

## DESARROLLO DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO ÓPTIMO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID APLICANDO METODOS DE EVALUACION MULTICRITERIO Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRÁFICA

W. PLATA ROCHA<sup>1</sup>, M. GÓMEZ DELGADO<sup>2</sup>, J. BOSQUE SENDRA<sup>2</sup>

Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Sinaloa  
Av. De Las Américas y Blvd. Universitarios. CP. 80 000. Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>1</sup>[wenseslao.plata@alu.uah.es](mailto:wenseslao.plata@alu.uah.es)

Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá.

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

<sup>2</sup>[montserrat.gomez@uah.es](mailto:montserrat.gomez@uah.es)

<sup>2</sup>[joaquin.bosque@uah.es](mailto:joaquin.bosque@uah.es)

### RESUMEN

La región de Madrid es considerada uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, debido al intenso crecimiento urbano disperso que se ha producido en los últimos 15-20 años. En el presente trabajo se explora la elaboración de modelos de crecimiento urbano óptimos basados en técnicas de Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica para simular la localización óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid para el año 2000 (partiendo de los datos reales de 1990) y para el año 2020 (partiendo de los datos reales del año 2000 y de los resultados de crecimiento "óptimo" obtenidos para ese mismo año). Para ello se incluyeron hasta 15 factores relacionados con aspectos ambientales, sociales y económicos, con el ánimo de generar propuestas de futuro que tengan en cuenta los tres principales componentes del desarrollo sostenible. Los resultados obtenidos muestran, en general, patrones de crecimiento más compactos, junto a núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio y en zonas de escaso valor ambiental o poco valor productivo.

Palabras clave: Planificación, SIG, EMC, asignación óptima de usos del suelo, crecimiento urbano, Madrid.

### DEVELOPMENT OF MODELS OF OPTIMAL URBAN GROWTH FOR THE COMMUNITY OF MADRID

#### ABSTRACT

The region of Madrid is considered one of the hot-spots in urban development of the European Union, due to the intense dispersed urban growth produced in the last 15-20 years. In the present work it is explored in the elaboration of normative models based on techniques of Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information System to simulate the optimal location of

residential, commercial and industrial zones in the Community of Madrid between years 1990, 2000 and 2020. For it they were included up to 15 factors related to environmental, social and economic aspects, with the interest to generate future proposals that consider the three main components of the sustainable development. The results show more compact patterns of growth, next to urban nucleus of medium and inter-medium size and in zones of little environmental value or little productive value.

Keywords: Planning, GIS, MCE, optimal allocation of land uses, urban growth, Madrid.

## 1. Introducción

Es sabido que uno de los factores que ha influido de manera decisiva en los cambios de uso del suelo es, sin duda, el crecimiento acelerado de las superficies artificiales, provocando efectos importantísimos en la alteración del medioambiente a escala local, regional y global.

Ante esto, se han venido proponiendo diferentes alternativas para corregir o disminuir el impacto que producen las nuevas zonas urbanas sobre el territorio, asumiendo que son las ciudades donde se concentran y generan los principales problemas de contaminación, pero también considerándolas como un potencial motor impulsor de un desarrollo económico y social sostenible.

Paralelamente se ha venido dando un arduo debate sobre el crecimiento urbano y su sostenibilidad, observándose que los patrones compactos de crecimiento urbano pueden ayudar a reducir el consumo de energía y los recursos naturales (Yeh y Li, 2001; Rueda, 2002). También en los últimos años las propuestas de planificación urbana intentan evitar el crecimiento en forma de mancha de aceite, así como el crecimiento difuso o *urban sprawl*, proponiéndose como una perspectiva más funcional el desarrollo policéntrico de las ciudades -lo cual implica potenciar los núcleos y no los ejes- y la formación de redes regionales de ciudades como uno de los principios o directrices para conseguir un desarrollo territorial sostenible, cohesionado económica y socialmente, que abra nuevas posibilidades en la relación entre espacios rurales y urbanos (Comisión Europea, 1999).

Asimismo, y mediante la incorporación, no solo de criterios económicos, sino también de criterios ambientales y sociales en los procesos de planificación, se está caminando hacia un desarrollo territorial sostenible, el cual pretende: "*alcanzar un equilibrio a largo plazo entre el desarrollo económico, la protección del medio ambiente, el uso eficiente de los recursos y la equidad social*" (citado por Diamantini y Zanon, 2000; Liu *et al.*, 2007; Ligmann-Zielinska *et al.*, 2008; Salado García *et al.*, 2008).

A la par, ha surgido una creciente necesidad de desarrollo de herramientas informáticas que den apoyo a los procesos de planificación del territorio (MacDonald y Faber, 1999; Pettit, 2002). En este sentido, en las dos últimas décadas el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías, así como la adaptación de las existentes, han tenido gran relevancia en la simulación de modelos espaciales para la ayuda a la toma de decisiones (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005; López Vázquez *et al.*, 2008).

En este contexto, las técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC) han demostrado sobradamente su eficiencia a la hora de diseñar modelos "óptimos" territoriales, ya que consideran la adecuación y aptitud que presenta el territorio para que sobre él se desarrolle una determinada actividad (residencial, industrial, comercial, etc.). Además, permiten plantear una combinación de diferentes criterios (por ejemplo: ambientales, sociales y económicos) que posibilitan la inclusión en los modelos desarrollados de ciertos principios de sostenibilidad. Estas técnicas vienen siendo aplicadas a diferentes actividades tales como: asignación de uso de suelo, localización de instalaciones no deseables, zonificación de corredores ambientales y áreas naturales (Paegelow *et al.*, 2003; Svoray *et al.*, 2005; Molero Melgarejo *et al.*, 2007; Geneletti y van Duren, 2008; Giordano y Riedel, 2008; Chang *et al.*, 2008). Del mismo modo, su aplicación ha sido de gran interés en la evaluación de la aptitud o capacidad del territorio para acoger nuevas urbanizaciones y grandes áreas industriales y comerciales (Barredo Cano, 1996; Wu y Webster, 1998; Barredo Cano y Bosque Sendra, 1999; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002 y 2006a; Al-Shalabi *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007; Ligmann-Zielinska, *et al.*, 2008).

Deteniéndonos en las técnicas de EMC disponibles, está demostrado que la sumatoria lineal ponderada (WLC, *Weigh Linear Combination*) y el método de jerarquías analíticas (AHP, *Analytic Hierarchy Process*) son los más utilizados en la asignación de usos del suelo (Malczewski, 2004). Si bien últimamente se han venido aplicando técnicas de EMC borrosas (Yager y Kelman, 1999; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002; Phua y Minowa, 2005; Malczewski, 2006b; Baja *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2008; Boroushaki y Malczewski, 2008), éstas presentan todavía ciertas limitaciones, especialmente cuando se trabaja con una gran cantidad de factores en los modelos.

En cuanto a la selección de los factores utilizados para modelar los usos del suelo, comúnmente se utilizan variables espaciales relacionadas con criterios económicos, de localización, sociales y ambientales, tales como, proximidad a: zonas urbanas, áreas industriales, instalaciones no deseables, carreteras, aeropuertos, cuerpos de agua, parques, bosques, humedales; variables relacionadas con el precio del suelo, densidad de población, usos del suelo y clasificación del suelo; pendiente, altitud y orientación del terreno, calidad visual, etc. (Wu y Webster, 1998; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002; Al-Shalabi *et al.*, 2006; Malczewski, 2006a; Liu *et al.*, 2007; Molero Melgarejo *et al.*, 2007; Boroushaki y Malczewski, 2008; Ligmann-Zielinska *et al.*, 2008).

Por otra parte, como herramientas informáticas que dan apoyo en la toma de decisiones espaciales, existen varios Sistemas de Información Geográfica (SIG) que disponen de módulos específicos para llevar a cabo este tipo de procesos de planificación. En este sentido, cabe destacar a los SIG *IDRISI*, *ArcGIS* o *ILWIS* (Eastman *et al.*, 1995; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski *et al.*, 2003; Marinoni, 2004; Eastman, 2006; Boroushaki y Malczewski, 2008; López Vázquez *et al.*, 2008).

Con respecto al área de estudio que vamos a abordar, la Comunidad de Madrid, podemos decir que en los últimos 15-20 años se ha convertido en una región de un dinamismo territorial considerable, debido, principalmente, al crecimiento de las superficies artificiales de forma dispersa sobre todo su territorio. Este crecimiento no ha venido de la mano de una planificación con unos criterios mínimos de sostenibilidad, por lo que hoy día podemos constatar importantes impactos territoriales y paisajísticos en toda la región. A modo de ejemplo, podemos decir que tan sólo en la última década del siglo pasado fueron urbanizadas aproximadamente 50.000 hectáreas, en

detrimento principalmente de usos agrícolas y forestales (Plata Rocha *et al.*, 2009). Por esto resulta de especial importancia explorar en el desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimos o deseables que, basándonos en la valoración del crecimiento urbano real ocurrido en los últimos años, nos permita llevar a cabo una asignación futura con criterios de crecimiento óptimo.

Así, el objetivo principal de este trabajo es realizar un ensayo metodológico para la simulación de un modelo de crecimiento urbano óptimo que nos permita localizar nuevos usos residenciales, comerciales e industriales en aquellas partes del territorio con vocación y aptitud para este tipo de actividad, fundamentado, como pilares básicos del desarrollo urbano sostenible, en la utilización de factores sociales, económicos y ambientales. Esto nos permitirá hacer un análisis y reflexión sobre el modelo de desarrollo urbano actual y futuro de la Comunidad de Madrid. Para ello, en primer lugar, se elaborará un modelo óptimo para el año 2000, partiendo de los datos de ocupación del suelo de 1990. Con estos resultados se realizará una comparación y evaluación entre el modelo de crecimiento urbano óptimo y el ocurrido en la realidad para el año 2000. Posteriormente se plantearán dos modelos de simulación para el año 2020, uno partiendo de la ocupación real en el año 2000, y otro partiendo de las zonas óptimas obtenidas para ese mismo año. Esto nos permitirá tener una referencia a largo plazo de cómo hubiese sido el crecimiento urbano deseable desde 1990 al 2020, y poder compararlo con el escenario más realista que parte de lo real del año 2000 a lo deseable en 2020.

