los años 50 del pasado siglo (principalmente en los municipios del eje central, por la oferta de empleo del sector industrial y de servicios). Aunque se observa un incremento constante a partir de este período, destacan dos momentos: entre 1970 y 1981, cuando pasa de 121.790 a 315.663 habitantes, suponiendo un crecimiento del 160%; y luego a partir de 2001, como consecuencia del boom inmobiliario, aumentando un 30% hasta 2011 (INE, 2011). El primer período de crecimiento se ve frenado por el estallido de la crisis económica y energética, mientras que el segundo lo hace debido a la crisis económica vinculada a la burbuja inmobiliaria.

Así como la estadística de población muestra un crecimiento continuo, también lo muestra la superficie urbanizada. El aumento de esta superficie fue muy intenso entre 1998 y 2006, hecho perfectamente comprobable mediante el análisis de la cartografía de usos del suelo cedida por la Universidad Complutense de Madrid[1], mostrando un aumento entre 2000 y 2006 de 19,52km^2 (17,06%). Aunque la superficie urbana siguió creciendo en el período siguiente, lo hizo en menor proporción – 7,41km^2 entre 2006 y 2009 (6,2%). Esta disminución se debe en gran parte al estallido de la crisis económica y perdura hasta la actualidad.

En cuanto a la distribución de los diferentes usos en el área de estudio, en 2009 (la más actual disponible según la cartografía consultada), dentro de lo que se considera áreas urbanas (ver Cuadro Nº1), se nota una presencia importante de tejido industrial, así como de áreas residenciales, desarrollo claramente inducido y condicionado por el desarrollo del cercano municipio de Madrid. En cuanto a la morfología de la expansión experimentada, se observa un modelo lineal de desarrollo, confirmando la fuerte influencia de las grandes infraestructuras de comunicación (Serrano Cambronero *et al*., 2002).

Un análisis por ejes muestra la diferente dinámica de expansión urbana en los períodos que venimos analizando (2000-2006 y 2006-2009). En primer lugar, la expansión del «eje central» antes del año 2000 se encuentra estrechamente ligada a la descongestión del municipio de Madrid. Durante el primer período de análisis (2000-2006) y coincidiendo con el boom inmobiliario, entre los municipios que más crecieron en superficie destacan San Fernando de Henares, que amplió su red de infraestructuras considerablemente; y Alcalá de Henares, con la nueva distribución del área industrial al norte del municipio.

Ya en el «eje norte», es notable en primer lugar el crecimiento de Meco, experimentando casi un 150% de crecimiento en su superficie urbanizada, seguido de Camarma de Esteruelas y Daganzo de Arriba, también con altos porcentajes (48,6% y 29,1%, respectivamente). En el segundo período (2006-2009), ya en fase de descenso de la burbuja inmobiliaria, destaca de nuevo Meco, cuya área urbana sigue ascendiendo (43%), y Paracuellos de Jarama, que creció casi un 25%.

1 La cartografía de usos del suelo urbano que se utiliza en esta investigación fue cedida por la UCM. Fue creada en el marco de la investigación desarrollada en el Departamento de Geografía e Historia (coordinado por el Prof. Dr. Javier Gutiérrez Puebla) y proporciona información sobre la ocupación del suelo en los años 2000, 2006 y 2009, a escala aproximada 1:10.000.

Cuadro 1
DISTRIBUCIÓN DE CLASES DEL SUELO EN EL CORREDOR DEL HENARES, 2009

Clase de usos del suelo	Superficie (km²)	Porcentaje respecto al total (%)
Residencial unifamiliar	356,8	33,48
Residencial multifamiliar	155,5	14,59
Industria	132,1	12,40
Equipamientos	131,0	12,29
Infraestructura	116,1	10,89
Áreas verdes urbanas	86,4	8,11
Aeropuerto	56,5	5,31
Comercio	19,8	1,86
Servicios	11,6	1,08
TOTAL URBANO	**1.065,7**	**(13,28% del total)**
TOTAL CORREDOR	**8.025,5**	

Fuente: Cartografía de Usos del Suelo, Dpto. Geografía e Historia - UCM (coord. Javier Gutiérrez Puebla), 2010.

Por último, ya totalmente vinculado a la burbuja inmobiliaria, el «eje sur» experimenta un crecimiento significativo y homogéneo en prácticamente todos los municipios durante el primer período, destacando especialmente Anchuelo (con un incremento del 62,7%) y Loeches (54,7%). De forma general, todos decayeron en el segundo período, registrando apenas crecimiento. La excepción es Villalbilla, que presenta un patrón inverso, con bajo crecimiento en el primer período (3,4%) y un 13% en el segundo.

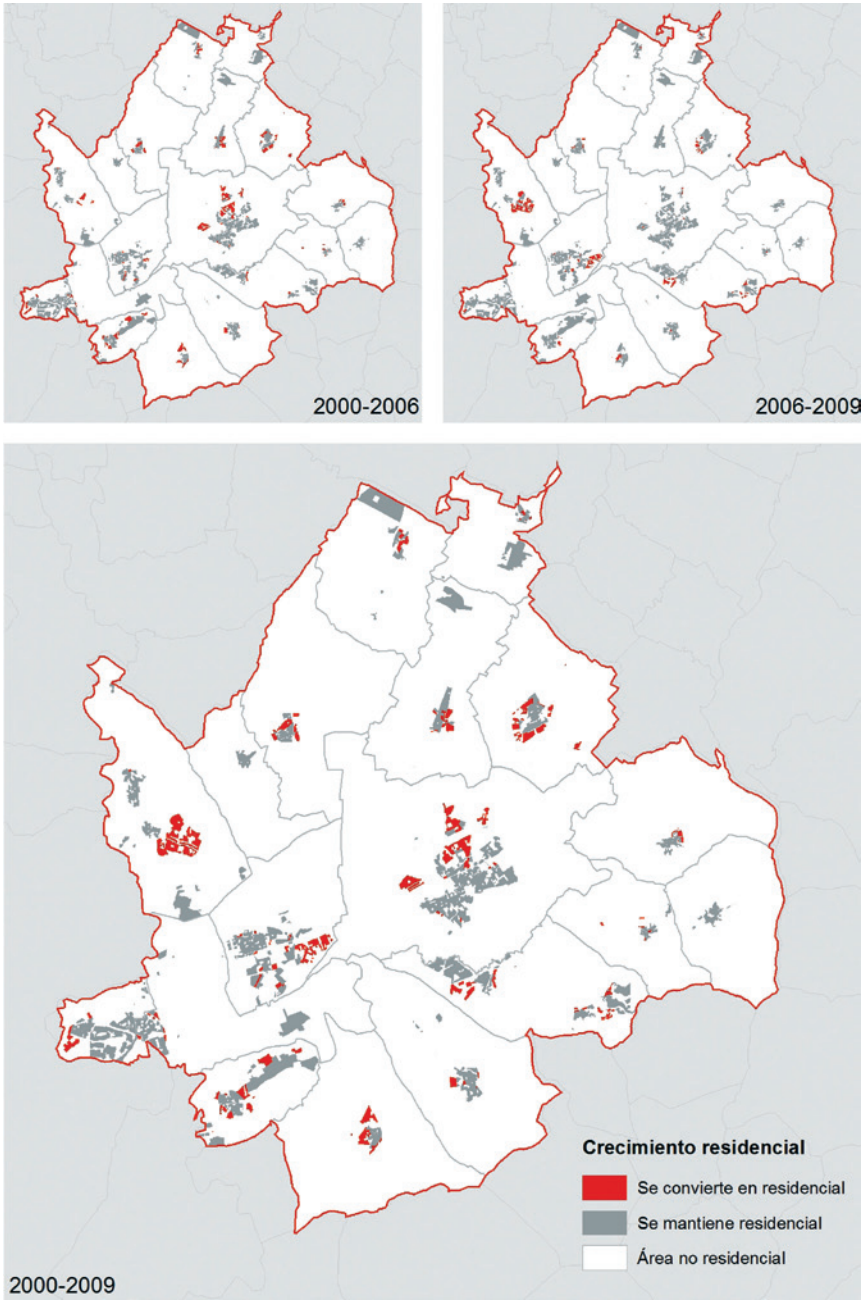
Basándose en los datos exclusivamente residenciales, se observa que el incremento de 71,8km² de áreas residenciales se distribuye espacialmente en las franjas periféricas de los centros urbanos de los municipios, con apenas crecimiento disperso (Figura Nº 2).

Por otro lado, el modelo territorial producido por esta ocupación urbana y la distribución poblacional en la CM, están muy relacionados también con el marco legal y las respuestas políticas de ordenación del territorio y urbanismo existentes en España a distintos niveles competenciales. En España, la clasificación del suelo está definida en los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU), que son competencia única y exclusiva del municipio. Aunque no todos los municipios presenten planes actualizados (según el portal del Sistema de Información Urbana – SIU, en 2012 apenas 8 municipios del área de estudio tenían PGOU, siendo sólo 4 posteriores a 2000), su vigencia en cierto modo estimula el crecimiento en una u otra dirección.

La clasificación del suelo en la Región Urbana de Madrid indica proporciones inquietantes, ya que el porcentaje de suelo urbanizable (12,76%) equivale a dos tercios del suelo clasificado como urbano consolidado, donde ya viven más de 5,9 millones de habitantes. Ya la misma clasificación para los municipios del Corredor del Henares indica una superficie de 368,48km² de área urbanizable delimitada, mientras que 692,56km² son áreas urbanas consolidadas. Esto significa que el territorio está legalmente preparado para recibir un 53% más de la ocupación urbana existente, pudiendo, por lo tanto, duplicar aún su superficie.

Aunque las carencias de los planes regionales (inexistente en la CM) y PGOU en el área de estudio son evidentes, siguen siendo, junto a las leyes de suelo, herramientas fundamenta-

Figura 2
EXPANSIÓN URBANA EN EL CORREDOR DEL HENARES, 2000-2006-2009



Fuente: Cartografía de Usos del Suelo, Dpto. Geografía e Historia - UCM (coord. Javier Gutiérrez Puebla), 2010.

les que se encuentran a disposición de la administración y de la comunidad, siendo a su vez elementos esenciales para estudios de crecimiento, tendencias, evolución e impactos de la urbanización sobre el territorio.

Por todo lo expuesto en cuanto al crecimiento demográfico y a las dinámicas de ocupación del suelo (principalmente la expansión de la superficie urbana), así como a la coordinación de este crecimiento con las herramientas ya desfasadas de planificación y ordenación del territorio, y también a los escasos estudios específicos sobre esta región a escala subregional, se considera el Corredor del Henares un área de potencial interés para proceder a realizar un análisis de la expansión urbana con posterior simulación de su crecimiento. De esta forma, se pretende facilitar la comprensión de los elementos espaciales vinculados a su dinámica, así como posibilitar la proyección de las consecuencias de las tomas de decisiones actuales hacia el futuro, acciones altamente valoradas y con gran utilidad en la planificación del territorio.

IV. DISEÑO DE UN MODELO BASADO EN AGENTES PARA LA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO

El diseño de un MBA debe tener en cuenta la dinámica urbana del área de estudio, que a su vez ayuda a identificar los principales agentes involucrados en el proceso de expansión, así como su comportamiento. Con esto, es posible definir una serie de reglas de decisión que se generarían a partir de información territorial, social y económica.

En este sentido, se resumen a continuación los principales indicadores del proceso de crecimiento urbano experimentado en la Comunidad de Madrid –y consecuentemente también en el Corredor del Henares– en función de una serie de suposiciones y evidencias territoriales.

- *La disociación entre crecimiento demográfico y expansión urbana*. Aunque en teoría la evolución urbana en un territorio debe estar estrechamente relacionado con el crecimiento demográfico, se observa que, en España en general, y en la Comunidad de Madrid en particular, ambas líneas evolutivas se separaron considerablemente, produciéndose un aumento del suelo urbano no justificado por el aumento de población registrado, sustentado por las elevadas ganancias económicas generadas con el boom inmobiliario a finales de los 90 del pasado siglo y primera mitad de la década de 2000 (OSE - Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2010).
- *La dinámica acelerada de la promoción inmobiliaria*. La promoción de viviendas por parte de pequeños agentes inmobiliarios ha cedido el paso a grandes empresas que necesitan realizar operaciones inmobiliarias importantes para rentabilizar al máximo la inversión de capital (Santos Preciado *et al*., 2012).
- *La influencia del incremento de las infraestructuras de transporte* para atender a la población – o para suplir la necesidad generada por las nuevas viviendas en el proceso de crecimiento urbano – es otro de los grandes motivadores del desarrollo urbano. La demanda de transporte público está influenciada por las características de la oferta, sobre las cuales el gestor del transporte puede incidir, y por variables externas (distribuciones de población y empleo, mezcla de usos del suelo, diseño urbano, etc.) (Cardozo *et al*., 2010). Por otro lado, también es sabido que la mejora y ampliación de

infraestructuras son determinantes en la expansión de zonas urbanas (Serrano Cambronero, Gago García y Antón Burgos, 2002; López De Lucio, 2003; Plata Rocha, Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2010).