## 2. Área de estudio

La región de Madrid se considera uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, experimentando en los últimos 10-15 años un proceso de rápida urbanización ([figura 1](#)), donde han predominado las urbanizaciones residenciales con patrones difusos adyacentes o desconectados de los centros urbanos existentes (EEA, 2006; Santiago Rodríguez, 2007; García Palomares y Gutiérrez Puebla, 2007).

Dentro de esta dinámica, se puede señalar el hecho de que aproximadamente 50.000 ha se han convertido en superficies artificiales entre 1990 y 2000, es decir, cerca de un 50 % de las existentes en 1990 (Aldana, 2005; OSE, 2006; Plata Rocha y otros, 2009). También hay que destacar que el crecimiento de la población no justifica esta dinámica, pues en ese mismo período sólo aumentó en un 5,16%.

Uno de los factores determinantes en este proceso es la demanda de primeras y segundas residencias (López de Lucio, 2003). Esta demanda se consolidó gracias a la situación económica favorable vivida en este período en España. No obstante, el precio de la vivienda ha ido en progresivo aumento, lo que ha provocado que la población busque alternativas de vivienda más asequibles y se instale cada vez más lejos de los centros urbanos más consolidados, donde el suelo es más caro, y de los centros de trabajo, lo que ha supuesto incrementar notablemente la dependencia del coche para la movilidad diaria (EEA, 2006).

Lo anterior se ha visto favorecido aún más con la mejora en la red de transporte (autopistas, carreteras de circunvalación, y ampliaciones y mejoras de la red ferroviaria) que ha fomentado un proceso de descentralización de los sectores productivos y residenciales (López de Lucio, 2003 y

2004; EEA, 2006), ocasionando una progresiva presión urbanística y la pérdida de importantes cantidades de suelo dedicado a la agricultura, entre ellos los de mejor calidad (Oñate Cid, 2002; Encinas Escribano *et al.*, 2005).

Como resultado de esta dinámica, la región urbana de Madrid se transforma a una velocidad notable, configurándose un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad, dentro del contexto de un marco débil de planeamiento espacial, común en una gran cantidad de regiones urbanas europeas, en las cuales la capacidad reguladora de los municipios no puede igualar las enormes fuerzas que conforman el nuevo territorio (López de Lucio, 2003). No obstante, esto debe ser corregido mediante políticas públicas que re-equilibren y re-direccionen las dinámicas puestas en marcha (Leboreiro, 1999; López de Lucio, 2003).

### 3. Datos y metodología

Las categorías de superficies artificiales seleccionadas para realizar esta asignación óptima del crecimiento urbano de la región fueron las que experimentaron un mayor crecimiento en los últimos 15-20 años, a saber, las superficies residenciales, industriales y comerciales.

Es necesario señalar que las zonas residenciales que se van a asignar son superficies destinadas a áreas residenciales continuas y discontinuas, mientras que las zonas comerciales se refieren, principalmente, a aquellas dedicadas a grandes áreas comerciales y de esparcimiento, como hipermercados y grandes centros comerciales. Por su parte, las zonas industriales se corresponden con la asignación de polígonos industriales, sin incluir instalaciones de carácter especialmente contaminantes, que requerirían un tratamiento y asignación especial.

Para desarrollar los modelos se recopiló un conjunto de variables espaciales, tomando como referencia la literatura existente sobre este tipo de estudios, pero, sobre todo, teniendo en cuenta la disponibilidad de información para nuestra área de estudio. Finalmente se recopiló datos referentes a usos del suelo (*Corine Land Cover* 1990 y 2000), tipos de suelo, hidrografía, carreteras (1991 y 1998), espacios naturales protegidos (*Red Natura*, 2000), vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, geotecnia, instalaciones no deseables, equipamientos, altitud, pendiente y orientación del terreno, población y delimitaciones administrativas. Dicha información se extrajo de diferentes fuentes, tales como: Instituto Geográfico Nacional, Instituto Geológico y Minero, Consejería de Agricultura y Servicio de Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid, Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares, entre otras. La escala original de la información es en general 1:100.000, aunque en algunos casos se tuvo que recurrir a datos de escala mayor o menor. Toda la información fue tratada en formato raster en el SIG Idrisi Andes, utilizando un tamaño de píxel de 50m.

En cuanto a la metodología seguida, como se comentó anteriormente una de las técnicas de EMC más ampliamente utilizadas en distintas investigaciones es la sumatoria lineal ponderada. Asimismo, el método de las jerarquías analíticas ha sido también ampliamente probado en modelos que tienen una estructura jerárquica, y en los cuales se pondera la importancia relativa de los elementos en cada nivel de la jerarquía, descendiendo del más general al más concreto. Para

ponderar las alternativas y factores en los modelos existen diferentes métodos (escala de 7 puntos, tasación simple, ordenación simple, etc.), no obstante uno de los más aceptados y utilizados es el método de comparación por pares de Saaty. En este trabajo se utilizan dichos métodos para valorar, ponderar y agregar los factores, así como para obtener los mapas de aptitud.

Con respecto a la normalización de los factores, se aplicaron operadores borrosos, en su mayoría funciones lineales y sigmoideas. No obstante, en algunos casos particulares, se aplicaron metodologías específicas, como es el caso de los factores de accesibilidad a núcleos urbanos, uso del suelo y población ponderada por la distancia.

Una vez obtenidos los factores normalizados y sus pesos finales se aplicó, como se comentó anteriormente, la sumatoria lineal ponderada para obtener los mapas de aptitud para los usos de suelo residencial, comercial e industrial, basados en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij}$$

Donde:  $r_i$  es el nivel de aptitud del píxel  $i$ ;  $w_j$  es el peso del factor  $j$ ; y  $v_{ij}$  es el valor normalizado (0-255) del píxel  $i$  en el factor  $j$ .

Posteriormente, se utilizó la metodología diseñada por Franco y Bosque (1997) para convertir los mapas de aptitud en mapas de parcelas de adecuación con un tamaño predefinido. Este procedimiento permite paliar los problemas de dispersión, fragmentación y obtención de parcelas demasiado pequeñas que se presentan cuando se trabaja con mapas de aptitud a nivel de píxel.

Con los mapas de parcelas para los tres objetivos (residencial, comercial e industrial), y utilizando una técnica de asignación multiobjetivo (MOLA, *MultiObjective Land Allocation*), se generó finalmente el mapa de asignación óptima para las zonas residenciales, comerciales e industriales.

Dicha metodología ha sido implementada en una herramienta específica denominada *BuildScenary*, diseñada y desarrollada en el marco del proyecto de investigación SIMURBAN, especialmente para la asignación de usos del suelo. En ella se integra la sumatoria lineal ponderada como técnica de agregación de los factores y elaboración de los mapas de aptitud para cada objetivo (uso de suelo), un método de generación de mapas en parcelas de adecuación media y finalmente una asignación multiobjetivo de dichos mapas (Rodríguez Álvarez *et al.*, 2009). Este módulo se encuentra disponible en [http://www.geogra.uah.es/web\\_simurban/index.php](http://www.geogra.uah.es/web_simurban/index.php).

En el [Apéndice 1](#) se presenta un esquema de la metodología seguida en el estudio. A continuación presentamos la metodología específica para el desarrollo del modelo de asignación óptima para el año 2000. En el apartado 4.2 se describirán las características del modelo desarrollado para el año 2020, con las dos variantes propuestas.

### 3.1. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2000, partiendo de los datos de 1990

Con los factores finalmente disponibles se trató de cubrir aspectos como la accesibilidad a servicios, comercios y otros elementos importantes para el desarrollo funcional de la ciudad, tales como la accesibilidad a: las zonas urbanas, carreteras e industrias. También se incluyen factores con el fin de proteger el medio ambiente, los espacios naturales y sobre todo que dicha asignación no suponga una inversión económica muy elevada.

A continuación se precisarán uno a uno los 15 factores y otras tantas restricciones utilizadas y el tratamiento que se le dio para su posterior inclusión en el modelo de crecimiento urbano óptimo basado en técnicas de evaluación multicriterio.

#### 3.1.1. Criterios (factores y restricciones) utilizados y su tratamiento

En primer lugar se elaboró un mapa de restricciones partiendo de la planificación legal existente para el año 1996, concretamente las zonas clasificadas como suelo no urbanizable de protección. Cabe señalar que dentro de este mapa se consideran casi en su totalidad a los espacios naturales protegidos. También se consideraron como restricciones las superficies artificiales existentes en 1990, cuerpos de agua y la red hidrográfica ([figura 2](#)).

Por otro lado, las variables finalmente recopiladas, y con las que se pretendía minimizar el impacto sobre el medio ambiente y maximizar el desarrollo económico y social, fueron agrupadas en factores ambientales, económicos y sociales.

#### A) Factores ambientales

*Usos del suelo.* Actualmente en la región de Madrid la producción agraria se encuentra en declive debido a la baja productividad de las cosechas, a las inadecuadas infraestructuras y a la alta presión ejercida sobre las áreas periurbanas, donde en un pasado se desarrollaba una cierta actividad agrícola (Martínez Falero, 2002). Esto se contrapone al hecho de que la agricultura sigue siendo una actividad esencial para mantener el tejido social y el equilibrio territorial (MAPYA, 2004), lo cual viene a confirmar el papel esencial e ineludible que tiene la agricultura en la planificación territorial sostenible.

La ausencia de regulaciones específicas en la planificación territorial predice a corto plazo que la agricultura madrileña podría quedar restringida a las zonas de menor potencialidad, encontrándose, de esta manera condenada a desaparecer o a ser una actividad absolutamente marginal dentro de los sectores productivos. Por ello, consideramos necesario incluir en el modelo un factor que considerara, además de la protección de las zonas agrícolas, a los pastizales, y a otros usos del suelo con un valor ambiental y económico.

Para tomar en cuenta las consideraciones anteriores, nos basamos en el hecho de que la productividad agrícola y ganadera no se produce de manera homogénea en la Comunidad de

Madrid. Por tal motivo, se ha hecho una zonificación del área de estudio clasificando las zonas de mayor productividad agraria (usos agrícolas y pastizales naturales) y las de mayor valor ambiental (bosques), utilizando para ello los datos del censo agrario a nivel de unidades territoriales (NUTS) ([tabla 1](#) y [figura 3](#)).

Posteriormente, tomando en cuenta dicha zonificación y las categorías del mapa de uso del suelo *Corine Land Cover* 1990 (CLC1990) al nivel 3, se dio un peso mayor a aquellos usos de mayor productividad o con valor ambiental, y menor peso a los usos que podrían ser más aptos para el asentamiento de nuevas urbanizaciones ([tabla 2](#)). Después, se reclasificaron los usos del suelo asignándole su correspondiente valor de aptitud, para posteriormente normalizar dicho mapa por medio de una función borrosa de tipo lineal con decremento monótono y obtener así el factor de usos de suelo.

*Protección de suelo de mayor productividad.* Con este factor se intenta que las nuevas zonas urbanas se desarrollen, hasta donde sea posible, en suelos de peor calidad y menos desarrollados. Para ello, partiendo del mapa de suelos, se dieron valores de menor aptitud a los luvisoles y fluvisoles, considerando que estos suelos son los que cuentan con las mejores propiedades, por ejemplo, para el desarrollo de la actividad agrícola. Este factor en alguna medida viene a complementar al factor anterior, ya que no toda la superficie de los suelos aptos para la agricultura está actualmente explotada.

*Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos.* Para la asignación de las superficies artificiales es necesario implementar medidas que disminuyan la contaminación que sobre los mantos acuíferos pueden producir los vertidos contaminantes de las ciudades. Esto se puede hacer si se considera que las zonas urbanas deben desarrollarse en formaciones con la menor permeabilidad, en terrenos metamórficos y graníticos. Considerando lo anterior, se diseñó un factor para las zonas urbanas y comerciales, y otro para las zonas industriales, bajo la lógica de que las zonas industriales pueden contaminar más que las zonas residenciales y comerciales.

*Lejanía a espacios naturales y a la red hidrográfica.* Con estos factores se intenta que las nuevas superficies artificiales se localicen lejos de estos elementos. Así, la adecuación para el desarrollo de nuevos usos urbanos aumentaría a medida que nos alejemos de los espacios naturales existentes y de la red hidrográfica.

## *B) Factores económicos*

*Pendiente.* La adecuación fue considerada inversamente proporcional al valor de la pendiente en cada píxel, fijándose adecuación nula a partir del 10 % de pendiente del terreno. Con esto se intenta garantizar que las nuevas zonas urbanas se asignen en sitios topográficamente llanos, con la finalidad de minimizar el coste de construcción y de introducción de los servicios básicos.

*Proximidad a zonas urbanas.* Comúnmente, en los trabajos revisados la influencia de este factor se considera en función de la distancia a las zonas urbanas (menor distancia mayor aptitud). No obstante, en nuestro trabajo se pretende considerar la sostenibilidad del territorio y para ello nos basamos en las recomendaciones hechas en la Estrategia Territorial Europea, donde se especifica



que se debe dar prioridad al crecimiento de ciudades medias e intermedias y limitar el crecimiento de ciudades grandes, así como mantener la ruralización de las localidades pequeñas (Comisión Europea, 1999).

Para diseñar este factor fue necesario hacer una clasificación de los núcleos urbanos en función del número de habitantes, tomando esto como medida de la dimensión de las ciudades ([tabla 3](#)). Con dicha clasificación se obtuvieron 5 mapas de núcleos urbanos, con los cuales se procedió a obtener 5 mapas de proximidad y su posterior normalización entre 0 y 255. A partir de dichos mapas y aplicando el método de comparación por pares de *Saaty* se calcularon los pesos para cada mapa ([tabla 3](#)). Por último, con los mapas normalizados y sus pesos, se aplicó una sumatoria lineal ponderada para obtener el mapa final de accesibilidad a las zonas urbanas para la Comunidad de Madrid.

*Proximidad a zonas industriales y comerciales.* En primer lugar es necesario señalar que para este caso se modelan en conjunto las zonas comerciales e industriales, debido a que dichas categorías están agrupadas en una sola en el CLC 1990. No obstante, se han diseñado dos factores: uno para el modelo de asignación de zonas urbanas e industriales, que se obtuvo directamente a partir de la distancia euclidiana a dicha categoría; y otro para el modelo de asignación de zonas comerciales, el cual se diseña pensando en no aglutinar las nuevas zonas comerciales en las cercanías de las ya existentes. Para ello se dio la mayor adecuación a los píxeles que están entre 2.000 y 10.000 metros de distancia de las zonas comerciales existentes en 1990, aplicando una función de pertenencia borrosa sigmoideal y simétrica.

*Accesibilidad a carreteras.* Con la finalidad de que las zonas resultantes de la aplicación de estos modelos presenten una buena accesibilidad, así como patrones de crecimiento compactos, se incluye este factor derivado de la distancia a las carreteras principales de la Comunidad de Madrid (menor distancia mayor adecuación).

*Geotecnia.* La asignación de las zonas residenciales, comerciales e industriales se debe hacer evitando que éstas se encuentren en zonas donde exista riesgo de fallas activas, riesgo sísmico o sitios de baja estabilidad geomorfológica. Para el diseño de este factor se aprovechó la información que aportaba el mapa de Geotecnia de la Comunidad de Madrid sobre problemas de compactación, cimentación y fisuración de las rocas, poniendo especial atención en todas aquellas zonas que tuviesen alguno de los siguientes problemas o una combinación de varios de ellos: riesgo de deslizamiento, oquedades subterráneas y nivel freático a escasa profundidad.

Por otro lado, cabe señalar que algunos de los factores clasificados en el criterio ambiental pudieran ser clasificados en este criterio o viceversa, tal es el caso de los factores usos del suelo, protección de suelo de mayor productividad y geotecnia. No obstante, con la finalidad de compensar la distribución de los factores en cada criterio y su influencia en el modelo se optó por clasificar a los factores como se mostró anteriormente.

### C) Factores sociales

*Lejanía a instalaciones no deseables, proximidad a hospitales y universidades.* Con la inclusión del primer factor se intenta minimizar el riesgo o molestias que ocasionan las instalaciones no deseables a la población, es decir este factor tendrá el efecto de alejar a la población de dichas instalaciones. Los otros dos factores se basan en uno de los criterios de sostenibilidad, en particular el acceso de la población a los servicios básicos, minimizando la distancia a centros sanitarios (hospitales) y educativos (Universidades).

*Cuencas visuales.* Un aspecto a tomar en cuenta en la asignación de nuevas urbanizaciones es la calidad visual del paisaje. Para ello, se consideraron como elementos de especial interés a los espacios naturales protegidos, a los humedales y a las zonas de bosque, y se establecieron hasta tres zonas de visibilidad (y de preferencia, por tanto) en función de la distancia a estos elementos: la primera menor a 700 metros (peso = 0,57); una segunda entre 700 y 1.500 metros (peso = 0,29); y la última entre 1.500 y 5.000 metros (peso = 0,14).

Convendría matizar que éste sería un factor de relevancia social, pero no tiene por qué serlo desde el punto de vista ambiental. Por ese motivo, en el grupo de los factores ambientales se ha intentado alejar las nuevas zonas residenciales de los espacios naturales protegidos, compensando así lo deseable desde el punto de vista ambiental y lo deseable desde el punto de vista social.

*Orientación del terreno.* En los procesos de construcción de edificaciones se considera que la orientación Sureste en estas latitudes son las más confortables para ubicar una zona residencial. En este caso, el factor da las mayores adecuaciones a las orientaciones entre 90 y 180 grados, obteniéndose con una función de tipo *sigmoidal* y simétrica.

*Distancia (ponderada) a la población.* Uno de los aspectos considerados en este modelo es la localización de la población, tomando en cuenta dos criterios: alejar a la población más vulnerable de las nuevas zonas industriales y acercar los nuevos establecimientos comerciales a la población con mayor poder adquisitivo. Ante estos dos casos se clasificó a la población vulnerable (población < 16 años y > 64 años) y a la población con mayor poder adquisitivo (población entre 25 y 64 años) (Bosque Sendra *et al.*, 1999 y Gómez Delgado, 2003).

Finalmente, obtenidos todos los factores se llevó a cabo un análisis de correlación para determinar aquellos factores que pudiesen estar midiendo el mismo fenómeno. De los resultados obtenidos de dicho análisis se pudo comprobar que solamente el factor de proximidad a zonas industriales y comerciales mantiene un grado de correlación alto con la distancia a instalaciones no deseables (0,79). No obstante, dichos factores, hasta cierto punto, influyen de manera inversa en los modelos. De cualquier forma y para evitar sobreestimaciones, se le otorgó mayor importancia a un factor y menor a otro. Asimismo, el factor de proximidad a hospitales se correlacionó con el factor de accesibilidad a universidades (0,73), tomándose la decisión de eliminar este último.

### 3.1.2. Ponderación de los factores

Para la ponderación de los factores se persiguió que el modelo cumpliera, en lo medida de lo posible, las condiciones de un modelo de crecimiento urbano óptimo, tratando de manera conjunta el interés que pudieran tener los diferentes grupos implicados en el desarrollo de las actividades urbanas, comerciales e industriales, tales como ambientalistas, empresarios, constructores, sociedad, entes planificadores, entre otros. También se tuvo en cuenta la información derivada de la amplia revisión bibliográfica realizada sobre estos temas y, sobre todo, el consenso de los expertos del proyecto SIMURBAN (compuesto por geógrafos, ingenieros, ambientalistas, etc.).