— *El diseño de nuevos planes generales de ordenación urbana*, responsabilidad del sector público municipal y labor de planificadores urbanos, que en teoría trabajan con vistas a un crecimiento controlado y sostenible. Estos planes regulan la estructura y clasificación de los usos del suelo dominantes en la ciudad (residencial, industrial, comercial, etc.), así como los viarios fundamentales y la localización de las principales dotaciones urbanísticas (Santos Preciado *et al*., 2012).

— *Los aspectos legislativos que actúan sobre el uso del suelo* son fundamentales para la inducción o retención de la expansión urbana desmedida. La anterior legislación de usos del suelo (Ley 6/1998), de carácter más permisivo, comprometía el territorio protegido, vacío, o con otros tipos de usos no urbanos. La nueva ley del suelo (Ley 8/2007) introduce una serie de modificaciones, entre ellas la caracterización del suelo como recurso a proteger.

— *La apertura de medios legales para adquirir préstamos y la facilidad de disponer de créditos financieros*, sea por parte de la población o por los promotores inmobiliarios, induce a una fase desarrollista, frenada forzosamente solamente al estallar la crisis financiera.

— *El punto anterior se refleja directamente en la dinámica de subida de precios por la compra-venta de inmuebles y alquiler de viviendas*, incidiendo en una fuerte especulación inmobiliaria, que a su vez induce a un cambio de perfil de ocupación de alto nivel en regiones específicas, y al mismo tiempo la expulsión a la periferia de la población de rentas más bajas.

— *La heterogeneidad en cuanto a la geomorfología en la CM* produce intereses adversos en el proceso de expansión urbana. La sierra al noroeste de la comunidad funciona como elemento de atracción y produce una concentración de segunda residencia y urbanizaciones, mientras las áreas más planas del sudeste, aunque tengan características de calidad de suelo menos favorables, inducen la construcción de residencia popular con precios más accesibles, y consecuente ocupación de población de renta más baja.

- *La distribución equitativa de equipamientos públicos de educación, salud y ocio* es otro elemento que se tiene en cuenta por parte de la población para ubicar su residencia. La proximidad a estos equipamientos puede generar una mayor demanda en determinadas regiones más que en otras.
- *La evolución de la red de Espacios Naturales Protegidos* (ENP) restringe las áreas de crecimiento urbano, confirmando su rol y sirviendo de protección y conservación de patrimonio natural y paisajístico. Por otro lado, los ENP valorizan (y atraen) áreas urbanas en su vecindad inmediata.

Teniendo en cuenta todo ello, se propone a continuación una estructura conceptual de MBA para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares, considerando la integración entre la caracterización del fenómeno, el área de estudio, así como los aspectos conceptuales del modelo. Como ya se expuso anteriormente, los MBA se componen básí-

camente de tres elementos principales: agentes, variables y reglas de comportamiento, definidos en función del área de estudio, del objetivo del modelo y de los datos disponibles. A continuación abordamos cada componente en un apartado independiente, con el objetivo de facilitar la comprensión de lo que son y cómo funcionan, así como para entender mejor cuáles son sus aportaciones al modelo general.

IV.1. Agentes

Tras una reflexión sobre lo expuesto, y considerando que el primer paso para desarrollar el modelo es definir y concretar qué agentes son aquellos cuya toma de decisiones finalmente podrían producir un cambio real en el territorio en cuanto a la expansión urbana, se presentan los elementos de su estructura funcional. Destacamos que la elección de los agentes considera, entre otras cosas, (1) el histórico cultural del área de estudio, que en este caso indica la fuerte relación con Madrid, (2) el fenómeno estudiado de expansión urbana acelerada, (3) la escala que toma como referencia el ámbito subregional, así como, y principalmente, (4) el enfoque que se quiere dar a la modelación, que vienen a ser simulaciones que sirvan de apoyo a la planificación urbana, y como se ha presentado en la introducción de este documento, como una herramienta exploratoria para simular diferentes propuestas de futuro.

Al elegir una escala subregional para aplicar el modelo, el abanico de opciones de tipos de agentes se restringe considerablemente. Por ejemplo, los agentes no serán configurados como individuos independientes, sino como una agregación de individuos con características similares.

Integrando las suposiciones expuestas definimos finalmente los tres agentes: (1) la población, (2) los promotores inmobiliarios y (3) los planificadores urbanos. En esta propuesta entendemos que los tres grupos estimulan paralelamente este fenómeno de acuerdo a una serie de elementos que inducen o limitan la ocupación urbana sobre el territorio (Cantergiani, 2011b).

La influencia de estos tres agentes sobre el desarrollo urbano se basa en relaciones de oferta y demanda de áreas urbanizables, edificación residencial y cercanía o ampliación de otros elementos de interés como infraestructuras, equipamientos urbanos o áreas verdes. Sus acciones se configuran en un ciclo que, aunque no genera elementos de competición directa, se retroalimentan según cómo reaccione uno u otro agente o grupo de agentes. Esto es, los planificadores asignan nuevo suelo urbanizable (teniendo en cuenta aquél territorio que todavía no está urbanizado); los promotores urbanos buscan, dentro de las áreas clasificadas como urbanizables, áreas de interés para nueva construcción de viviendas (según los intereses del mercado); por último la población elige su lugar de residencia (considerando la oferta de viviendas nuevas y vacías).

En este sentido, la **población** actúa como el **agente motor** que decide cambiar de residencia y transformar el territorio, generando la demanda de nuevas viviendas y consecuente expansión urbana. El agente **población** será distribuido en tres grupos que difieren considerablemente en cuanto a las decisiones que subyacen la elección del nuevo lugar de residencia (en función de sus intereses y necesidades). En la literatura de modelación urbana podemos encontrar diversos ejemplos de agrupaciones de agentes, según la edad (Fokkema y Vanwissen, 1997) o ciclos de vida (soltero, casado sin hijos, casado con hijos, jubilado, etc.) (Die-

leman, 2001; Fontaine y Rounsevell, 2009; Jordan, Birkin y Evans, 2012). En nuestro caso, y por las características del modelo y los agentes implicados, se ha decidido establecer una diferenciación en función del poder adquisitivo familiar (nivel de renta alta, media o baja), cuya agrupación también comparten otros autores (Barros, 2004; Aguilera y Ugalde, 2007).

Por otro lado, los **promotores inmobiliarios** son aquellos actores que promueven la construcción de nuevas viviendas. Los promotores inmobiliarios podrían actuar según la situación económica de la empresa, estatus o experiencia de mercado, entre otros. Sin embargo, en el modelo asumimos que todos los promotores inmobiliarios presentarán idéntico comportamiento, y por ello se representarán a través de un único tipo.

Por último, el tercer agente del modelo son los **planificadores urbanos** (PU), con un importante rol en la elaboración de Planes Urbanísticos y de Ordenación del Territorio. Para los planificadores urbanos sería posible diferenciar su comportamiento según la orientación política o directrices urbanísticas, por ejemplo, sobre todo considerando el nivel municipal, pudiéndose presentar en cada municipio un comportamiento distinto. No obstante, al igual que para los promotores inmobiliarios, asumiremos que los planificadores urbanos presentan un único comportamiento.

IV.2 Variables

Además de especificar cuáles son los agentes que interactúan entre ellos y con el medio, hace falta definir claramente una serie de reglas que guíen el comportamiento de cada agente y agrupaciones. Estas reglas deben representar el proceso de toma de decisiones de cada tipo de agente según las suposiciones consideradas. Para ello, es fundamental tener en cuenta los principales intereses espaciales de cada uno y los factores que les motivan a actuar de una forma u otra.

A continuación, se presenta un listado de lo que consideramos serían los principales elementos de atracción (espaciales y no espaciales) asignados a cada uno de los tres agentes planteados, teniendo en cuenta el área de estudio (Cuadro Nº 2). Para la elaboración de este listado, que siempre resultará incompleto, se ha tomado como referencia la revisión de varios trabajos en los que se definen de alguna forma variables de atracción para el crecimiento urbano (Plata Rocha *et al*., 2009), así como el conocimiento del área de estudio por parte de los expertos involucrados en esta investigación (Proyecto SIMURBAN[2]).

Aunque el objetivo del trabajo es presentar tan sólo la estructura teórica del modelo, creemos conveniente hacer alguna alusión a la dificultad que puede suponer (y que está suponiendo) el desarrollo práctico del modelo. La traducción del modelo teórico al modelo práctico en la etapa de implementación sugiere una serie de reconsideraciones y acotaciones en cuanto a la definición de los elementos de atracción de cada tipo. Por supuesto que la selección de estos elementos seguirán los intereses particulares de los agentes en cada situación, conforme no sólo a sus preferencias, sino también a la disponibilidad de la información necesaria que, en nuestro caso, es limitada debido a la escala propuesta para el desarrollo del modelo y al área de estudio elegida.

2 Proyecto SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad. http://www.geogra.uah.es/simurban1/ (acceso en Julio/2014)

Cuadro 2
AGENTES Y ELEMENTOS DE ATRACCIÓN ESPACIAL

Agente	Elementos de atracción
Población	• Existencia de viviendas libres y/o nuevas • Cercanía a: o infraestructura viaria o accesibilidad al transporte público o centros comerciales o áreas urbanas consolidadas o equipamientos públicos de salud y educación • Precio de la vivienda accesible de acuerdo a la renta de cada grupo • Proximidad a grupos sociales semejantes • Calidad de vida – cercanía a parques urbanos y espacios de ocio
Promotores inmobiliarios	• Disponibilidad de terrenos para urbanizar, obedeciendo a: o clasificación de suelo apropiada (según legislación vigente) o geotecnia adecuada para la construcción • Configuración territorial atractiva para la población o accesibilidad y movilidad (infraestructuras y transporte público) o densidad de edificación • Valoración del suelo accesible de acuerdo a los medios económicos • Cercanía a áreas urbanas consolidadas
Planificadores urbanos	• Disponibilidad de terrenos no productivos • Cercanía a: o áreas urbanas consolidadas o infraestructura viaria o equipamientos públicos de salud y educación • Disponibilidad de áreas sin protección legal (ENP, redes hidrográficas) • Lejanía a equipamientos molestos y peligrosos (no deseables) • Geomorfología (pendientes no demasiado elevadas)

Fuente: elaboración propia.

Para que se puedan realizar los análisis propuestos, y basándonos en las variables expuestas, es necesario un trabajo exhaustivo de compilación de esta información. Hemos de destacar la importancia de los datos espaciales, dado que el modelo es dinámico y se basa en la distribución de sus elementos y características en forma de celdas que interactúan entre ellas y generan una nueva respuesta espacial. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas fundamentales para elaborar una base de datos de referencia para el modelo, que será consultada internamente por los agentes.

En nuestro caso concreto, de modo general, se puede afirmar que estas bases de datos de referencia para la Comunidad de Madrid son relativamente amplias, y están, en su mayoría, disponibles a través de organismos oficiales estatales o autonómicos[3]. En este sentido, hemos

3 Instituto Geográfico Nacional (IGN), Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), Dirección General de Catastro, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid

de destacar el esfuerzo que la administración pública ha realizado en los últimos años para facilitar el acceso a una importante cantidad de información espacial y estadística.

Sin embargo, es evidente que no todos los datos disponibles se adaptan perfectamente al modelo diseñado, por lo que es necesario un análisis escrupuloso de los datos existentes en función del modelo propuesto y de los resultados esperados. También hemos de matizar que desafortunadamente existe una amplia cantidad de información oficial que no se encuentra todavía disponible para uso externo a los organismos productores, y cuya incorporación al modelo hubiera sido fundamental. Es el caso de la información económica sobre renta, precios de vivienda y valor del suelo, necesarios para estudiar y simular adecuadamente el comportamiento de la población o de los promotores inmobiliarios, por ejemplo.

Con el objetivo de integrar tantos datos espaciales en un MBA, con información a escala subregional, se hizo necesaria una serie de ajustes, estimaciones, adaptaciones y suposiciones sobre los pocos datos disponibles, principalmente en lo que concierne a la integración de datos socioeconómicos. Además de estos, se incorporaron otros más básicos, como es el caso del número de viviendas por sección censal, que aunque pareciera una tarea sencilla, también supuso un esfuerzo importante de geoprocesamiento.

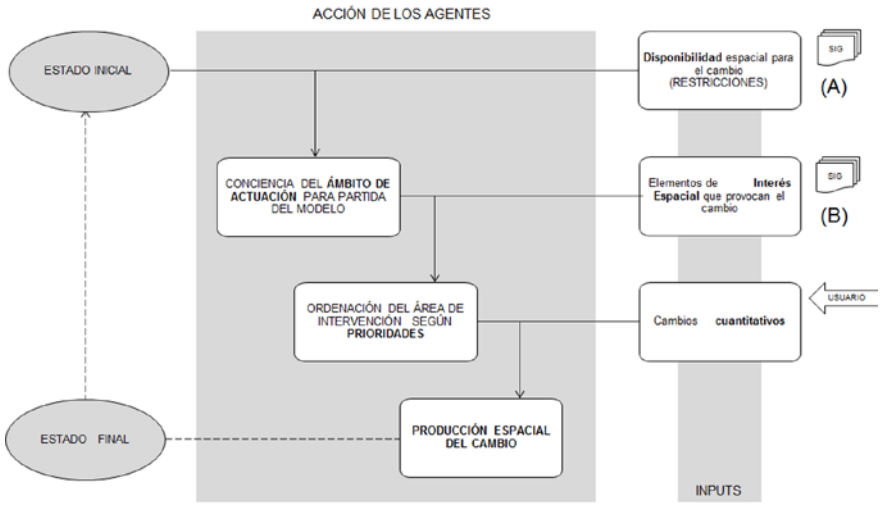
IV.3. Reglas de comportamiento

Tras definir los agentes, identificar su estado de insatisfacción, necesidad o interés (que como consecuencia induce el cambio a simular), reconocer la disponibilidad interna y externa para la materialización de este posible cambio, e identificar los elementos de atracción espacial y datos disponibles, faltaría definir las reglas de comportamiento para concluir el diseño del modelo teórico-conceptual. Todos estos elementos se complementan y actúan de forma integrada, a su vez reflejando el comportamiento de cada agente y del sistema, lo que produce finalmente los resultados de la simulación.

La traducción del modelo teórico presentado en los apartados anteriores al modelo conceptual, ya teniendo en cuenta su aplicación para el Corredor del Henares y considerando los datos disponibles, exige naturalmente una serie de pequeñas adaptaciones. De esta forma, se presenta a continuación y para cada agente la elección final de los elementos para la toma de decisiones y de los componentes de atracción que se utilizarán en la implementación del modelo. Cabe destacar que la estructura de acción es la misma para todos (Figura Nº 3), es decir, partiendo de una situación inicial con unas determinadas restricciones (A), que a través de la interacción con el medio y de los intereses propios (B), alcanza un estado final donde se refleja el cambio producido. Por la dinámica intrínseca de los MBA, el estado final vuelve a actuar como estado inicial en la etapa subsecuente.

En el caso del proceso de los agentes **planificadores urbanos**, que optan por asignar (o no) nuevas áreas urbanizables, el agente parte de una clasificación inicial de usos del suelo (urbano, urbanizable, otros). Como restricción (A), considera todo aquello que no se podrá asignar como nuevo suelo urbanizable (por ejemplo, una determinada franja a lo largo de los ríos, Espacios Naturales Protegidos, las infraestructuras de transporte, zonas con pendientes superiores a 10% y áreas ya urbanas o urbanizables). Los criterios de interés (B) para estos agentes se materializan en los siguientes factores espaciales: cercanía a carreteras y equipamientos públicos, distancia a instalaciones no deseables y/o peligrosas (vertederos, gasoduc-

Figura 3
ESQUEMA DEL PROCESO DE DECISIÓN DE LOS AGENTES



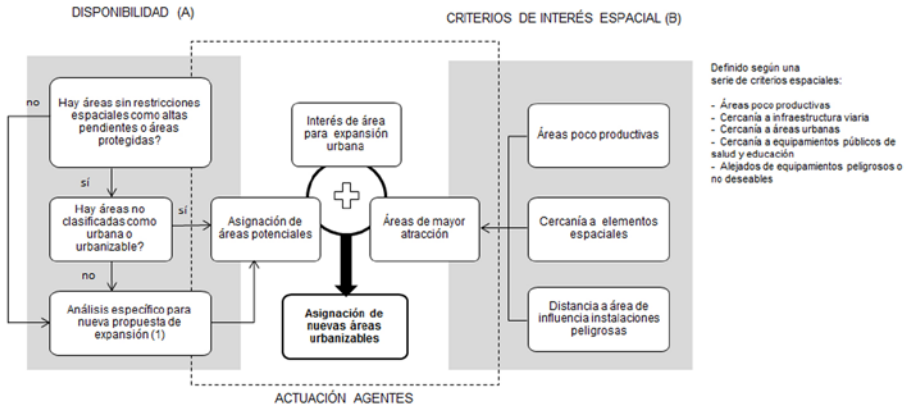
Fuente: elaboración propia.

tos, cárceles, plantas de tratamiento de residuos, etc.), productividad del terreno (buscan no ocupar terrenos con alta productividad agraria), existencia de áreas urbanas consolidadas (con el objetivo de optimizar la utilización de recursos públicos relacionados con servicios a la población de seguridad, transporte, equipamientos urbanos), que según la dinámica histórica del Corredor del Henares pueden representar el comportamiento general de los planificadores urbanos (Figura Nº 4).

Para el segundo agente, los **promotores inmobiliarios**, el esquema es similar. El objetivo en este caso es la construcción de nuevas residencias en áreas asignadas como urbanizables, lo que ya indica la restricción espacial (A). En este caso, la construcción puede enfocarse a diferentes niveles de construcción, de alto, medio o bajo estándar, según la situación del mercado en el momento de la decisión. Esto introduce un factor de aleatoriedad al modelo, ya que el orden del tipo de construcción prioritario puede variar. Como factores espaciales de atracción (B), se consideran: cercanía a carreteras, equipamientos de transporte público y áreas urbanas consolidadas, la densidad de edificación, y principalmente el valor del suelo (Figura Nº 5).

Por último, el comportamiento de la **población** difiere según el grupo social al que pertenezca, definido por rangos medios de renta, lo que añade una cierta complejidad a estos agentes. Se parte de la oferta de viviendas vacías (libres o nuevas) y del nivel de renta de su potencial morador (A). Debido a esta agrupación de los agentes, no sólo no coinciden en la preferencia en cuanto a algunos factores espaciales (la cercanía al transporte público será importante para la población de renta baja, pero no lo será, por ejemplo, para los grupos de renta alta), sino que también pueden tener reacciones distintas en función de la misma variable (B). Es el caso del precio de la vivienda, que presenta restricciones fuertes para algunos grupos de población y débiles para otros. Los demás factores considerados por la población

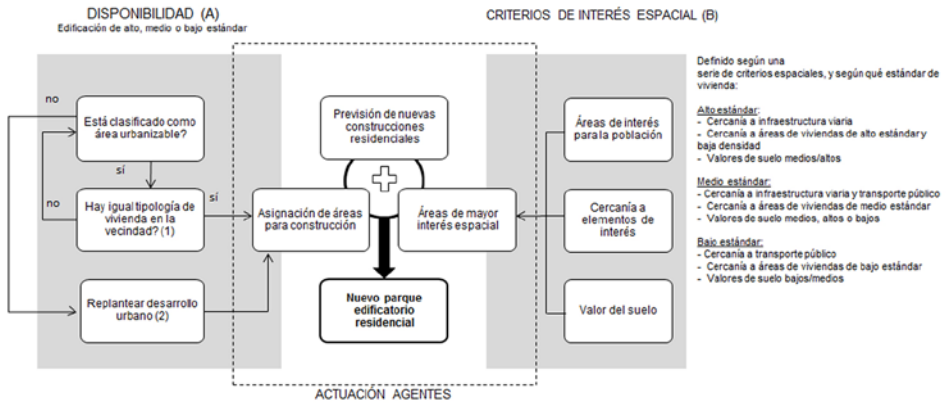
Figura 4
MODELO CONCEPTUAL DE DECISIÓN DEL AGENTE PLANIFICADOR URBANO



(1) Nuevas propuestas de ampliación de áreas urbanizables en regiones no inicialmente planteadas (ej. creación de urbanizaciones aisladas, ocupación de áreas con determinada restricción)

Fuente: elaboración propia.

Figura 5
MODELO CONCEPTUAL DE DECISIÓN DEL AGENTE PROMOTOR INMOBILIARIO



(1) Excepto para construcción de viviendas de alto estándar, cuando hay posibilidad de generar urbanizaciones aisladas
(2) Por ejemplo, desarrollo interior

Fuente: elaboración propia.

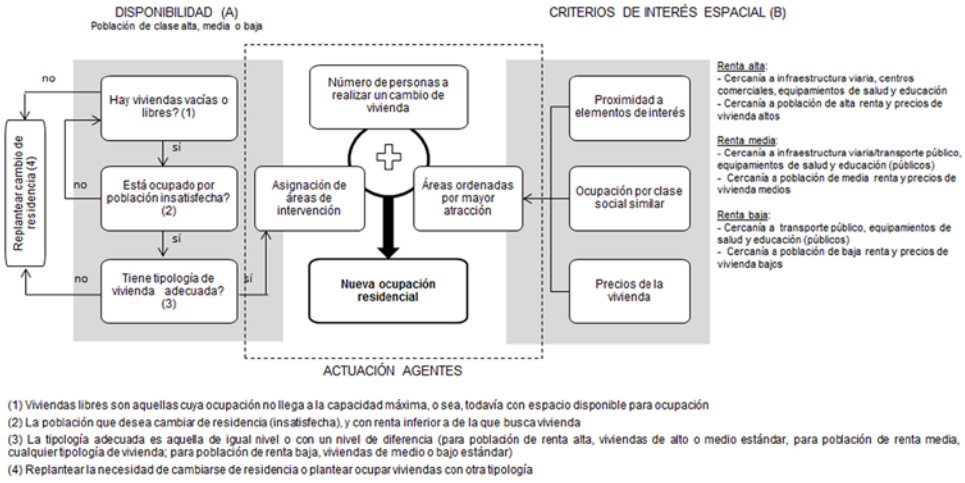
son: cercanía a carreteras/transporte público/centros comerciales/equipamientos de salud y educación, el nivel de renta de la vecindad y el precio medio de la vivienda, siempre teniendo en cuenta el nivel económico de la población (Figura Nº 6).

La implementación del modelo, en un primer momento, cuenta con una cantidad reducida de datos, pues sólo así es posible comprender cómo evoluciona el modelo en cada etapa

y conocer en profundidad cómo funciona la interacción de los agentes y las variables que pueden incidir en su comportamiento. Además, la menor cantidad de elementos en el modelo facilita la detección de posibles inconsistencias técnicas de programación en su ejecución, en una primera etapa de desarrollo del mismo.

En cualquier caso, aunque la cantidad de datos sea reducida, el desarrollo del MBA integrado resultará complejo, considerando que integra las reacciones de los tres agentes cuyos submodelos se desarrollan de forma separada en una primera etapa. El modelo integrado contará con la incorporación de acciones y reacciones de un agente como información de partida o restricción para otro agente (Figura Nº 7).

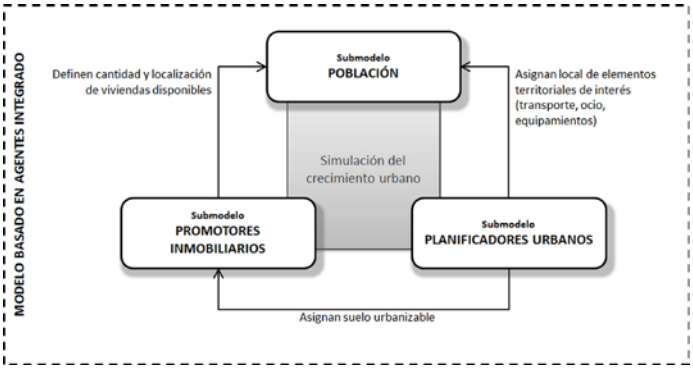
Figura 6
MODELO CONCEPTUAL DE DECISIÓN DEL AGENTE POBLACIÓN



(1) Viviendas libres son aquellas cuya ocupación no llega a la capacidad máxima, o sea, todavía con espacio disponible para ocupación
(2) La población que desea cambiar de residencia (insatisfecha), y con renta inferior a de la que busca vivienda
(3) La tipología adecuada es aquella de igual nivel o con un nivel de diferencia (para población de renta alta, viviendas de alto o medio estándar, para población de renta media, cualquier tipología de vivienda; para población de renta baja, viviendas de medio o bajo estándar)
(4) Replantear la necesidad de cambiarse de residencia o plantear ocupar viviendas con otra tipología

Fuente: elaboración propia.

Figura 7
ESTRUCTURA DEL MODELO BASADO EN AGENTES INTEGRADO



Fuente: elaboración propia.