De este modo para las zonas residenciales y comerciales se ponderó en primer lugar el criterio económico seguido del ambiental y en último el social, mientras que para las zonas industriales se intentó proteger el medio ambiente dando un mayor peso al criterio ambiental, seguido del criterio económico y por último el social.

Asimismo, en la asignación de los pesos de cada factor se consideró de mayor importancia la protección de los usos del suelo, los espacios naturales, la hidrografía, la accesibilidad a zonas urbanas, carreteras y zonas industriales y comerciales, así como la seguridad de los habitantes ante algún riesgo derivado de las industrias o instalaciones no deseables y la accesibilidad a los servicios. Finalmente y siguiendo con el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso final de cada factor, multiplicando el peso otorgado a cada uno de ellos, nivel por nivel ([tabla 4](#)).

### 3.2. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2020, partiendo de los datos reales de 2000 y los datos resultantes del modelo de asignación óptima para el año 2000

Existen dos posibilidades de obtener la asignación óptima para el año 2020 en función de la información disponible hasta el momento. En primer lugar, partiendo de la configuración territorial real existente en el año 2000 y, por otro lado, utilizando como base los resultados del modelo óptimo obtenidos para el año 2000, partiendo de la situación real de 1990 ([Apéndice 1](#)). En este caso se simularán ambas, con la finalidad de poder establecer una comparación entre como se hubiesen desarrollado los patrones de crecimiento urbano deseables para el año 2020, dándole continuidad desde 1990, y qué patrones se pudiesen dar partiendo de la realidad del año 2000.

#### 3.2.1. Factores a incluir en los modelos

Para el primer caso, los factores y su ponderación serán los mismos que se utilizaron en el modelo anterior actualizados al año 2000. En el segundo caso no será posible incluir el factor de distancia ponderada a la población debido a que se utilizarán las zonas residenciales óptimas obtenidas, a las que no es posible asignarles un dato de población conocido. Asimismo, será necesario hacer algunas adaptaciones en factores como accesibilidad a zonas urbanas y usos del suelo, así como actualizar al año 2000 alguno de los factores de accesibilidad.

Con respecto al factor de accesibilidad a los núcleos urbanos, se consideran como zonas urbanas de partida las existentes en 1990, más las zonas óptimas obtenidas en el modelo proyectado para el año 2000. Con esta base se genera el factor de accesibilidad a zonas urbanas igual que en el modelo 1990-2000, ponderando en primer lugar las zonas óptimas y los núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio, y en último término los núcleos pequeños y la gran urbe de la región ([tabla 5](#)).

Por su parte, el factor usos del suelo se generó a partir del CLC 2000, al que se le realizaron dos modificaciones. En primer lugar, a dicho mapa se le asignaron los usos del suelo de 1990 en el lugar donde se dieron las superficies artificiales entre 1990 y 2000, y en segundo lugar se asignaron los usos residenciales, comerciales e industriales óptimos obtenidos en el modelo de 1990 al 2000. Con este mapa se procedió a elaborar el factor de usos del suelo, aplicando la misma metodología que en el modelo 1990-2000.

Por último, como restricciones en ambos modelos se utilizaron el mapa de superficies no urbanizables de protección disponible para el año 2003 de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio, así como las superficies artificiales, hidrografía, humedales y embalses existentes en el año 2000.

Una vez obtenidos los factores para ambos modelos se otorgan los pesos de forma equivalente a los asignados en el modelo 1990-2000 ([tabla 6](#)).

No obstante, y como se comentó anteriormente, en el modelo que usa las zonas urbanas óptimas no se incluirá al factor de distancia ponderada a la población. Para compensar esta exclusión, en el modelo de asignación de zonas comerciales se aumentó el peso del factor de accesibilidad a zonas urbanas y de los usos de suelo, con la finalidad de atraer las zonas comerciales cerca de la población que vive en las zonas urbanas y asignarlas en terrenos de menor valor ambiental y productivo; asimismo se disminuyó el peso del factor de accesibilidad a carreteras debido a que, en ausencia del factor excluido, éste condicionaba la asignación de las zonas comerciales en cualquier margen de una carretera. Por su parte, la exclusión de este factor en el modelo de asignación de zonas industriales propició el aumento de los pesos de los factores de lejanía a instalaciones no deseables y de accesibilidad a hospitales, otorgando así mayor importancia a los factores agrupados en el criterio social.

### 3.2.2. Estimación de la demanda de suelo para el año 2020

Otro aspecto a considerar en el modelo es la demanda de superficie de crecimiento urbano deseable para el año 2020. Para ello, se siguió el trabajo de Aguilera Benavente *et al.* (2009), donde se estima la demanda de suelo necesaria en la Comunidad de Madrid para el año 2020 en un escenario de crecimiento urbano sostenible, escenario que mantiene algunas sinergias con el modelo que estamos planteando en este trabajo; además dicha demanda coincide, en cierta medida, con la demanda manejada por Barredo Cano y Gómez Delgado (2008) en el desarrollo de un escenario de crecimiento urbano compacto para la región de Madrid, en el cual la superficie de suelo requerida para el 2020, según los autores, debe decrecer hasta en un 40% con respecto al periodo 1990-2000.

Cabe señalar que en el trabajo de Aguilera Benavente *et al.* (2009) se genera la demanda

para los usos de suelo residencial y productivo, de tal forma que éste trabaja con los usos comerciales e industriales de forma conjunta. Esto en principio resulta un inconveniente a la hora de asignar la superficie requerida para el uso comercial e industrial en nuestro modelo. Sin embargo, los datos aportados por la Dirección General de Urbanismo y Estrategia Territorial de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio, muestran que en el año 2004 los usos industriales y de servicios y equipamientos tienen prácticamente la misma superficie (<http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/anuario/ianuconsc1.htm>). Ante esto, decidimos hacer una distribución en partes iguales de la demanda del suelo productivo entre las zonas comerciales e industriales. Así, la demanda de suelo residencial fue de 17.618 ha, de superficies comerciales 5.418 ha y de suelo industrial 5.418 ha.

#### **4. Resultados del modelo de asignación óptima para el año 2000. Análisis comparativo con el crecimiento real experimentado entre el período de 1990 a 2000**

Diseñados los factores y definidos sus pesos se obtuvieron, aplicando la sumatoria lineal ponderada, los mapas de aptitud para cada uso del suelo modelado. Posteriormente, y a partir de éstos, se generaron los mapas con parcelas de adecuación media, con un tamaño mínimo de parcela de 50 ha para los tres usos a modelar y un tamaño máximo de 250 y 500 ha para las zonas comerciales e industriales y las zonas residenciales, respectivamente. Para determinar este último aspecto se consideró el tamaño medio de las parcelas de crecimiento real registrado entre 1990 y 2000.

Por último, se llevó a cabo una asignación multiobjetivo, en la cual se requiere definir las metas de superficie para cada uso del suelo. Para ello una vez más la referencia fue el crecimiento real experimentado entre 1990 y 2000. El aumento de las zonas urbanas en este período fue de 17.948,3 Ha, mientras que las zonas comerciales e industriales aumentaron en 7.874,5 hectáreas en conjunto. Como en el CLC de 1990 estas últimas categorías están clasificadas en una sola, por lo que para asignar las metas de superficies se repartió a la mitad el total de dicho crecimiento (Comercial = 3.937,25 e Industrial = 3.937,25).

Finalmente, se obtuvo el mapa de asignación óptimo al año 2000 para las categorías residencial, comercial e industrial. En la [figura 4](#) y [figura 5](#) se presenta una comparación entre el modelo de asignación óptimo para el año 2000 y el crecimiento real, partiendo de la situación real en 1990. De este modo, se puede observar que los resultados arrojados por el modelo ([figura 4](#)) en una primera instancia nos dejan ver patrones de crecimiento más compactos que los ocurridos en la realidad durante el mismo período, el cual presenta una configuración mucho más dispersa en el territorio, cerca de los núcleos con menos de 10.000 habitantes y fundamentalmente en detrimento de los bosques y pastizales naturales ([figura 5](#)). Así, se puede observar como en el modelo de crecimiento urbano óptimo los factores uso del suelo y protección de los suelos más desarrollados ayudó a discriminar las zonas con mayor productividad ganadera, en este caso la sierra de Madrid, y al mismo tiempo proteger, hasta cierto punto, las zonas con alta productividad agrícola (tal es el caso del sureste de Madrid). Por otra parte, las nuevas zonas residenciales son localizadas próximas a los núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio (entre 10.000 y 100.000 habitantes) y no de forma agregada a la ciudad de Madrid y a pequeñas localidades, atendiendo a las directivas propuestas en la Estrategia Territorial Europea.

Por su parte, la distribución espacial de los usos de suelo se obtuvo intentado maximizar la adecuación de las parcelas y conservando un tamaño razonable, entre 50 y 500 ha. En este sentido, la adecuación media de las parcelas en el modelo óptimo es mayor que la adecuación media del crecimiento real ocurrido entre 1990 y 2000 ([tabla 7](#)). Hay que señalar que no se alcanzó la máxima adecuación (255) en los mapas de aptitud, obteniéndose una adecuación máxima de 204 para las zonas residenciales, 200 para comerciales y 194 para industriales.

En general se observa que la asignación de dichas zonas se sitúa, principalmente, en el entorno de la N-I (municipio de Alcobendas y San Sebastián); sobre la N-II en municipios del corredor del Henares; en la N-III en los municipios de Arganda del Rey y Morata de Tajuña; sobre la N-IV, N-401 y N-V entorno a municipios como Getafe, Pinto, Valdemoro, Ciempozuelos, Leganés, etc. En la N-VI el crecimiento se produce de manera particular entorno a las carreteras de circunvalación madrileñas, como la M-30, M-40 y M-50 ([figura 4](#)).

Por su parte, la asignación de las zonas comerciales se distribuye en diferentes sitios de la Comunidad, ya que su ubicación se proyectó para que se localizaran a distancias considerables entre ellas, con la intención de maximizar el área de captación de usuarios potenciales. Para esto, el factor de accesibilidad a zonas comerciales y el factor de proximidad a los núcleos urbanos ponderados en función del poder adquisitivo de la población fueron de gran importancia.