En resumen, este modelo integrado consta de los tres sub-modelos expuestos ejecutándose de forma casi simultánea, en el que el producto de la acción de los planificadores urbanos –las áreas urbanizables– alimenta o limita la actuación de los promotores inmobiliarios, que a su vez construyen nuevas residencias que se ofertarán a la población. En un movimiento dinámico y continuo, el modelo simula paso a paso el crecimiento urbano del Corredor del Henares, cumpliendo el objetivo inicial propuesto en la construcción del MBA.

V. REFLEXIÓN FINAL Y CONCLUSIONES

Partimos de la idea de que los MBA podrían ser empleados para simular el crecimiento urbano a una escala subregional. La elaboración del mismo, debe pasar inexcusablemente por el desarrollo de un cuidadoso diseño. La compleción de una serie de etapas conceptuales previas al desarrollo del modelo es positiva y necesaria en el sentido de que permite situarlo dentro de un contexto de simulación, además de organizar y ordenar las decisiones en cuanto a su estructura. Aunque resulte muy descriptivo en algunas fases, sirve de base de referencia y es fundamental para la futura implementación del MBA y su programación.

Los agentes elegidos (población, promotores inmobiliarios y planificadores urbanos), pensamos que reflejan adecuadamente el conjunto de actores implicados en el proceso de localización del crecimiento urbano en un territorio como el Corredor del Henares. Las variables de atracción seleccionadas se basan principalmente en vínculos territoriales que pueden indicar mejor calidad de vida u optimización de recursos (tiempo o dinero), tal como cercanía a infraestructuras viarias, transporte público o equipamientos urbanos. Sin embargo, en un MBA que destaca por la posibilidad de reproducir comportamientos, hay otros elementos importantes a considerar, como los socioeconómicos (relación de vecindad y renta, precios de vivienda y valor del suelo), principalmente cuando se trata de aplicaciones urbanas. La consideración de estos elementos es un diferencial del presente modelo.

Asimismo, la definición inicial de los componentes del MBA (agentes, variables de atracción y reglas de comportamiento) a la escala subregional presentada es novedosa, ya que los MBA suelen aplicarse a una escala más local cuando se trata de un enfoque urbano. Aunque este modelo podría aplicarse en otras áreas urbanas en España, y quizás fuera de ella, aquí la elección de cada componente se define en función del desarrollo acelerado que se observa concretamente en este área de estudio en las últimas décadas, pero debería ser cuidadosamente revisado en cada nuevo objetivo, escala o contexto geográfico, político, social y cultural en los que pretenda aplicar.

En el caso del trabajo presentado, destacamos que los 18 municipios seleccionados para constituir el área de estudio presentan un eje central muy dinámico urbanísticamente, que debido a las elevadas tasas de crecimiento urbano en la última década, se transforma en un área de especial interés para la simulación, incrementado por la ausencia de una planificación a nivel regional. Hemos de tener en cuenta que se trata de un territorio que ha registrado una tendencia de crecimiento continuo (aunque minimizado al estallar la crisis económica) y todavía existen abundantes terrenos disponibles para la urbanización en gran parte de los municipios del área de estudio, por lo que resulta todavía de mayor interés la posibilidad de contar con herramientas de simulación para apoyar las posibles iniciativas en este sentido, y así realizar una correcta planificación de este espacio.

No obstante, la falta de alguna información espacial y alfanumérica de entrada al nivel de detalle necesario, y la imposibilidad de disponer de datos públicos no compartidos con la comunidad científica (y menos con el público general), puede dificultar la elaboración del «mejor» modelo. Como hemos mencionado, en el caso del Corredor del Henares toda la información socioeconómica ha tenido que ser sometida a una serie de procesamientos espaciales que, aunque permitan la ejecución del modelo con datos de menor precisión, producen ciertas generalizaciones que pueden introducir incertidumbre. En este sentido, hemos de mencionar el papel relevante que tienen los SIG en esta tarea, facilitando la gestión y tratamiento de la información. No obstante, la conexión con las plataformas utilizadas para el desarrollo de estos modelos todavía se encuentra sin resolver de manera óptima.

En cualquier caso, independientemente de los problemas que se puedan encontrar al proponer el diseño de un MBA a escala subregional (con apenas referencias científicas en la actualidad), el diseño que se presenta permite introducir los puntos más importantes y fundamentales de la estructura de un MBA, así como detectar dificultades y plantear posibles soluciones a esas deficiencias. Además de ser un aporte teórico, y quizás una especie de guía de cómo elaborar un MBA desde cero, es también una semilla para una aplicación práctica que ya se encuentra en desarrollo, y que en breve se difundirá en el medio científico (productos de los submodelos independientes, así como del modelo integrado).

En suma, el presente documento puede ser útil como fuente de referencia e información para aplicaciones similares en otras áreas de estudio, siempre teniendo en cuenta las discrepancias en cuando al objetivo, singularidades del área de estudio, escala y datos disponibles. Ante todas las consideraciones expuestas a lo largo de este documento, creemos que los MBA pueden ser interesantes para la simulación del crecimiento urbano, ya que la información mínima necesaria puede ser compilada e integrada en el modelo, y utilizada en la definición de las reglas de comportamiento de los agentes, llegando más allá de los cambios territoriales exclusivamente de vecindad de los AC, que aunque presentan indudables potencialidades, están limitados por la falta de movilidad y dinamismo que sí aportan los agentes al sistema. Aun así, sabemos que todavía hay un largo camino por recorrer para demostrar la eficacia de estos modelos en este ámbito.

VI. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se desarrolla en el marco del proyecto «Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias (SIMURBAN2)», financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (Ref.: CSO2012-38158-C02-01).

VII. BIBLIOGRAFÍA

AGUILERA, A. y UGALDE, E. (2007): «A spatially extended model for residential segregation». *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Disponible en http://arxiv.org/pdf/nlin/0607026.pdf (acceso en Julio 2014).

AGUILERA BENAVENTE, F., GÓMEZ DELGADO, M. y CANTERGIANI, C.C. (2010): «Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano». *Ciudad y Territorio,* nº 165-166, 481-496.

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 AGE,* nº 54, 271-300.

BARREDO CANO, J.I. y GÓMEZ DELGADO, M. (2008): «Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid region». En M. PAEGELOW y M.T. CAMACHO OLMEDO (eds.): *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions* (págs. 365-385), Springer.

BARROS, J. (2004): *Urban Growth in Latin American Cities. Exploring urban dynamics through agent-based simulation*. Tesis doctoral inédita, Bartlett School of Graduate Studies, Bartlett School of Architecture and Planning, University College London, University of London, London.

BATTY, M. (2005): *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*, Massachusetts Institute of Technology.

BENENSON, I.,OMER, I. y HATNA, E. (2002): «Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv». *Environment and Planning B,* nº 29(4), 491-512.

BENENSON, I. y TORRENS, P.M. (2004): *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena*, John Wiley & Sons, L.

CANTERGIANI, C.C. (2011a): «Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica». *Serie Geográfica,* nº 17, 29-43.

CANTERGIANI, C.C. (2011b): «Identificación de componentes espaciales en un Modelo Basado en Agentes». En N.N. PINTO *et al*. (Eds.): *7th Virtual Cities and Territories* (págs. 65-69). Lisbon.

CARDOZO, O.D., GUTIÉRREZ PUEBLA, J. y GARCÍA PALOMARES, J.C. (2010): «Influencia de la morfología urbana en la demanda de transporte público: análisis mediante SIG y modelos de regresión múltiple». *Geofocus,* nº 10, 82-102.

CARSJENS, G.J. (2009): *Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes*. Tesis doctoral inédita, Universidad de Wageningen, Holanda.

CASTLE, C.J.E. (2007): «Guidelines to Assess Pedestrian Evacuation Software Applications». *UCL Working Papers Series*, *115*.

CASTLE, C.J.E. y CROOKS, A.T. (2006): «Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations». *UCL Working Papers Series*, *110*. Disponible.

CROOKS, A.T. (2006): «Exploring Cities Using Agent-Based Models and GIS». *UCL Working Papers Series*, *109*.

DEARDEN, J. y WILSON, A. (2012): «The Relationship of Dynamic Entropy Maximising and Agent-Based Approaches in Urban Modelling». En A. HEPPENSTALL *et al*. (eds.): *Agent-Based Models of Geographical Systems* (págs. 705-720), Springer.

DIELEMAN, F. (2001): «Modelling residential mobility: A review of recent trends in research». *Journal of Housing and the Built Environment,* nº 16(3), 249-265.

ENCINAS, M.A., HERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, V., HERNÁNDEZ, C., MARTÍNEZ, L. y WINDER, N. (2006): *A Conceptual Model of Land Use Change in the Madrid Autonomous Region*. Informe No. TiGRESS Final Repor / FPV EC.

EPSTEIN, J.M. y AXTELL, R. (1996): *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington D.C., MIT Press.

ETTEMA, D. (2011): «A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets». *Computers, Environment and Urban Systems,* nº 35(1), 1-11.

FEITOSA, F.F., LE, Q.B. y VLEK, P.L.G. (2011): «Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities». *Computers, Environment and Urban Systems,* nº 35(2), 104-115.

FILATOVA, T., PARKER, D.C. y VAN DER VEEN, A. (2009): «Agent-Based Urban Land Markets: Agent´s princing behavior, land prices and urban land use change». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *12 (1)*(3).

FOKKEMA, T. y VANWISSEN, L. (1997): «Moving plans of the elderly: a test of the stress-threshold model». *Environment and Planning A,* nº 29(2), 249-268.

FONTAINE, C.M. y ROUNSEVELL, M.D.A. (2009): «An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape». *Landscape Ecology,* nº 24(9), 1237-1254.

GALLARDO, M. y MARTÍNEZ-VEGA, J. (2012): «Cambios de usos del suelo en la Comunidad de Madrid: Analizando el pasado y simulando el futuro». En *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid, AGE-CSIC.

GILBERT, N. y TROITZSCH, K.G. (2005): *Simulation for the Social Scientist (second ed.)*. Glasgow, Open University Press.

GÓMEZ DELGADO, M. (1998): *Análisis geográfico de la producción y gestión de residuos tóxicos y peligrosos en el Corredor Industrial del Henares. Cálculo de rutas óptimas para su transporte mediante un SIG*. Tesis doctoral inédita, Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares.

GÓMEZ DELGADO, M. y BARREDO CANO, J.I. (2005): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*. Paracuellos de Jarama, RA-MA.

GRIMM, V., BERGER, U.,BASTIANSEN, F., ELIASSEN, S., GINOT, V., GISKE, J.,GOSS-CUSTARD, J., GRAND, T., HEINZ, S.K., HUSE, G., HUTH, A., JEPSEN, J.U., JORGENSEN, C., MOOIJ, W.M. y MULLER (2006): «A standard protocol for describing individual-based and agent-based models». *Ecology Modelling,* nº 198, 115-126.

HANSEN, H.S. (2010): «Modelling the futures coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise». *Landscape and Urban Planning,* nº 98, 141-149.

HEPPENSTALL, A.,CROOKS, A.T.,SEE, L.M. y BATTY, M. (2012): *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Dordrecht, Springer.

HEWITT, R. y ESCOBAR MARTÍNEZ, F. (2011): «The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain». *Applied Geography,* nº 31, 650-667.

INE Instituto Nacional de Estadística (2014), Datos de padrón y censo disponibles en http://www.ine.es (acceso en Julio 2014).

JIANG, B. (2000): «Agent-based approach to modeling urban and environmental systems within GIS». En *9th International Symposium on Spatial Data Handling*.

JORDAN, R., BIRKIN, M. y EVANS, A. (2012): «Agent-Based Modeling of Residential Mobility, Housing Choice and Regeneration». En A. HEPPENSTALL *et al*. (eds.): *Agent-Based Models of Geographical Systems* (págs. 511-524), Springer.

LÓPEZ DE LUCIO, R. (2003): «Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid». *Urban,* nº 8, 124-161.

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,* nº 55, 271-285.

MINISTERIO DE FOMENTO (2013). Información estadística sobre viviendas libres. Disponible en http://www.fomento.gob.es/BE2/?nivel=2&orden=32000000 (acceso en Julio 2014).

NORTE PINTO, N.E.,DOURADO, J. y NATÁLIO, A. (2012, November 8-10 2012): «Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems». En *The International Symposium on Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems - CAMUSS*. Oporto.

OSE - OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA (2010): *Informe Sostenibilidad en España 2010*. Informe. Madrid, Observatorio de la Sostenibilidad en España - OSE.

PAEGELOW, M. y CAMACHO OLMEDO, M.T. (2008): *Modelling environmental dynamics*. Berlin, Springer-Verlag.

PARKER, D.C., BERGER, T. y MANSON, S.M. (2001): «Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change». En D.C. PARKER *et al*. (eds.): *International Workshop*. Irvine, California, USA.

PLATA ROCHA, W., GOMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2009): «Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la CM a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG». *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, *4*.