En cuanto a la asignación de las zonas industriales se observa que, en general, éstas se localizaron lejos de la población. Aquí el factor de distancia ponderada a la población más vulnerable (niños y adultos mayores), el factor de protección a los usos y tipos de suelo, la accesibilidad a carreteras, zonas residenciales jugaron un papel importante en su ubicación.

Por otro lado, es posible hacer un análisis del impacto que tiene los resultados del modelo óptimo sobre los usos del suelo del año 2000, y compararlo con el impacto real experimentado para ese mismo año. Si prestamos atención a la [tabla 8](#) podemos observar que las tres categorías asignadas en el modelo consumen mayoritariamente 6 tipos de usos del suelo.

En primer lugar, dicha asignación se dio sobre tierras de labor en secano (53,6%), vegetación esclerófila (11,9%), pastizales naturales (6,6%) y matorral boscoso (5,3%). Asimismo, un 6,2 y un 7,4 % coinciden sobre zonas residenciales y zonas comerciales e industriales, respectivamente. Sin embargo, los cambios reales experimentados impactaron en muchos más usos del suelo, ocasionando una fragmentación del paisaje y un crecimiento disperso sobre todo el territorio madrileño. De hecho, el crecimiento real se abasteció, principalmente, de tierras de labor en secano (42%) y pastizales naturales (24,6%), seguido muy de lejos por las zonas en construcción (7,8%), vegetación esclerófila (5%) y matorral boscoso de transición (2,9%), y el resto queda distribuido en alrededor de 20 categorías de uso del suelo localizadas sobre todo el territorio de la Comunidad (Plata Rocha y otros, 2009). Por lo tanto, se observa que el ajuste del crecimiento urbano real y el óptimo es mínimo, no superando el 13%.

En resumen, se puede confirmar que el diseño de los factores utilizados aporta un cierto grado de sostenibilidad al modelo de ocupación del territorio. Si bien la superficie proyectada en el modelo se podría considerar excesiva, ya que se utilizó el crecimiento real de la categoría

residencial, comercial e industrial en el periodo de 1990 al 2000, nos pareció indispensable para poder hacer una comparación entre el crecimiento real y la asignación óptima.

También en el modelo se observan patrones compactos en los usos del suelo, ampliamente recomendados en los trabajos sobre modelos territoriales y urbanos sostenibles. Este resultado no es fortuito sino resultado de la implementación de la técnica de parcelación por intervalos propuesta por Franco Maass y Bosque Sendra (1997) y automatizada por Rodríguez Álvarez *et al.* (2009) como una herramienta de asignación óptima de usos del suelo.

## 5. Resultados de la simulación de desarrollo urbano "óptimo" para el año 2020

En primer lugar hay que recordar que los resultados obtenidos de todos estos modelos se apoyan en factores enmarcados dentro de un modelo de crecimiento urbano deseable. Sin embargo, y para que la simulación tuviese un sustento en cuanto a políticas de planificación urbana, se incluyó como restricción las superficies no urbanizables de protección del año 2003. De este modo se obtuvieron dos modelos de crecimiento urbano óptimo para el año 2020, donde la asignación se hace maximizando la capacidad de acogida del territorio para recibir zonas residenciales, comerciales e industriales, y además en lugares designados para ello en cada uno de los Planes Generales de Ordenación Urbana de la región.

Un análisis espacial preliminar de los resultados nos indica que los dos modelos de asignación de crecimiento urbano para el año 2020 presentan una compacidad en las nuevas manchas artificiales, característica que, en principio, otorga cierta sostenibilidad al modelo de desarrollo urbano. No obstante, y como era de prever, existen en dichos modelos algunas diferencias en la distribución espacial de los usos del suelo. La primera diferencia visual que se observa corresponde al núcleo urbano de Madrid, donde, el modelo que considera el crecimiento urbano real en el 2000 ([figura 6](#)), presenta una estructura urbana más densa, sobrepasando la ronda de circunvalación M-40 y en dirección de los diferentes corredores que forman las carreteras nacionales, ocasionado principalmente por el crecimiento ocurrido en el periodo de 1990 y 2000.

También se puede observar que en la parte sureste de la Comunidad el modelo desarrollado a partir de los datos "óptimos" del año 2000 ([figura 7](#)) presenta un menor crecimiento urbano tanto al norte como al sur de la N-III, lo cual hace que el patrón sea menos disperso que en el modelo representado en la [figura 6](#).

En particular, el modelo desarrollado a partir de las zonas urbanas óptimas para el año 2000 ([figura 7](#)), presenta un crecimiento de las zonas urbanas en municipios del noroeste de la Comunidad (sobre la N-VI), tales como: Galapagar, Collado de Villaba, Collado Mediano y El Escorial; en municipios del Corredor del Henares (N-II) y en municipios de suroeste, como Móstoles, Parla o Pinto.

El modelo desarrollado a partir del crecimiento real registrado en el año 2000 ([figura 6](#)) presenta mayor crecimiento de las zonas urbanas, principalmente en los municipios del Corredor del Henares, así como en algunos municipios de suroeste como Brunete, Móstoles, Arroyomolinos, Parla, Getafe, etc.

Resumiendo, podemos decir que en ambos modelos las nuevas áreas residenciales son asignadas en las cercanías de los núcleos urbanos de tamaño intermedio (evitando así tanto la ineficacia de la dispersión como la excesiva concentración), cercanos a las carreteras (maximizando su accesibilidad) y en general en usos de suelo de baja productividad (evitando el consumo de suelo de alto valor productivo). Del mismo modo, las zonas comerciales resultan distribuidas en lugares cercanos a las nuevas zonas urbanas y a distancias considerables entre ellas. Por su parte, las nuevas zonas industriales están localizadas en lugares próximos a carreteras y en zonas con menor densidad de población.

Otro aspecto a considerar en el análisis de los modelos de asignación es el consumo de los usos del suelo. En este sentido, se pudo apreciar que los modelos se nutren principalmente de usos de suelo que presentan un menor valor productivo, como son las tierras de labor en secano y la vegetación arbustiva. No obstante, un porcentaje de éstos también prolifera sobre pastizales naturales, localizados, principalmente, en el centro y sureste de la Comunidad ([figura 8](#)). De este análisis se observó que las diferencias en cuanto al consumo de usos del suelo entre ambos modelos no son muy significativas, ya que ambos consumen prácticamente los mismos tipos de uso del suelo. Sin embargo, las diferencias en cuanto a la posición espacial de dicho consumo sí que pueden ser un tanto más significativas ([figura 6](#) y [figura 7](#)), debido a que en un modelo se parte de la situación real del año 2000 y en el otro de lo óptimo para ese mismo año.

## 6. Conclusiones

Podemos decir que en el presente estudio se ha desarrollado y aplicado con éxito un modelo de asignación óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid para diferentes periodos, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos. Aún cuando las técnicas de evaluación multicriterio han sido ampliamente aplicadas en la asignación de nuevos usos del suelo, cabe destacar el hecho de que en el procesamiento de algunos factores se aplicaron procesos innovadores en el desarrollo de modelos normativos. Al respecto, se puede mencionar la modelización de los factores: usos del suelo, accesibilidad a zonas urbanas y la distancia ponderada a la población; así como la utilización de estos modelos normativos para elaborar escenarios de futuro.

Dichos modelos han sido implementados contando con una cantidad considerable de factores (obtenidos de una recopilación de variables espaciales tratadas en un SIG), que nos han permitido incluir ciertos criterios de sostenibilidad. Así, la inclusión de la zonificación de la variable usos de suelo y el factor de accesibilidad a los núcleos urbanos, fue determinante en la asignación de los nuevos usos residenciales, comerciales e industriales, permitiendo proteger espacios de productividad agraria en la sierra de Madrid y zonas de importancia agrícola en la parte sur de la Comunidad, así como dar prioridad de desarrollo a los municipios de tamaño medio e intermedio. Del mismo modo, los factores de accesibilidad a zonas comerciales y la distancia ponderada a la población con poder adquisitivo hace que las nuevas zonas comerciales se ubiquen a distancias considerables entre ellas y cerca de las nuevas zonas urbanas, mientras que el factor de distancia ponderada a la población más vulnerable, hace que las zonas industriales se localicen en lugares con menor densidad de población.



También se observó que el uso del mapa de zonas no urbanizables de protección como restricción condiciona la asignación óptima de las nuevas zonas urbanas y esto quizá no garantice que los nuevos usos se asignen en los sitios de mayor adecuación, no obstante da un sustento realista y objetivo a la simulación de los modelos de crecimiento urbano deseables.

Se puede concluir que los dos escenarios planteados a partir del año 2000 presentan cierta compatibilidad en la distribución de los nuevos usos del suelo, lo cual da un carácter sostenible al territorio madrileño en el futuro. Pero además, se está garantizando que estos usos se asignen, según los factores planteados, en las mejores condiciones ambientales, económicas y sociales y dentro de un marco legal establecido por los entes planificadores del territorio.

Por último, señalar que la herramienta *BuildScenary* fue de gran utilidad al momento de llevar a cabo la asignación de los usos de suelo, permitiendo optimizar recursos informáticos y tiempo de desarrollo de los modelos.

### Agradecimientos

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad", financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (referencia SEJ2007-66608-C04- 00/ GEOG).

### Referencias bibliográficas

- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., y Gómez Delgado, M. (2009): "Hacia la simulación de escenarios futuros de demanda de ocupación de suelo en ámbitos metropolitanos", *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.
- Aldana, A.T. (2005): "Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España", *Revista forestal latinoamericana*, 35, pp. 59-86.
- Al-Shalabi, M. A., Mansor, S. B., Ahmed, N. B. y Shiriff, R. (2006): "GIS based multicriterio approaches to housing site suitability assessment", *XXIII International FIG Congress, Munich, Germany*. [Consulta: 10-10-2009]. Disponible en: [http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts72/ts72\\_05\\_alshalabi\\_etal%20\\_0702.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts72/ts72_05_alshalabi_etal%20_0702.pdf)
- Baja, S., Chapman, D. M. y Dragovich, D. (2007): "Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning", *Environment Model Assess*, 12, pp. 171-184.
- Barredo Cano, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ed. RA-MA.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

---

- Barredo Cano, J. I. y Bosque Sendra, J. (1999): "Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment", *Geographical Systems*, 5, pp. 313-327.
- 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 región", en Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M. T. (Ed.): *Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic solutions*. Springer, pp. 363- 385.
- Borouhaki, S. y Malczewski, J. (2008): "Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS", *Computers and Geosciences*, 32, pp. 399-401.
- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Rodríguez Espinosa, V. R., Díaz Muñoz, M. A., Rodríguez Duran, A. E. y Vela Gayo, A. (1999): "Localización de centros de tratamientos de residuos: una propuesta metodológica basada en SIG", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, pp. 295-323.
- Chang, N. B., Parvathinathan, G. y Breeden, J. B. (2008): "Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region", *Journal of Environmental Management*, 87, 139-153.
- Comisión Europea (1999): *Estrategia Territorial Europea. Hacia un desarrollo equilibrado y sostenible de la UE*. [Consulta: 10-10-2009]. Disponible en:  
[http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_es.pdf)
- Diamantini, C. y Zanon, B. (2000): "Planning the urban sustainable development. The case of the plan for the province of Trento, Italy", *Environmental Impact Assessment Review*, 20, pp. 299-310.
- Eastman, J. R. (2006): "The IDRISI Andes Tutorial", *IDRISI Production*, 1987-2006, Clark University.
- Eastman, J. R., Jin, W., K. Kyem, P. A. y Toledano, J. (1995): "Raster procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions", *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 61, (5), pp. 539/547.
- Encinas Escribano, A., Winder, N., Hernández Jiménez, V., Martínez Alonso, L., Hernández Medina, C. y Garrido Valero, M. S. (2005): "Hacia una planificación territorial sostenible en la Comunidad de Madrid: Directrices y Recomendaciones". Universidad Europea de Madrid and University of Newcastle, Madrid.
- EEA (European Environment Agency) (2006): *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. EEA Report, 10/2006.
- Franco Maass y Bosque Sendra (1997): "Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster", *I Reunión de usuarios españoles de Idrisi*, Alcalá de Henares, España. [Consulta: 05-10-2009]. Disponible en:  
<http://www.sigte.udg.es/idrisi/recursos/secundari/reunion1/inidice.htm>.
- García Palomares, J.C. y Gutiérrez Puebla, J. (2007): "La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid" *Anales de Geografía*, 27, 1, pp. 45-67.
- Geneletti, D. y van Duren, I. (2008): "Protected area zoning for conservation land use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation" *Landscape and Urban Planning*, 85, pp. 97-110.
- Giordano, L. C. y Riedel, P. S. (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, pp. 301-311.

Gómez Delgado, M. (2003): *Sistemas de información geográfica y toma de decisiones: control del riesgo a partir del Análisis de Sensibilidad y Análisis de Incertidumbre*. Tesis doctoral del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá.

Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio aplicados al ordenamiento del territorio*. Madrid, Ed. Ra-Ma.

Hill, M. J., Braaten, R., Veitch, S. M., Lees, B. G. y Sharma, S. (2005): "Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis", *Environmental Modelling and Software*, 20, pp. 955-976.

Informe Brundtland (1987): *Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo. Informe Brundtland: Nuestro futuro común*. Madrid, Ed. Alianza.

Jiang, H. y Eastman, J. R. (2000): "Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS", *International Journal of Geographical Information Science*, 14, 2, pp. 173-184.

Leboreiro, A. (1999): "De la teoría a la práctica en la planificación territorial", *Urban*, 3, pp. 68-79.

Ligmann-Zielinska, Arika, Church, Richard L. y Jankowski, Piotr (2008): "Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation", *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (6), pp. 601 - 622.

Liu, Y., Lv, X., Qin, X., Guo, H., Yu, Y., Wang, J. Y Mao, G. (2007): "An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe", *Landscape and Urban Planning*, 82, pp. 233-246.

López de Lucio, R (2003): "Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid", *Urban*, 8, 124-161.

López de Lucio, R. (2004): "Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid", *Urban*, 9, pp. 56-80.

López Vázquez, V. H., Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2008): "Flexibilidad de los SIG para asistir a la toma de decisiones espaciales", *XI Coloquio Ibérico de Geografía*, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, España.

MacDonald, M. L. y Faber, B. (1999): "Exploring the potential of Multi-Criteria Spatial Decision Support Systems: A system for sustainable land-use planning and design", in *Spatial Multicriteria decision making and analysis: A geographic information sciences approach*. Ed. Thill, J. C. Sydney, Ashgate, pp. 253-377.

Malczewski, J. (2002): "Fuzzy screening for land suitability analysis", *Geographical & Environmental Modelling*, 6, 1, pp. 27-39.

Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D. y Healy, M.A., (2003): "GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): case study of developing watershed management strategies", *Environment and Planning A*, 35, pp. 1769-1784.

Malczewski, J. (2004): "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview", *Progress in Planning*, 62, pp. 3-65.

Malczewski, J. (2006a): "Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, pp. 270-277.

Malczewski, J. (2006b): "GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature", *International Journal of Geographical Information Science*, 20, (7), 703-726.

Marinoni, O. (2004): "Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS", *Computers & Geosciences*, 30, pp. 637-646.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): “Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

---

Martínez Falero, J. E. (2002): “La agricultura y la ganadería de Madrid frente a los nuevos retos: Medio ambiente, tecnología y economía”, *Libro Blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural*, Jornada Autonómica de la Comunidad de Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-10-2009]. Disponible en:  
[http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/madrid/ponencias/pdf/je\\_martinez.pdf](http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/madrid/ponencias/pdf/je_martinez.pdf)

MAYPA (2004): *Libro blanco en Agricultura y Desarrollo Rural*. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-09-2009]. Disponible en  
<http://www.libroblancoagricultura.com/>

Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L. y Asensio Rodríguez, J. J. (2007): “Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio”, *GeoFocus*, 7, pp. 120 - 147.

Oñate Cid, J. M. (2002): “Agricultura en Madrid”, *Libro blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural*, Jornada Autonómica de la Comunidad de Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-10-2009]. Disponible en:  
<http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/madrid/comunicaciones/onate.pdf>

OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006): *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, OSE.

Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003): “Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje”, *GeoFocus*, 3, pp. 22-44.

Pettit, C. J. (2002): *Land use planning scenarios for urban growth: a case study approach*. Ph. D. Thesis. University of Queensland.

Phua, M. H. y Minowa, M. (2005): “A GIS-based multi-criteria 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, pp. 207-222.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): “Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000)”, *Scripta-Nova*, volumen XIII, 293. [Consulta: 20-09-2009]. Disponible en <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>

Rodríguez Álvarez, Y., Plata Rocha, W., Salado García, M. J., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): “Herramienta para la asignación óptima de usos del suelo”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.

Rueda, S. (2002): *Barcelona, ciudad mediterránea, compacta y compleja: una visión de futuro más sostenible*. [Consulta: 28-10-2006]. Disponible en:  
[http://www.bcnecologia.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=108&Itemid=76&lang=SP](http://www.bcnecologia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=108&Itemid=76&lang=SP).

Salado García, M. J., Rojas Quezada, C. y de Carvalho Cantergiani, C. (2008): “Modelos territoriales y sistemas de indicadores de sostenibilidad. Valoración crítica de algunas experiencias concretas”, *Serie Geográfica*, 14, pp. 131-145.

Santiago Rodríguez, E. de (2007): “Madrid, ‘ciudad única’. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña”, *Urban*, 12, pp. 8-33.

Svoray, T., Bar, P. y Bannet, T. (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, pp. 337-351.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

Wu, F. y Webster, C. J. (1998): "Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, pp. 103-126.

Yager, R. R. y Kelman, A. (1999): "An extension of the analytical hierarchy process using OWA operators", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 7 (4), pp. 401 - 417.

Yeh, A. G. O. y Li, X. (2001): "A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, pp. 733-753.

## TABLAS

**Tabla 1. Zonas obtenidas a partir de la NUTS**

Zona	NUTs	Agricultura	Pastizales
		Productivo	
1	Sierra Sur	Si	Si
2	Sudeste Comunidad	Si	No
	Sudoeste Comunidad	Si	No
	Sur Metropolitano	Si	No
	Este Metropolitano	Si	No
3	Sierra Norte	No	Si
	Norte Metropolitano	No	Si
	Sierra Central	No	Si
4	Oeste Metropolitano	No	No
	Municipio de Madrid	No	No
	Nordeste Comunidad	No	No

**Tabla 2. Valores de aptitud asignados a los usos del suelo (mínimo=0 y máximo=1)**

Tipos	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
1. Cultivos permanentes	0.18	0.25	0.13	0.20
2. Terrenos regados permanentemente	0.18	0.25	0.13	0.20
3. Zonas Agrícolas Heterogéneas	0.14	0.20	0.19	0.18
4. Bosques	0.14	0.15	0.14	0.20
5. Pastizales naturales	0.18	0.05	0.23	0.12
6. Tierras de labor en secano	0.04	0.04	0.04	0.04
7. Praderas	0.03	0.03	0.03	0.03
8. Espacios de vegetación arbustiva y herbácea	0.11	0.03	0.11	0.03

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

**Tabla 3. Ponderación de los núcleos urbanos en función de su población**

Mapa	Núcleos urbanos	Población 1991	Pesos
1	Pozuelo de Alarcón, Aranjuez, Las Rozas de Madrid, Majadahonda, Arganda del Rey, San Fernando de Henares, Valdemoro, Pinto, Mejorada del Campo, Ciempozuelos.	10.000 – 50.000	0.48
2	Torrejón de Ardoz, Alcobendas, Coslada, Parla, San Sebastián de los Reyes.	50.000 – 100.000	0.30
3	Móstoles, Leganés, Alcalá de Henares, Fuenlabrada, Alcorcón, Getafe.	100.000 – 200.000	0.13
4	Resto de los núcleos urbanos	< 10.000	0.06
5	Madrid	> 200.000	0.03

**Tabla 4. Jerarquía final para el análisis de asignación óptima de zonas urbanas en la Comunidad de Madrid**

Factores	Subfactores	Peso	Peso	Peso	Peso Final	Peso Final	Peso Final
		Residencial	Comercial	Industrial	Residencial	Comercial	Industrial
Ambiental U = 0.34 C = 0.31 I = 0.54	1. Usos del suelo (CLC1990)	0.40	0.40	0.40	0.14	0.12	0.21
	2. Lejanía a hidrografía	0.19	0.19	0.19	0.07	0.06	0.10
	3. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos	0.08	0.08	0.08	0.03	0.02	0.04
	4. Lejanía a espacios naturales	0.14	0.14	0.14	0.05	0.04	0.08
	5. Protección de suelos de mayor productividad	0.19	0.19	0.19	0.07	0.06	0.10
<b>Suma=1</b>	<b>Suma =</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>			
Económico U = 0.46 C = 0.49 I = 0.30	1. Pendiente	0.05	0.05	0.08	0.02	0.02	0.02
	2. Accesibilidad a carreteras	0.26	0.35	0.36	0.12	0.17	0.11
	3. Accesibilidad a zonas urbana	0.36	0.29	0.26	0.16	0.14	0.08
	4. Access. a industrias y comercios	0.19	0.22	0.15	0.09	0.11	0.05
	5. Geotecnia	0.14	0.10	0.15	0.06	0.05	0.05
<b>Suma=1</b>	<b>Suma =</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>			
Social U = 0.20 C = 0.20 I = 0.16	1. Lejanía a instalaciones no deseables	0.11	0.28	0.31	0.02	0.06	0.05
	2. Accesibilidad a hospitales	0.52	0.25	0.20	0.10	0.05	0.03
	3. Distancia (ponderada) población		0.33	0.49		0.07	0.08
	4. Cuencas Visuales	0.07	0.08		0.02	0.02	
	5. Orientación del terreno	0.29	0.06		0.05	0.01	
<b>Suma=1</b>	<b>Suma =</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

**Tabla 5. Ponderación de los núcleos urbanos en función de su población**

Mapa	Núcleos urbanos	Población 1991	Pesos
0	Zonas óptimas obtenidas para el año 2000		0.30
1	Pozuelo de Alarcón, Aranjuez, Las Rozas de Madrid, <b>Majadahonda, Arganda del Rey, San Fernando de Henares, Valdemoro</b> , Mejorada del Campo, Ciempozuelos, Pinto.	10.000 – 50.000	0.30
2	<b>Torrejón de Ardoz, Alcobendas, Coslada, Parla, San Sebastián de los Reyes.</b>	50.000 – 100.000	0.20
3	Móstoles, Leganés, Alcalá de Henares, Fuenlabrada, Alcorcón, Getafe.	100.000 – 200.000	0.12
4	Resto de los núcleos urbanos	< 10.000	0.05
5	Madrid	> 200.000	0.03

**Tabla 6. Pesos asignados a los modelos: 1) el que utiliza a los usos urbanos óptimos del 2000, y 2) el que parte de los usos urbanos reales del año 2000**

Factores	1). Pesos modelo óptimo usos urbanos óptimos del año 2000			2). Pesos modelo óptimo usos urbanos reales del año 2000		
	Residencial	Comercial	Industrial	Residencial	Comercial	Industrial
1. Usos del suelo (CLC1990)	0.14	0.15	0.21	0.14	0.12	0.21
2. Lejanía a hidrografía	0.07	0.06	0.10	0.07	0.06	0.10
3. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos	0.03	0.02	0.04	0.03	0.02	0.04
4. Lejanía a espacios naturales	0.05	0.04	0.08	0.05	0.04	0.08
5. Protección de suelos de mayor productividad	0.07	0.06	0.10	0.07	0.06	0.10
1. Pendiente	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
2. Accesibilidad a carreteras	0.12	0.10	0.11	0.12	0.17	0.11
3. Accesibilidad a zonas urbana	0.16	0.25	0.08	0.16	0.14	0.08
4. Accesibilidad a comercios	0.09	0.11	---	0.09	0.11	---
5. Accesibilidad a industrias	---	---	0.05	---	---	0.05
6. Geotecnia	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
1. Lejanía a instalaciones no deseables	0.02	0.06	0.10	0.02	0.06	0.05
2. Accesibilidad a hospitales	0.10	0.05	0.06	0.10	0.05	0.03
3. Distancia (ponderada) población	---	---	---	---	0.07	0.08
4. Cuencas Visuales	0.02	0.02	---	0.02	0.02	---
5. Orientación del terreno	0.05	0.01	---	0.05	0.01	---
<b>Suma</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, n° 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

**Tabla 7. Adecuación media de las parcelas en el modelo de crecimiento óptimo y en el crecimiento real**

Categoría	Óptima	Real
Residencial	176.2	100.8
Comercial	181.1	108.6
Industrial	174.4	106.3

**Tabla 8. Usos del suelo sustituidos por el residencial, comercial e industrial en el escenario de asignación "óptima" para el año 2000 (en ha)**

Categorías del CLC2000 Nivel 3	Residencial	Comercial	Industrial	Total	%
Tejido Urbano Discontinuo	1.022,25	532,75	42,50	1.597,50	<b>6.2</b>
Zonas Industriales y comerciales	1.501,00	315,50	105,25	1.921,75	<b>7.4</b>
Zonas de extracción minera	229,00			229,00	0.9
Zonas en construcción	958,75	286,25		1.245,00	4.8
Tierras de labor en seco	10.197,25	1.334,00	2.312,75	13.844,00	<b>53.6</b>
Praderas		88,25		88,25	0.3
Terrenos principalmente agrícolas	121,75			121,75	0.5
Sistemas Agroforestales	112,50			112,50	0.4
Bosque de frondosas	151,25	75,00		226,25	0.9
Pastizales naturales	1.307,50	279,50	108,25	1.695,25	<b>6.6</b>
Vegetación esclerófila	1.640,75	202,25	1.218,75	3.061,75	<b>11.9</b>
Matorral boscoso	482,00	773,25	101,25	1.356,50	<b>5.3</b>
Otros	224,30	50,50	48,50	323,30	1.3
<b>Total</b>	<b>17.948,30</b>	<b>3.886,75</b>	<b>3.888,75</b>	<b>25.499,50</b>	<b>100,00</b>



Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, n° 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

### FIGURAS

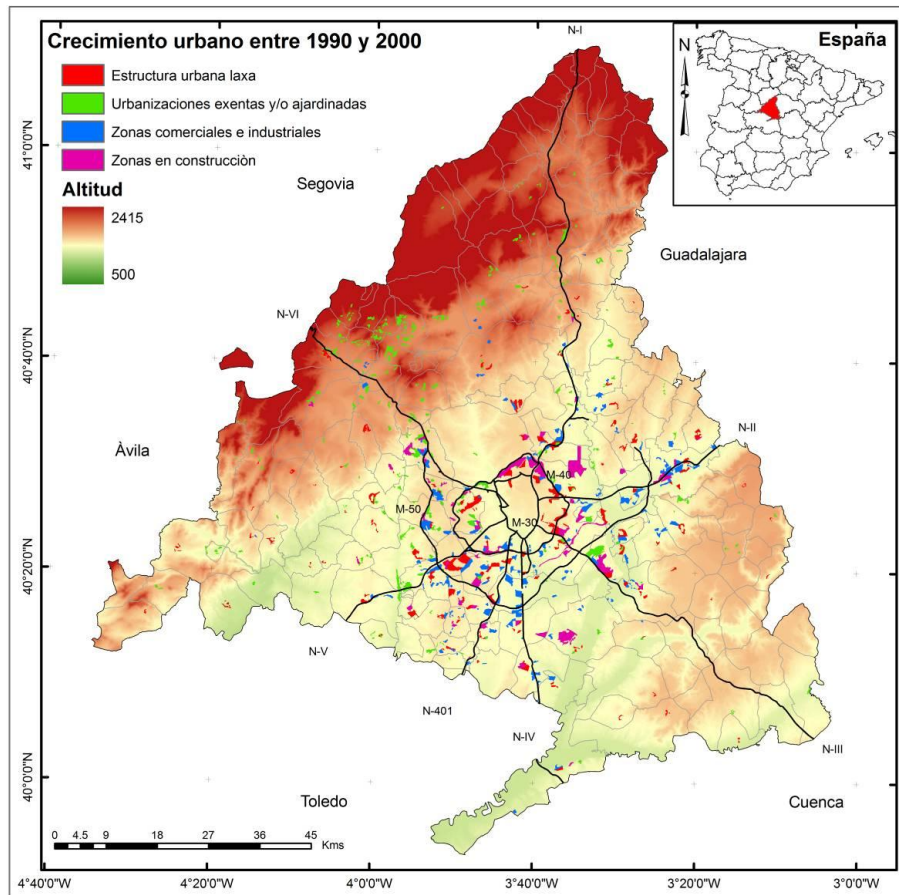
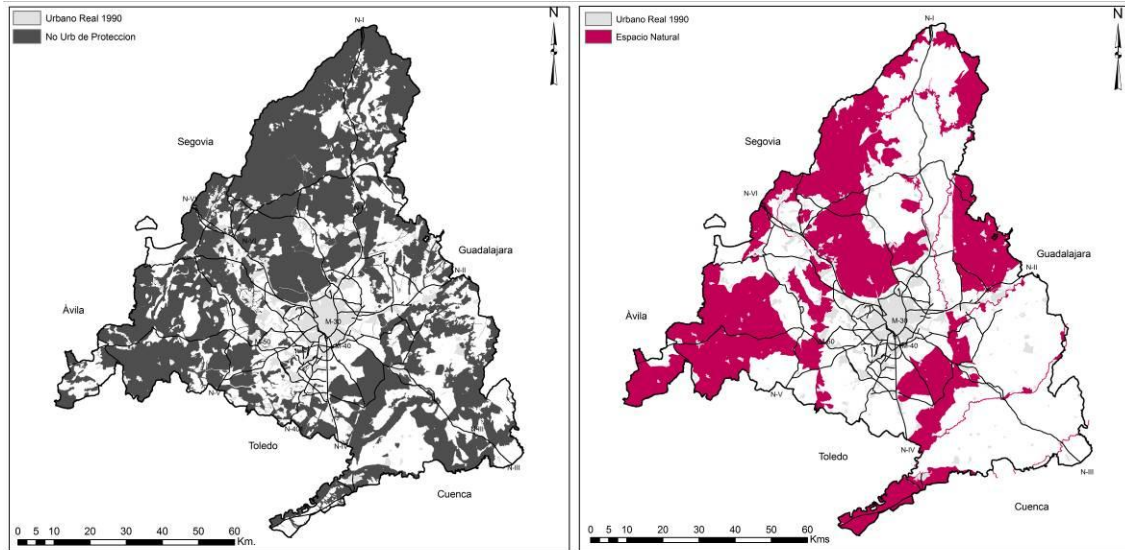
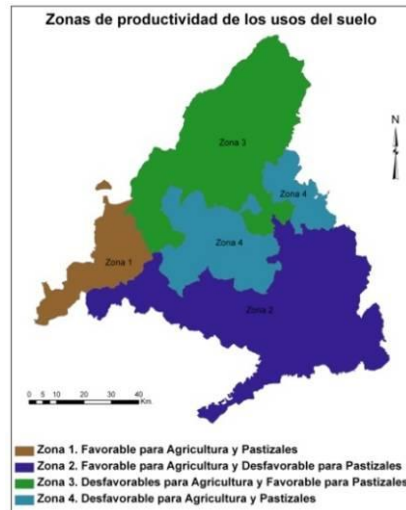