PLATA ROCHA, W., GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2010): «Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la CM aplicando Métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica». *Geofocus,* nº 10, 103-134.

PLATA ROCHA, W., GÓMEZ DELGADO, M. y BOSQUE SENDRA, J. (2011): «Simulation urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain». *Environment and Planning B,* nº 38, 1012-1031.

RAILSBACK, S.F. y GRIMM, V. (2009): *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*, Princeton University Press.

SANDERS, L., PUMAIN, D., MATHIAN, H., GHERIN-PACE, F. y BURA, S. (1997): «SIMPOP: a multi-agents system for the study of urbanism». *Environment and Planning B,* nº 24, 287-305.

SANTÉ, L., 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,* nº 96, 108-122.

SANTOS PRECIADO, J.M., AZÁRATE LUXÁN, M.V., MATESANZ, D.C., GARCÍA LÁZARO, F.J. y MUGURUZA CAÑAS, C. (2012): «Claves del crecimiento urbano

actual». En M. GÓMEZ DELGADO y V.M. RODRÍGUEZ ESPINOSA (eds.): *Análisis de la Dinámica Urbana y Simulación de Escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica*. Madrid, RA-MA.

SERRANO CAMBRONERO, M.M., GAGO GARCÍA, C. y ANTÓN BURGOS, F.J. (2002): *Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid*. Madrid, Comunidad de Madrid.

SHELLING, T.C. (1971): «Dynamic Models of Segregation». *Journal of Mathematical Sociology,* nº 1(2), 143-189.

SIU: *Sistema de Información Urbana*. Disponible en http://visorsiu.fomento.es/siu/PortalSiu.html (acceso en Julio 2014).

TORRENS, P.M. (2006): «Geosimulation and its Application to Urban Growth Modeling». En J. PORTUGALI (ed.): *Complex Artificial Environments* (págs. 119-134). London, Springer-Verlag.

TORRENS, P.M. (2012): «Moving agent-pedestrians through space and time». *Annals of the Association of American Geographers,* nº 102(1), 35-66.

VAN DELDEN, H., DÍAZ-PACHECO, J., SHI, I. y VAN VLIET, J. (2012): «Calibration of cellular autómata based land use models: lessons learnt from practical experience». En N.N. PINTO *et al*. (eds.): (págs. 295-297). Oporto, Department of Civil Engineering, University of Coimbra.

WHITE, R., ENGELEN, G. y ULJEE, I. (1997): «The use of constrained cellular automata for high resolution modeling of urban land use dynamics». *Environment and Planning B,* nº 24, 323-343.

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2016): "Desarrollo de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano: submodelo de ocupación residencial". *XVII Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica (Aplicaciones de las TIG para el desarrollo económico sostenible).* Málaga, 29-30 junio/01 julio 2016. (Disponible en: https://drive.google.com/open?id=0B5A4B7gZ8NU-MW5uRWlscFpwWU0, último acceso: abril/2017)*

DESARROLLO DE UN MODELO BASADO EN AGENTES PARA SIMULAR EL CRECIMIENTO URBANO: SUBMODELO DE OCUPACIÓN RESIDENCIAL

Carolina Cantergiani[1], Montserrat Gómez-Delgado[1]

[1]Universidad de Alcalá, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Unidad Docente de Geografía, C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares. carolina.carvalho@uah.es; montserrat.gomez@uah.es

RESUMEN

En la actualidad, y a pesar de sus interesantes posibilidades, todavía son muy escasos los Modelos Basados en Agentes (MBA) diseñados para simular procesos espaciales, en general, y relacionados con la simulación de cambios de usos del suelo y simulación de crecimiento urbano, en particular.

En esta comunicación se presenta el último de los tres submodelos de un MBA desarrollado para la simulación del crecimiento urbano condicionado por la acción de tres agentes: planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Una vez que los planificadores urbanos han establecido el suelo que se urbanizará en los próximos años, los promotores inmobiliarios promoverán la construcción (en ese suelo prefijado) de diferentes tipos de viviendas. Finalmente la población, representada en tres grupos de diferente poder adquisitivo, actuaría como agente motor que decide cambiar de residencia, generando la demanda de nuevas viviendas y configurando la expansión urbana final.

Finalizados los dos primeros submodelos, en esta comunicación se presenta el relacionado con la elección de lugar de residencia por parte de la población, siendo el más complejo de los tres. Como zona de estudio y prueba se ha elegido la sección madrileña del Corredor del Henares, una zona urbano-industrial muy consolidada, pero todavía con un volumen importante de territorio disponible y "expectante".

Todos los submodelos están desarrollados en la plataforma *Netlogo*, que permite de manera asequible el intercambio de información espacial con un Sistema de Información Geográfica.

Palabras clave: Modelos basados en agentes; simulación del crecimiento urbano; población; Sistemas de Información Geográfica; Corredor del Henares (Madrid)

ABSTRACT

Agent-based Models (ABM) designed to simulate spatial processes are still not very popular nowadays, and in particular, the ones related to land use change and urban growth simulation.

This work presents the third of the three submodels developed in order to simulate urban growth driven by the action of three agents: urban planners, developers and population. Once urban planners establish the land to be urbanized in the next years, developers promote building (in that land) of different types of residence. Finally, the population, represented by three different income groups, act as the main actor that decides to move, generating new residential demands and so, delimitating the final urban expansion.

The first and second submodels are complete. The current document presents the third and most complex or them, showing the population behavior of *where* to choose new residence. To test this submodel, the chosen study area is the *Corredor del Henares* (at Madrid Region), a very consolidated urban-industrial zone, still presenting a significant surface available and "expectant".

All submodels are developed in *Netlogo* that easily allows the interchange of spatial information within a Geographical Information System.

Keywords: Agent-Based Models; simulation of urban growth; Population; Geographical Information Systems; Corredor del Henares (Madrid)

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos urbanos son fenómenos de gran relevancia en la coyuntura actual de desarrollo territorial en el mundo. Su complejidad reside, principalmente, en el intento de controlar su expansión y buscar un equilibrio entre las relaciones territoriales, ambientales, culturales, económicas, etc. Entre las muchas formas disponibles para intentar comprender y reproducir este tipo de procesos territoriales, encontramos una cantidad importante de modelos espaciales, que de alguna manera representan el territorio y permiten aproximarnos al entendimiento de los cambios observados entre el pasado y el presente, o inclusive, proyectar otros hacia el futuro.

En los últimos años se ha comenzado a indagar en las posibilidades de los MBA en este campo, pues su ámbito de aplicación ha estado tradicionalmente unido a la Sociología, Ecología, Economía, etc., pero sin implicaciones espaciales o de alcance espacial reducido.

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) son modelos celulares que simulan un determinado fenómeno a través del comportamiento de agentes autónomos que actúan teniendo en cuenta su estado y características propias, la percepción de su entorno, así como sus propios intereses, reflejados en una serie de reglas de decisión que les permiten alcanzar un objetivo prefijado y cuya actuación acaba provocando cambios en la estructura inicial del sistema (Gilbert, 2008; Cantergiani, 2011). Además son modelos híbridos, pudiendo incorporar propiedades de modelos de dinámica de sistemas, estadísticos o de flujos económicos. A través de los agentes, los MBA incorporan un aspecto comportamental, ya que estos deben representar los principales elementos involucrados en el fenómeno estudiado y, a su vez, son los actores responsables de promover los cambios que se pretenden simular. Por lo tanto, se trata de modelos que permiten a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009).

Entre los trabajos realizados en el ámbito urbano, encontramos un número significativo de ellos centrado en analizar elementos a escala local, considerando los individuos como agentes y simulando, por ejemplo, movimientos de coches y peatones en el tráfico urbano (Jiang, 2000; Torrens, 2012), procesos de evacuación de emergencia (Batty *et al.*, 2003; Crooks, 2014), modelos de segregación urbana (Barros, 2012; Feitosa *et al.*, 2011), dinámicas sociales (Fontaine y Rounsevell, 2009), promoción inmobiliaria (Filatova *et al.*, 2009; Ettema, 2011) o estudios de urbanismo (Sanders *et al.*, 1997, Pumain y Sanders, 2013). Sin embargo, no se encuentran todavía en la literatura modelos dedicados a simular el crecimiento urbano a escala supramunicipal y con datos reales (no simulaciones teóricas con datos hipotéticos), que es el objetivo del modelo integrado del que forma parte este trabajo.

En la presente comunicación se presenta el tercer submodelo de un modelo integrado que pretende simular el crecimiento urbano, como un proceso decisorio desencadenado de abajo hacia arriba (*bottom-up*). Este modelo consta de tres submodelos independientes para cada uno de los agentes diseñados como protagonistas de este proceso (en Cantergiani y Gómez, 2016 se puede encontrar una reflexión sobre la posible justificación de la consideración de estos tres agentes): planificadores urbanos (1), promotores inmobiliarios (2) y población (3). Los tres submodelos mencionados son independientes en su elaboración, pero dependientes funcionalmente, ya que los datos de entrada y los resultados obtenidos, así como la toma de decisión final, se generan en función de los productos de los demás submodelos, conforme se indica en la Figura 1.

Así, de manera resumida podemos decir que la estructura del modelo integrado se inicia con un submodelo en el que los agentes planificadores urbanos asignarán nuevas zonas urbanizables, partiendo de una situación de zonificación legal de partida, una serie de restricciones relacionadas con la existencia de suelo ya urbanizado, comprometido u ocupado por zonas de especial protección o con condiciones topográficas a evitar y unos factores espaciales de "atracción" que serán utilizados en función del perfil del planificador establecido por el usuario (Cantergiani *et al.,* 2014).

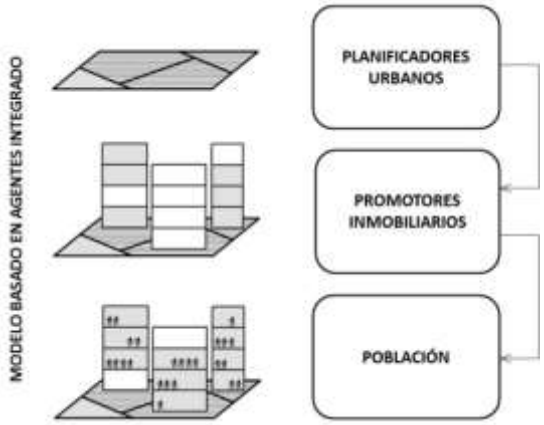


Figura 1. Estructura del modelo basado en agentes integrado para la simulación del crecimiento urbano.

El segundo submodelo de promotores inmobiliarios será el que definirá, en función de las zonas disponibles para urbanizar resultado de la ejecución del primer modelo, la construcción de nuevas zonas residenciales. El prototipo está diseñado de tal forma que estos promotores puedan desarrollar residencias de alto, medio o bajo estándar, según la situación del mercado en cada momento. En este caso también se definen un número de factores espaciales de atracción como la cercanía a vías de comunicación, equipamientos de transporte público, zonas urbanas consolidadas, densidad de edificación o valor del suelo.

Con el tercer submodelo se llevaría a cabo la ocupación por parte de la población de esas zonas residenciales propuestas por los promotores.

La entidad "población" es uno de los principales motores de este modelo. Se trata de un agente comúnmente utilizado en los MBA por contar siempre con un comportamiento humano asociado y relacionado con un fenómeno emergente (en nuestro caso ocupación de viviendas). Es evidente que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en cualquier proceso de dinámica urbana y por ello resulta la parte más importante y crucial del modelo integrado desarrollado. Sin embargo, el comportamiento es difícil de replicar, pues la conducta humana no suele ser objetiva, no es conocida en profundidad y está determinada habitualmente por la cultura, actitudes, emociones, valores, etc., en un determinado contexto social. Si bien en el campo que podemos denominar de la psicología social se han desarrollado investigaciones sobre estos temas (Valera y Pol, 1994; Souza, 2005; Tabernero *et al.*, 2015), sigue siendo complicado reproducir unos comportamientos de naturaleza humana caracterizados por una gran carga de incertidumbre.

En este trabajo se ha pretendido vincular este comportamiento con los estudios derivados de la mencionada psicología social, en tanto que los futuros residentes actuarán en relación con su entorno y en función de estímulos externos. En este sentido hemos de destacar que el agente población se encuentra presente en casi todos los MBA desarrollados en ámbito urbano, aunque es tratado de forma diversa en función del contexto y objetivo del modelo. En un gran número de ocasiones es tratado, no como un agente propiamente dicho, sino como hogares clasificados según las características de los habitantes que los componen, asignándoles diferentes comportamientos (Fontaine y Rounsevell, 2009; Feitosa *et al.*, 2011; Barros, 2012; Dahal, 2014). Lo más habitual es utilizar una clasificación socioeconómica, según volumen de ingresos (que será la utilizada en nuestro trabajo), pero también su dinámica puede estar asociada a la estructura familiar de la población (casado con hijos, soltero, jubilado, etc.).

Tras esta breve introducción sobre el estado del arte y presentación de la primera parte del modelo, a continuación se describe brevemente el área de estudio que se está utilizando como base para el desarrollo, prueba y verificación del mismo. En la sección 3 se describe la lógica del modelo y las reglas que dirigirán el comportamiento de los agentes implicados en este submodelo, así como su estructura. En el apartado 4 se presentan los resultados preliminares de los ensayos llevados a cabo, simulando distintos escenarios de expansión urbana en el área de estudio y finalmente se presentan, en el último apartado, unas breves conclusiones.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio elegida para el desarrollo y prueba de este prototipo es un corredor urbano-industrial que se extiende de Madrid hasta Guadalajara, siguiendo dos vías de comunicación de primer orden (la nacional A-2 y la vía de ferrocarril Madrid-Barcelona), así como un importante curso fluvial (el río Henares). En este caso el área se limita a la sección perteneciente a la Comunidad Autónoma de Madrid, un área que ha experimentado un fuerte proceso de expansión en las últimas dos décadas debido a la burbuja inmobiliaria (Plata Rocha *et al.*, 2009) y por encontrarse en el área de influencia de un importante motor de dinámica urbana como es la capital del país.

El eje central de este corredor está compuesto por los municipios de Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares, existiendo un área de expansión hacia el norte y sur de este eje que en este caso hemos limitado a un total de 14 municipios. La influencia y expansión hacia los márgenes norte y sur de este privilegiado corredor se ha dejado notar en los últimos años, pero todavía existen algunos municipios con posibilidades de desarrollo para los que no se debería dejar pasar la oportunidad de realizar una planificación más equilibrada y sostenible. Por ello se considera un área de potencial interés para proceder a un análisis de la expansión urbana y simulación de su crecimiento.

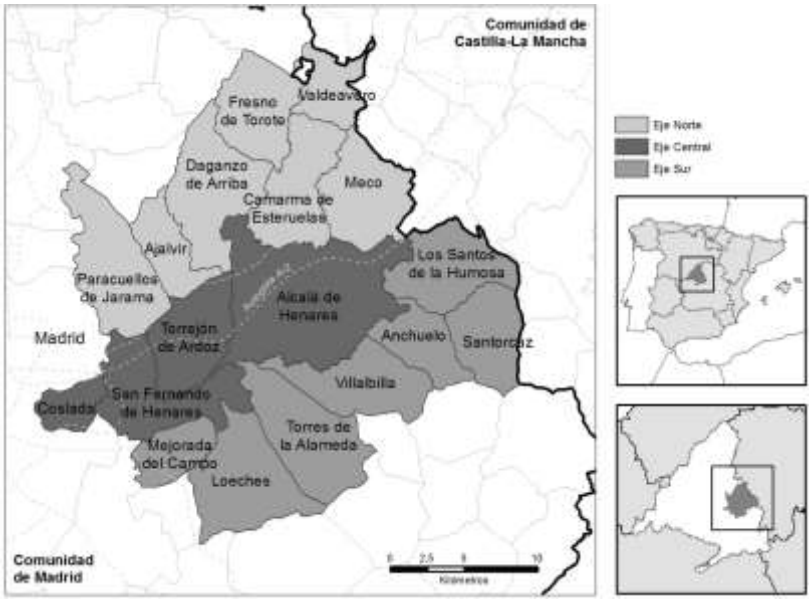


Figura 2. Delimitación del sector madrileño del Corredor del Henares, con sus ejes central, norte y sur.

3. METODOLOGÍA: LÓGICA DEL MODELO Y ESTRUCTURA

En el submodelo que se presenta, el movimiento de la población para llevar a cabo la ocupación de viviendas es motivado por una serie de fuerzas motrices definidas en el arranque del proceso. Esta búsqueda de nueva vivienda se basa en una serie de criterios de preferencia siempre distribuidos espacialmente. Estas preferencias varían según el nivel de renta, por lo que en este submodelo se establecen hasta tres tipos de agentes que actúan según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo. Los diferentes tipos de agentes interactúan entre ellos, cambiando su comportamiento acorde a las nuevas situaciones que van emergiendo también en su entorno. Para entender mejor la ejecución del modelo describiremos los atributos asociados a los agentes y este entorno, así como los factores a considerar por la población para ocupar una nueva vivienda.

Los agentes están caracterizados por cinco atributos (alguno de ellos dinámico y cambiante) que se combinan para producir el cambio:

- *Poder adquisitivo*: alto, medio y bajo
- *Situación* (asentado o no-asentado): indica si el agente está actualmente ubicado (asentado) en alguna vivienda o no (esta opción intenta reproducir procesos de crecimiento de población por migración o cambio de ciclo de vida y representa el estado transitorio previo a la búsqueda de viviendas).

- *Nivel de satisfacción*: estando todas las viviendas tipificadas en alto, medio y bajo estándar, se considera que un agente está satisfecho si coincide con su poder adquisitivo.
- *Estado* (activo o pasivo): los agentes activos se encuentran en estado de búsqueda de vivienda (si a la vez están insatisfechos con la tipología de la vivienda donde están ubicados), mientras que los pasivos se mantienen estables, sin reacción. En un primer momento se define una distribución homogénea y aleatoria de ambos tipos, para luego cambiar según sea expulsado (se convertiría en activo) o se asiente en una vivienda (se convertiría en pasivo). El objetivo de este atributo es diferenciar aquellos que están insatisfechos con su vivienda actual por causas diversas, pero que aun así se quedan en sus viviendas (por comodidad, por falta de recursos u otra razón), de aquellos que buscan condiciones más adecuadas para vivir (en función de los elementos de atracción que se definirán más adelante). De esta forma, el prototipo permite simular, no sólo procesos de expansión urbana, sino otros más sostenibles de renovación urbana, posibles procesos de gentrificación, etc.
- *Capacidad de insistencia*: hace alusión al número de ejecuciones (fijado entre 0 y 10) con intento de cambio de residencia fallido permitido para cada agente en su búsqueda de una nueva residencia. Pasado este umbral, el agente se adapta a su entorno.

Estos atributos cambian y evolucionan en cada ejecución del modelo, variando en función de lo que la población vaya seleccionando.

En cuanto a los atributos asociados al entorno sobre el que se mueven y desarrollan los agentes, se ha incluido el volumen de población, el número y tipología de vivienda disponible, nivel de ocupación (población asentada por vivienda) y capacidad máxima (distribución media de población por vivienda registrada en cada sección censal) y una serie de criterios de preferencia espacial. Todos estos datos están expresados a nivel de celda (50x50m), siguiendo el formato celular habitual de este tipo de modelos.

Como en los otros dos submodelos, los criterios de preferencia espacial están generados y modelados previamente en un SIG, en este caso definidos por la distancia a elementos territoriales como vías de comunicación, paradas de transporte público, equipamientos sanitarios y educativos o proximidad a las distintas tipologías de viviendas.

Aclaradas todas estas premisas, a continuación se presenta el diagrama de flujo que, de forma sintética y secuencial, describe las distintas acciones de la población.

Para iniciar la ejecución del modelo, el usuario establece la configuración de arranque a partir del establecimiento inicial de una serie de parámetros detallados en la figura 3 (FASE 1).

En la FASE 2 se describe la acción de los agentes respecto a la búsqueda de nueva vivienda. Hemos de advertir que el modelo se ha configurado de tal manera que haya escasos parámetros pre-fijados a la hora de su ejecución. Se trata, por tanto, de un proceso muy flexible, en el que el usuario puede tomar decisiones propias sobre un número elevado de inputs, lo que confiere a este prototipo una adaptabilidad importante para ser utilizado en distintos ámbitos de estudio y simular escenarios de muy diferente índole.

A partir de ahí, la población no satisfecha y en estado activo (FASE 2a) elegirá un punto aleatorio en el área de estudio (FASE 2b) y verificará que dentro de su área de influencia haya alguna residencia que cumpla con los criterios relacionados con su grupo de poder adquisitivo y con disponibilidad para ser ocupada. El proceso se repite hasta que se encuentre vivienda disponible o se alcance el máximo número de repeticiones permitidas (FASE 2c). Si se encuentra vivienda disponible, se procederá a comprobar que ésta cumple los requisitos establecidos para cada grupo de población (FASE 2d). Esta decisión estará vinculada a una fórmula (ecuación 1), donde la preferencia (P) de una tipología de población (t) es la suma de los valores de las variables (V) consideradas. A todas ellas se les puede otorgar un peso (p) que exprese la importancia de cada una en el proceso de selección final:

$$Pt = ((plt * V1) + (p2t * V2) + (p3t * V3) + \ldots + (pnt * Vn)) \quad (1)$$

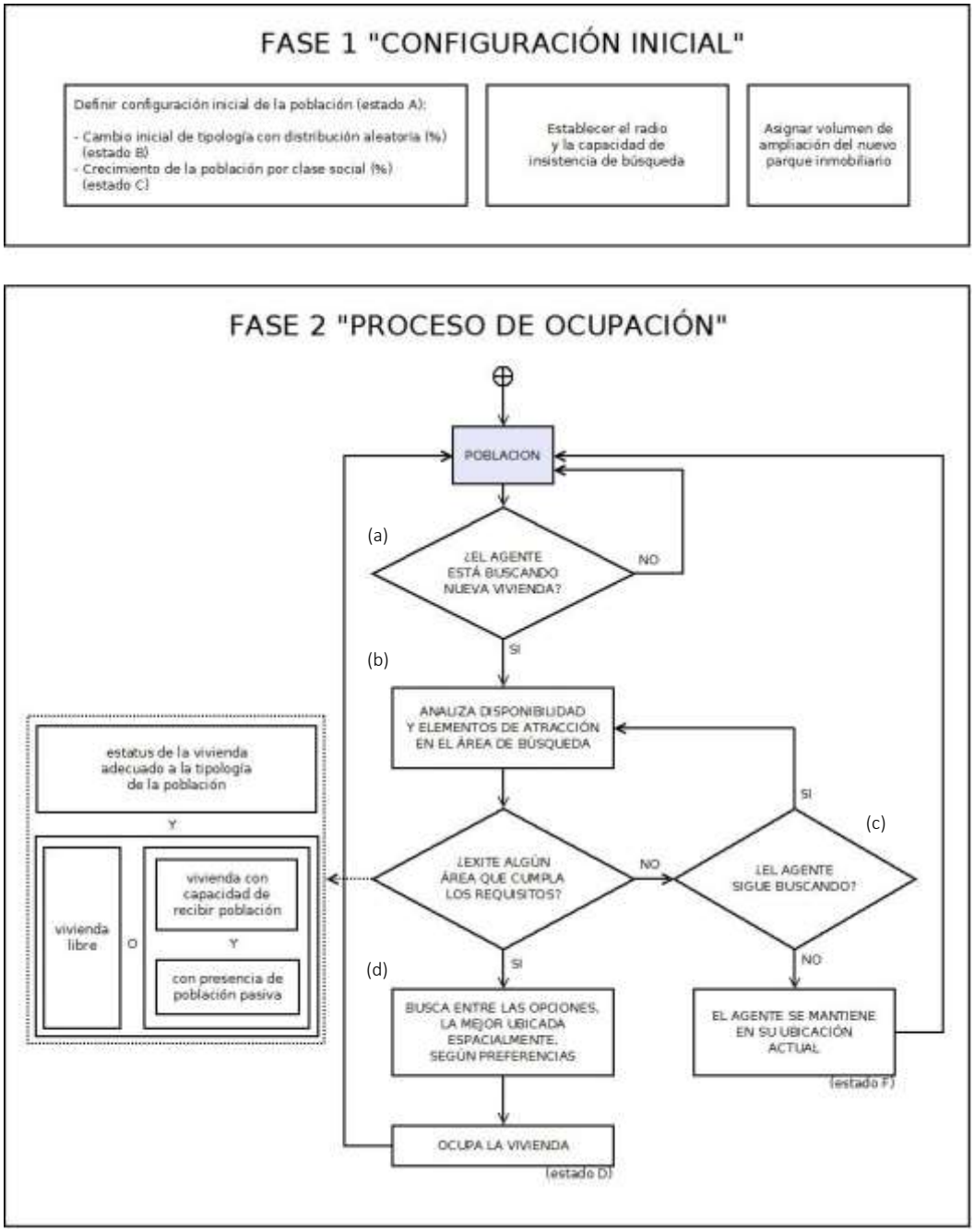


Figura 3. Diagrama de flujo que describe secuencialmente las distintas acciones por parte del agente población.