Figura 1. Área de estudio. Comunidad Autónoma de Madrid, España.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157



**Figura 2. Restricciones utilizadas en el modelo (a la izquierda mapa de superficies no urbanizables de protección y a la derecha mapa de espacios naturales protegidos).**



**Figura 3. Zonas obtenidas a partir de la NUTS.**

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

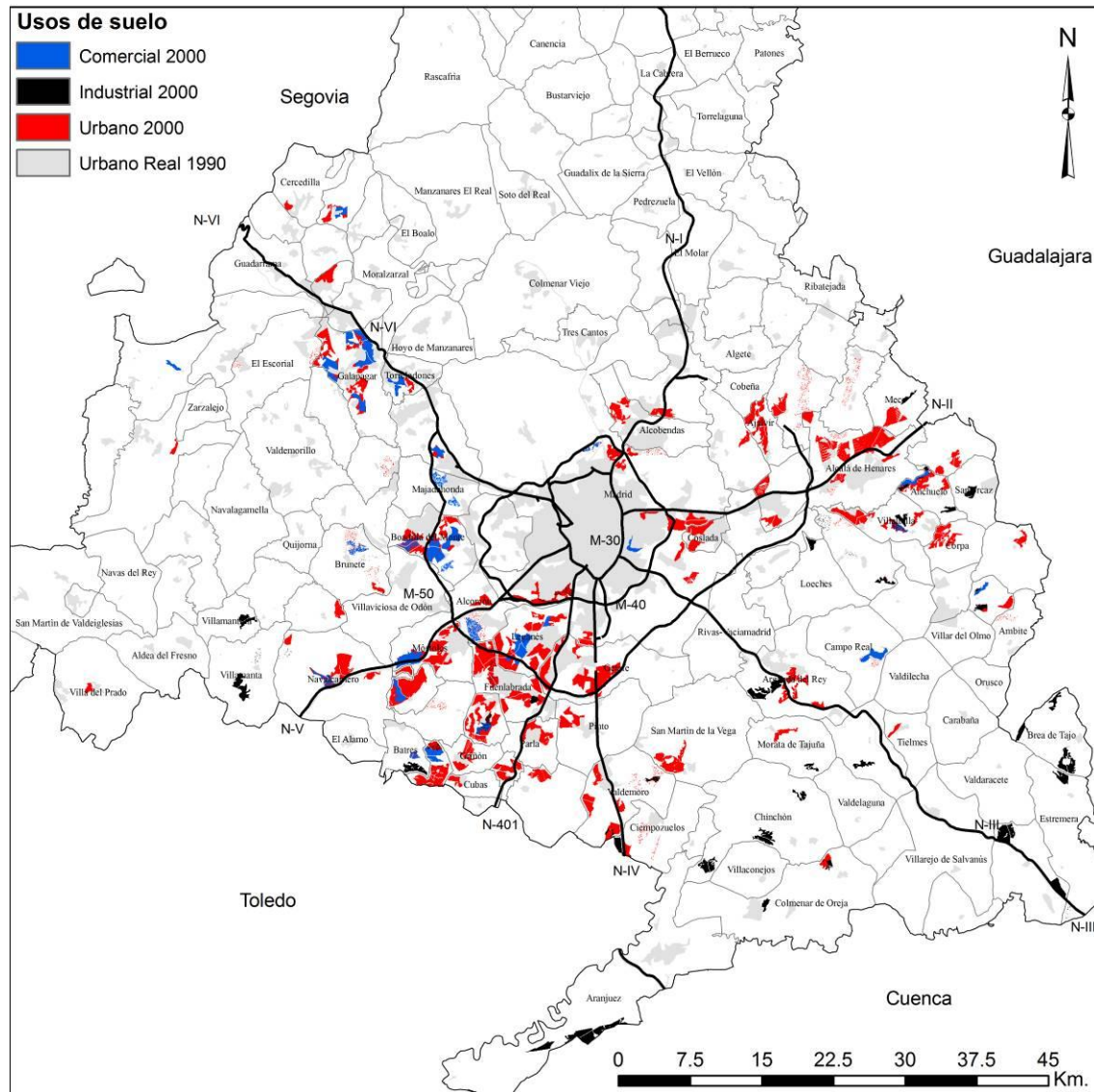
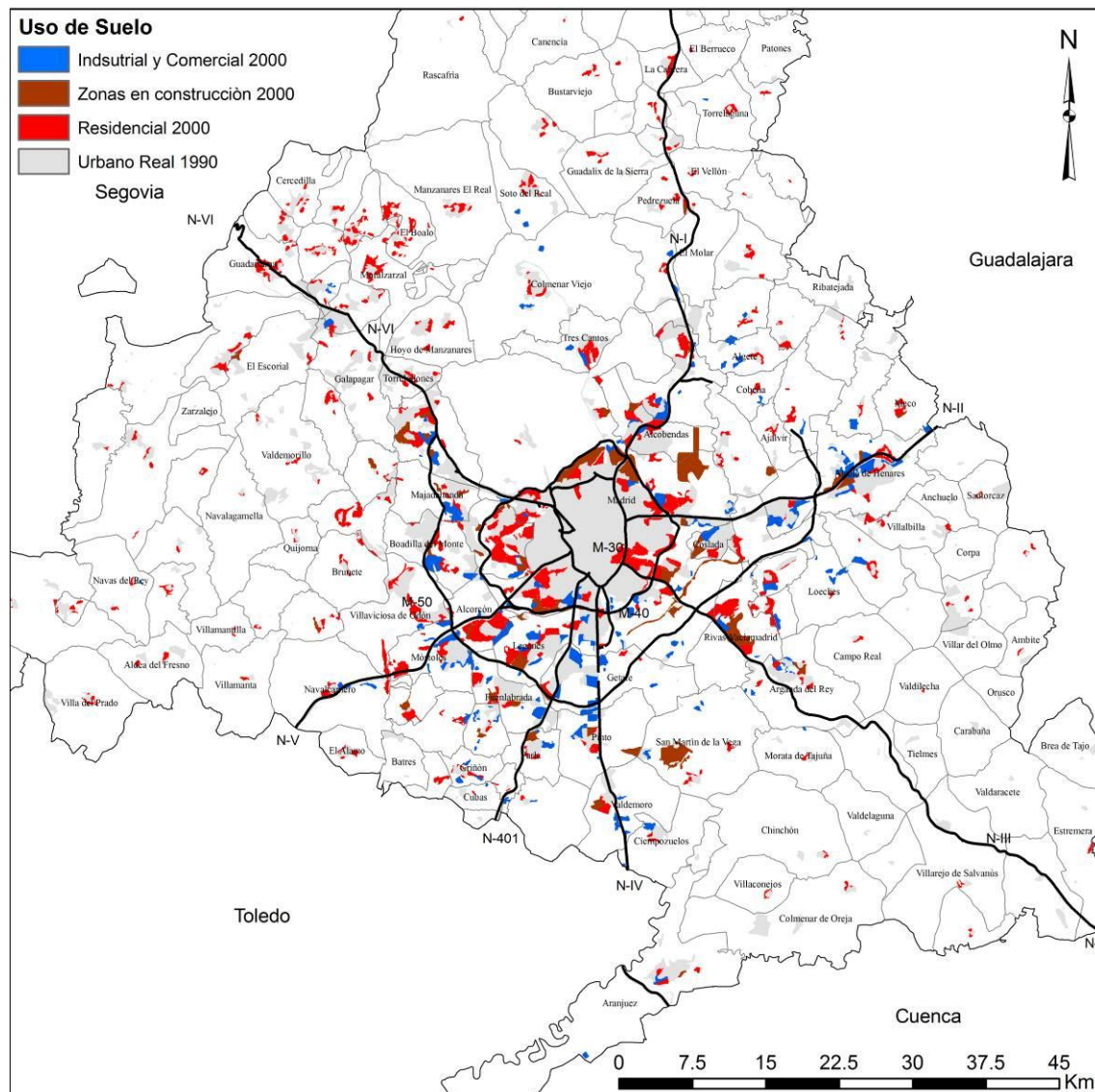