Como ejemplo, se podría establecer la siguiente ponderación en función del grupo de población:

CRITERIO ESPACIAL	*Renta alta*	*Renta media*	*Renta baja*
Proximidad a vías de comunicación	60	0	0
Proximidad a estaciones de transporte público	0	35	35
Proximidad a hospitales	0	20	30
Proximidad a centros universitarios	10	20	0
Proximidad a viviendas de estándar alto	25	5	0
Proximidad a viviendas de estándar medio	5	15	5
Proximidad a viviendas de estándar bajo	0	5	30
Suma:	**100**	**100**	**100**

Tabla 1. Ejemplo de ponderación de los distintos criterios espaciales de preferencia de localización residencial en función del tipo de grupo poblacional.

El proceso culmina con la ocupación de viviendas por parte de la población obedeciendo a las preferencias y criterios indicados, pero nótese que la ocupación puede producirse sobre viviendas vacías o en viviendas que están ocupadas por población en estado pasivo y que, una vez es expulsada, vuelve al sistema en busca de nueva residencia; por lo que el siguiente paso consiste en una actualización del estado de ocupación y características de las zonas residenciales.

Todos los submodelos están desarrollados en la plataforma *NetLogo* (Wilensky, 1999) por disponer de una interfaz intuitiva y sencilla, y que a la vez permite la obtención de resultados muy visuales de los cambios producidos entre la situación inicial y la simulada. Además, otra ventaja importante es que *NetLogo* permite ya en sus últimas versiones el intercambio directo con datos geográficos en formato SIG.

En la siguiente imagen (figura 4) aparece la interfaz de submodelo de población, relativamente más compleja que la de los otros dos submodelos, precisamente para poder llevar a cabo una ejecución muy flexible que permita al usuario especificar un número importante de parámetros de manera independiente. Cuenta con un área de visualización de datos espaciales de entrada, un espacio para la configuración inicial de los parámetros de arranque, cuadros de resultados alfanuméricos (ej.: el volumen de población que todavía sigue sin residencia, la población que se encuentra en estado de búsqueda, las edificaciones disponibles o el crecimiento de la población de las tres tipologías) y un panel para la visualización de resultados espaciales que consisten en una actualización de la cobertura de viviendas con la nueva población asignada.



Figura 4. Interfaz gráfica diseñada en la plataforma *NETLOGO*, del submodelo de ocupación de nuevas residencias por parte de la población y sus herramientas de control.

4. RESULTADOS

Como venimos indicando, el prototipo ha sido diseñado para disponer de una gran versatilidad a la hora de configurar las condiciones iniciales de partida y, así, poder convertirse en un importante laboratorio de simulación que permita reproducir diferentes escenarios de futuro, además de poder adaptarse más fácilmente a otros contextos espaciales y socioeconómicos.

El modelo y prototipo han sido verificados a partir de la simulación de distintos escenarios con el objetivo de comprobar sus posibilidades y correcto funcionamiento. A continuación se presentan los resultados de tres escenarios con configuraciones y supuestos diferentes entre sí:

- de *boom demográfico*: caracterizado por una demanda elevada de vivienda debido a un aumento importante del volumen de población; las condiciones son aquí más flexibles, determinando un radio de búsqueda más amplio.
- de *estancamiento demográfico*: la búsqueda de vivienda es más restringida en un momento de crisis que obliga a la población a marcharse, mientras la que se queda permanece bastante estable, no realizando muchos movimientos de cambio.
- de *equilibrio demográfico*: la oferta y la demanda están más o menos equilibradas, por lo que la búsqueda es más ajustada a las necesidades y preferencias de cada grupo de población.

Los parámetros iniciales fueron calibrados de forma que reflejen las características de cada escenario, según aparece en la tabla 2.

PARÁMETROS	*Referencia*	*Escenarios*		
		Boom	*Estancamiento*	*Equilibrio*
% de crecimiento de población	0 a 20	5	1	3
% Cambio de tipología de residencia	1 a 15	10	10	10
% población renta alta	0 a 100	25	25	25
% población renta media	0 a 100	50	50	50
% población renta baja	0 a 100	25	25	25
Radio búsqueda nueva residencia (km)	0 a 1,5	25	5	15
Insistencia en la búsqueda (intentos)	1 a 10	7	7	7
Incremento número de viviendas	0 a 100	80	20	50

Tabla 2. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros: boom, estancamiento y equilibrio demográfico.

En todos los escenarios se asume un lapsus temporal para cada ejecución de los diferentes submodelos de: 8 años en el caso de los planificadores, un lapsus temporal de un año para los promotores inmobiliarios y de 4 meses para la población. No obstante, y como venimos indicando, se puede fijar en función de las preferencias del usuario.

Dadas las condiciones establecidas para el primer escenario de *boom demográfico*, se prevé un flujo grande de personas moviéndose simultáneamente. Los resultados reflejan cierta dificultad en encontrar viviendas disponibles, contando con que muchos agentes acaben por agotar su capacidad de insistencia y se adapten al entorno, cambiando su situación socioeconómica. Si analizamos el flujo demográfico espacial, esto es, origen y destino de las reubicaciones de población, los resultados de este escenario muestran que la mayoría de la población insatisfecha que finalmente cambia de residencia lo hace principalmente desde viviendas del eje central hacia otras en este mismo eje. Este movimiento se produce en menor medida en los municipios de los ejes norte y sur (figura 5).

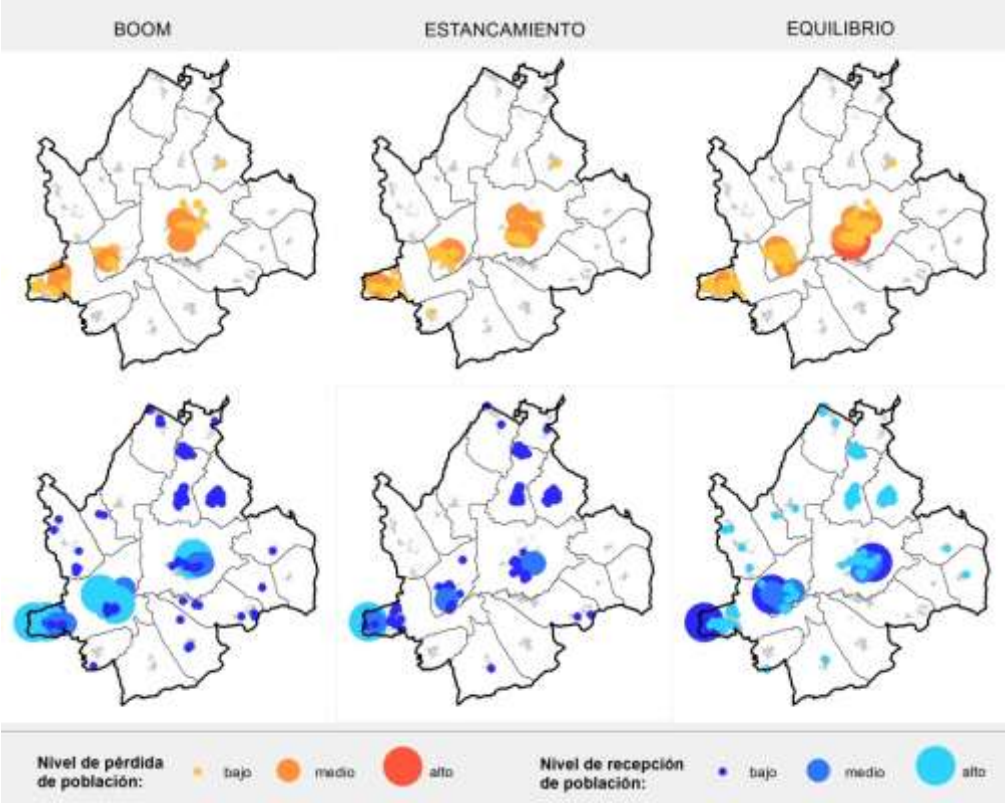


Figura 5. Resultados de reubicación de población en cada uno de los escenarios planteados: (a) boom, (b) estancamiento y (c) equilibrio demográfico.

La distribución espacial resultante del segundo escenario de *estancamiento* muestra un flujo demográfico muy equilibrado saliendo y estableciéndose en el mismo eje central, con algunas reubicaciones destacables en la región nordeste del Corredor (que también se producen en el anterior escenario). Es destacable el bajo interés en reubicarse en los municipios del eje sur.

Por último, podemos comprobar como también los resultados del escenario de *equilibrio demográfico* se ajustan a la situación intermedia planteada respecto a los otros dos escenarios. Así, los destinos aparecen muy bien distribuidos espacialmente, aunque el origen de los desplazamientos se encuentre predominantemente en el eje central, donde está ubicada la mayor parte de la población insatisfecha que busca cambiar de vivienda.

En la tabla 3 aparecen algunos datos numéricos resultantes para cada escenario simulado. Como en los tres casos se optó por ejecutar el prototipo hasta que se agotara el volumen de población insatisfecha, en un momento dado toda la población insatisfecha se encuentra no-asentada y buscando vivienda, y en este punto de inflexión, sólo les queda adaptarse a su entorno o irse del área de estudio. Por este motivo, dichos valores de adaptación y eliminación son bastante elevados.

VALORES	*ESCENARIOS*					
	Boom		*Estancamiento*		*Equilibrio*	
	inicial	*simulado*	*inicial*	*simulado*	*inicial*	*simulado*
Población de Clase Alta	6.093	6.179	5.955	6.086	6.024	6.129
Población de Clase Media	3.468	2.612	3.206	2.554	3.274	2.586
Población de Clase Baja	3.097	3.132	3.015	3.040	3.119	3.077
Viviendas libres (vacías)	814	3.342	728	2.651	780	3.085
Población insatisfecha	1.813	0	1.331	0	1.568	0
Población eliminada	0	735	0	496	0	625
Población adaptada al entorno	0	154	0	152	0	129

Tabla 3. Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas para cada escenario propuesto.

5. CONCLUSIONES

A continuación listamos las principales conclusiones sacadas a partir del desarrollo de esta investigación y de los resultados presentados:

- Según los resultados obtenidos, concluimos que el diferente comportamiento del agente población puede cambiar notablemente la configuración de ocupación urbana de un territorio. En este caso, las decisiones en cuanto a la búsqueda de nuevas viviendas generan una dinámica de movimiento poblacional importante.
- La interfaz del submodelo, aunque parezca complicada en un primer momento debido a la cantidad de posibles interacciones con el usuario, cuenta con pasos sencillos y accesibles en su ejecución, por lo que no resulta demasiado complicado su uso. La organización en bloques facilitó el mejor entendimiento del proceso de simulación.
- Los escenarios presentados son apenas tres ejemplos entre los numerosos que podrían generarse para la simulación prospectiva del crecimiento urbano, debido al importante número de parámetros que pueden ser prefijados por el usuario. De esta forma es posible configurar muy diversas situaciones de partida y explorar las consecuencias de los resultados de esos distintos escenarios. Esta información es de un valor incalculable a la hora de llevar a cabo cualquier propuesta de planificación territorial. Esta flexibilidad permite, por otro lado, intentar manejar de manera más adecuada la complejidad del comportamiento humano en este tipo de procesos.
- El análisis temático de los resultados, aunque no sea en sí mismo el objetivo de esta investigación, muestra una tendencia general de movimiento demográfico en el Corredor del Henares. Pese a las similitudes de los resultados numéricos alcanzados, las diferencias espaciales que se pueden identificar visualmente son interesantes, especialmente el importante flujo registrado en el ya consolidado eje central. También es destacable que ninguno de los dos márgenes pierden población en ningún escenario, aunque el que más gana siempre es el eje norte (con más elementos de "atracción").

6. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación coordinado *SIMURBAN2: Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias*, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (ref. CSO2012-38158-C02-01), Subproyecto *Geosimulación de escenarios futuros de crecimiento urbano a partir de información espacial de detalle y valoración de sus resultados desde la planificación ambiental*, y parcialmente financiado por la beca IELAT-SANTANDER. Especial agradecimiento a Cesar Vergara por su aporte fundamental a la labor de programación en *NetLogo*.

7. BIBLIOGRAFÍA

Barros, J. (2012): "Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach", en Heppenstall, A.; Crooks, A. T.; See, L. M. y Batty, M. (Eds.): *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 571-589.Benenson, I., y Torrens, P. M. (2004): *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena*. John Wiley & Sons, L.

Batty, M.; Desyllas, J. y Duxbury, E. (2003): "Safety in Numbers? Modelling Crowds and Designing Control for the Notting Hill Carnival". *Urban Studies*, 40(8), pp. 1573-1590.

Cantergiani, C.C. (2011): "Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica", *Serie Geográfica*, 17, pp. 29-43.

Cantergiani, C.C.; Gómez Delgado, M. y Vergara, C. (2014): "Desarrollo de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano: submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable", en Ramón, A. (Ed.): *Tecnologías de la Información para nuevas formas de ver el territorio*, Alicante, Publicaciones Universidad

de Alicante, pp. 10-18. 25-27 de Junio de 2014, Alicante, XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.

Cantergiani, C.C. y Gómez Delgado, M. (2016): "Diseño de un Modelo Basado en Agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid)", *Boletín de la AGE*, 70, pp. 259-283.

Crooks, A.T.; Patel, A. y Wise, S. (2014): "Multi-Agent Systems for Urban Planning". En Pinto, N. N.; Tenedório, J. A.; Antunes, A. P. y Roca, J. (Eds.), *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories,* pp. 29-56. Hershey, PA: IGI Global.

Dahal, K.R. y Chow, T.E. (2014): "An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics", *International Journal of Geographical Information Science*, 28, 11, pp. 2281-2303.

Ettema, D. (2011): "A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets". *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(1), pp. 1-11.

Feitosa, F.F.; Le, Q.B. y Vlek, P.L.G. (2011): "Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities", *Computers, Environment and Urban Systems,* 35, 2, pp.104-115.

Filatova, T.; Parker, D.C. y Van Der Veen, A. (2009): "Agent-Based Urban Land Markets: Agent´s princing behavior, land prices and urban land use change". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12 (1)(3).

Fontaine, C.M., y Rounsevell, M.D.A. (2009): "An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape", *Landscape Ecology*, 24, 9, pp. 1237-1254.

Gilbert, N. (2008): *Agent-Based Models*. Sage Publications.

Jiang, B. (2000): "Agent-based approach to modeling urban and environmental systems within GIS". *9th International Symposium on Spatial Data Handling.*

Plata Rocha, W., Gomez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): "Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la CM a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG". *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, 4.

Pumain, D. y Sanders, L. (2013): "Theoretical principles in interurban simulation models: a comparison". *Environment and Planning A*, 45, pp. 2243-2260.

Railsback, S.F., y Grimm, V. (2009): A *Course in Individual-based and Agent-based Modeling*. Princeton University Press.

Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Gherin-Pace, F., y Bura, S. (1997): "SIMPOP: a multi-agents system for the study of urbanism", *Environment and Planning B*, 24, pp. 287-305.

Souza, L. (2005): *O ensino da psicologia social e suas representações. A formação do saber e o saber em formação.* PhD, UFRJ, Rio de Janeiro.

Tabernero, C.; Hernández, B.; Cuadrado, E.; Luque, B. y Pereira, C.R. (2015): "A multilevel perspective to explain recycling behaviour in communities". *Journal of Environmental Management*, 159, pp. 192-201.

Torrens, P.M. (2012): "Moving agent-pedestrians through space and time". *Annals of the Association of American Geographers*, 102(1), pp. 35-66.

Valera, S. y Pol, E. (1994): "El concepto de identidad social urbana: una aproximación entre la Psicología Social y la Psicología Ambiental", *Anuario de Psicología*, 62, pp. 5-24.

Wilensky, U. (1999): NetLogo. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS, ECUACIONES Y ACRÓNIMOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación esquemática de la estructura de un modelo basado en agentes. 21

Figura 1.2. Nivel de complejidad de modelos de cambios de usos del suelo según los tres niveles de complejidad. 32

Figura 1.3. Ejemplo de patrones espaciales producidos por el módulo periferización, usando múltiples semillas como condición inicial. 39

Figura 1.4. Interface del modelo HI-LIFE en NetLogo y proyección demográfica de agentes para simulación de 25 años. 40

Figura 2.1. El Corredor del Henares en diferentes agrupaciones municipales de la Comunidad de Madrid. 46

Figura 2.2. Situación y delimitación del Corredor del Henares y representación de los ejes: central, norte y sur. 47

Figura 2.3. Tasa de crecimiento demográfico en los municipios del Corredor del Henares, y agrupados por ejes central, sur y norte. 49

Figura 2.4. Clasificación del suelo en el Corredor del Henares, 1996-2003-2006. 54

Figura 2.5. Superficie urbana y crecimiento, 2000-2006-2009. 58

Figura 2.6. Expansión de áreas urbanas, 2000-2006-2009. 60

Figura 2.7. Precio de compra de la vivienda entre 2002 y 2012. 61

Figura 2.8. Generación del dato de edificación y viviendas por pixel. 68

Figura 2.9. Generación de la información sobre capacidad máxima de población por pixel. 69

Figura 3.1. Interacción de los agentes que inducen el crecimiento urbano. 75

Figura 3.2. Esquema del proceso de decisión de los agentes. 79

Figura 3.3. Modelo conceptual de decisión del agente planificador urbano. 80

Figura 3.4. Modelo conceptual de decisión del agente promotor inmobiliario. 81

Figura 3.5. Modelo conceptual de decisión del agente población. 82

Figura 3.6. Estructura del modelo basado en agentes integrado. 83

Figura 4.1. Diagrama de flujo que describe las distintas acciones de los planificadores urbanos y su secuencia. 90

Figura 4.2. Distribución espacial de áreas no aptas para asignación de suelo urbanizable (restricción). 91

Figura 4.3. Interfaz gráfica (NetLogo) del submodelo de asignación de nuevas áreas urbanizables (SM1) y sus herramientas de control. 94

Figura 4.4. Distribución de nuevas áreas urbanizables (en naranja) según diferentes perfiles de planificadores urbanos: (a) sostenible, (b) conservador, (c) especulador. 100

Figura 4.5. Evolución de áreas urbanizables en una supuesta nueva clasificación del suelo según los tres escenarios: (a) sostenible, (b) conservador, (c) especulador. 102

Figura 5.1. Diagrama de flujo que describe las distintas acciones de los promotores inmobiliarios y su secuencia. 109

Figura 5.2. Interfaz gráfica (NetLogo) del submodelo de ampliación del parque de viviendas (SM2) y sus herramientas de control. 112

Figura 5.3. Distribución de nuevas viviendas (en detalle) para promotores inmobiliarios según escenarios: (a) especulador, (b) sostenible y (c) crisis. 117

Figura 5.4. Comparación de resultados de tres simulaciones considerando el área de búsqueda de 100m (a), 750m (b) y 1,5km (c), y demás parámetros de arranque idénticos (crecimiento de viviendas máximo – 5.000 – con coeficientes de estándar alto, medio y bajo definidos en 50). 119

Figura 6.1. Esquema resolutivo de actualización de la disponibilidad de plazas en las viviendas en función de su ocupación. 128

Figura 6.2. Diagrama de flujo que describe secuencialmente las distintas acciones por parte del agente población. 129

Figura 6.3. Parámetros a ser configurados por el usuario en la interfaz para definir un escenario concreto. 130

Figura 6.4. Interfaz gráfica diseñada en la plataforma Netlogo, del submodelo de ocupación de nuevas residencias por parte de la población y sus herramientas de control. 132

Figura 6.5. Ejemplo de representación de la población a través de la distribución de las viviendas existentes representadas por pixel. 133

Figura 6.6. Resultados de reubicación de población en cada uno de los escenarios planteados: (a) boom, (b) estancamiento y (c) equilibrio demográfico. 136

Figura 7.1. Representación esquemática de la resolución temporal de los tres submodelos en el Modelo Integrado. 140

Figura 7.2. Representación esquemática del flujo y ejecución continuada de los tres submodelos (SM1, SM2, SM3) en el Modelo Integrado, general y por ciclos. 141

Figura 7.3. Representación esquemática de la situación inicial en cada ciclo de ejecución del Modelo Integrado, que muestra la retroalimentación de datos espaciales entre los tres submodelos y secuencia de ejecución del ejemplo presentado. 143

Figura 7.4. Interfaz gráfica (NetLogo) del Modelo Integrado de Simulación del Crecimiento Urbano en el Corredor del Henares y sus herramientas de control. 144

Figura 7.5. Ejemplo de secuencia de ejecución de los submodelos en el modelo integrado teniendo en cuenta el escenario tendencial. 148

Figura 7.6. Resultados espaciales de los escenarios tendencial (a, b) y sostenible (c, d) del Modelo Integrado indicando la expansión de nuevas áreas urbanizables (a, c) y el crecimiento del parque de viviendas (b, d). 149

Figura 7.7. Resultado espacial del escenario de crisis del Modelo Integrado indicando la dinámica de ocupación urbana según distribución de la población. 150

Figura A.1. Contenido del Protocolo ODD. 177

Figura A.2. Arquitectura del modelo integrado según proceso externo (nivel usuario) o interno. 181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de las características de los distintos tipos de modelos prospectivos de simulación urbana, compilado a partir de (Börjeson et al., 2005, Aguilera Benavente et al., 2010a, Gómez Delgado y Rodríguez Espinosa, 2012). 34

Tabla 2.1. Diferentes configuraciones de municipios que componen el Corredor del Henares.. 45

Tabla 2.2. Datos de planeamiento urbanístico de los municipios del Corredor del Henares. 52

Tabla 2.3. Clasificación del suelo en la Región Urbana de Madrid, 2003. 53

Tabla 2.4. Áreas urbanas y evolución en el área de estudio, 2000-2006-2009. 57

Tabla 2.5. Distribución de clases del suelo en el Corredor del Henares, 2009. 59

Tabla 2.6. Listado de datos espaciales disponibles para la creación del prototipo..... 64

Tabla 3.1. Agentes y elementos de atracción espacial. 77

Tabla 4.1. Descripción de factores a considerar por el planificador urbano para la asignación de áreas urbanizables. 89

Tabla 4.2. Resumen del análisis estadístico del crecimiento de superficie urbana real y urbanizable planificada para delimitación de umbrales inferior y superior de la demanda. 93

Tabla 4.3. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros con perfiles de planificador urbano sostenible, conservador y especulador. 98

Tabla 5.1. Descripción de factores a considerar por el promotor inmobiliario para la ampliación del parque de viviendas. 108

Tabla 5.2. Componentes y valoración considerados en cada escenario de promotores inmobiliarios. 114

Tabla 5.3. Ponderación de los distintos factores para la asignación de nueva edificación residencial, según condiciones definidas para cada escenario (según la tabla 5.2). 115

Tabla 5.4. Ponderación espacial (variable p en la ecuación 5.1) por defecto en cuanto a los elementos de interés de los promotores inmobiliarios para el desarrollo residencial de alto, medio y bajo estándar (que pueden ser cambiados por el usuario). 116

Tabla 6.1. Combinaciones de atributos a las que pueden asumir el agente a lo largo de la simulación. 125

Tabla 6.2. Descripción de factores a considerar por la población para ocupar nueva vivienda.127

Tabla 6.3. Ponderación de los distintos criterios espaciales de preferencia de localización residencial en función del tipo de grupo poblacional (variable p en la ecuación 6.1)..... 131

Tabla 6.4. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros: boom, equilibrio y estancamiento demográfico. 135

Tabla 6.5. Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas para cada escenario propuesto. 137

Tabla 7.1. Parámetros de los tres escenarios del Modelo Integrado: tendencial, sostenible y de crisis. 147

Tabla A.1. Descripción de variables directas consideradas para la ejecución del Modelo Integrado. 179

ÍNDICE DE ECUACIONES

[Ecuación 4.1] 92
[Ecuación 5.1] 111
[Ecuación 6.1] 131

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC	Autómatas Celulares
BD	Base de Datos
CASA	*Centre for Advanced Spatial Analysis*
CLC	*CORINE Land Cover*
CM	Comunidad de Madrid
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica
CoMSES	*Open Agent Based Modeling Consortium*
DG	Dirección General
DS	Dinámica de Sistemas
EDM	Encuesta Domiciliaria de Transporte
ENP	Espacios Naturales Protegidos
GAS	*Geographic Automata Systems*
INE	Instituto Nacional de Estadística
IV	Infraestructuras Verdes
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
MBA	Modelos Basados en Agentes

MDT	Modelo Digital del Terreno
MFOM	Ministerio de Fomento
MLU	*Madrid Land Use*
MVIV	Ministerio de Vivienda
NUTS	Nomenclatura de Unidades Territoriales Estadísticas
ODD	*Overview, Design concepts and Details*
ODD+D	*Overview, Design concepts, Details and Human Decision-Making*
OE	Objetivo específico
PAU	Plan de Actuación Urbanística
PB	Agente Población
PEIT	Plan Estratégico de Infraestructura de Transportes
PGOU	Plan General de Ordenación Urbana
PI	Agente Promotor Inmobiliario
PIB	Producto Interno Bruto
PU	Agente Planificador Urbano
RN2000	Red Natura 2000
SADE	Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial
SC	Sección Censal
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIU	Sistema de Información Urbana
SMA	Sistema Multi-Agentes
TIG	Tecnologías de la Información Geográfica
UAB	Universidad Autónoma de Barcelona
UAH	Universidad de Alcalá
UCM	Universidad Complutense de Madrid
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
ZEPA	Zona de Especial Protección de Aves



Universidad de Alcalá

Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente

Unidad Docente de Geografía

Programa de Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección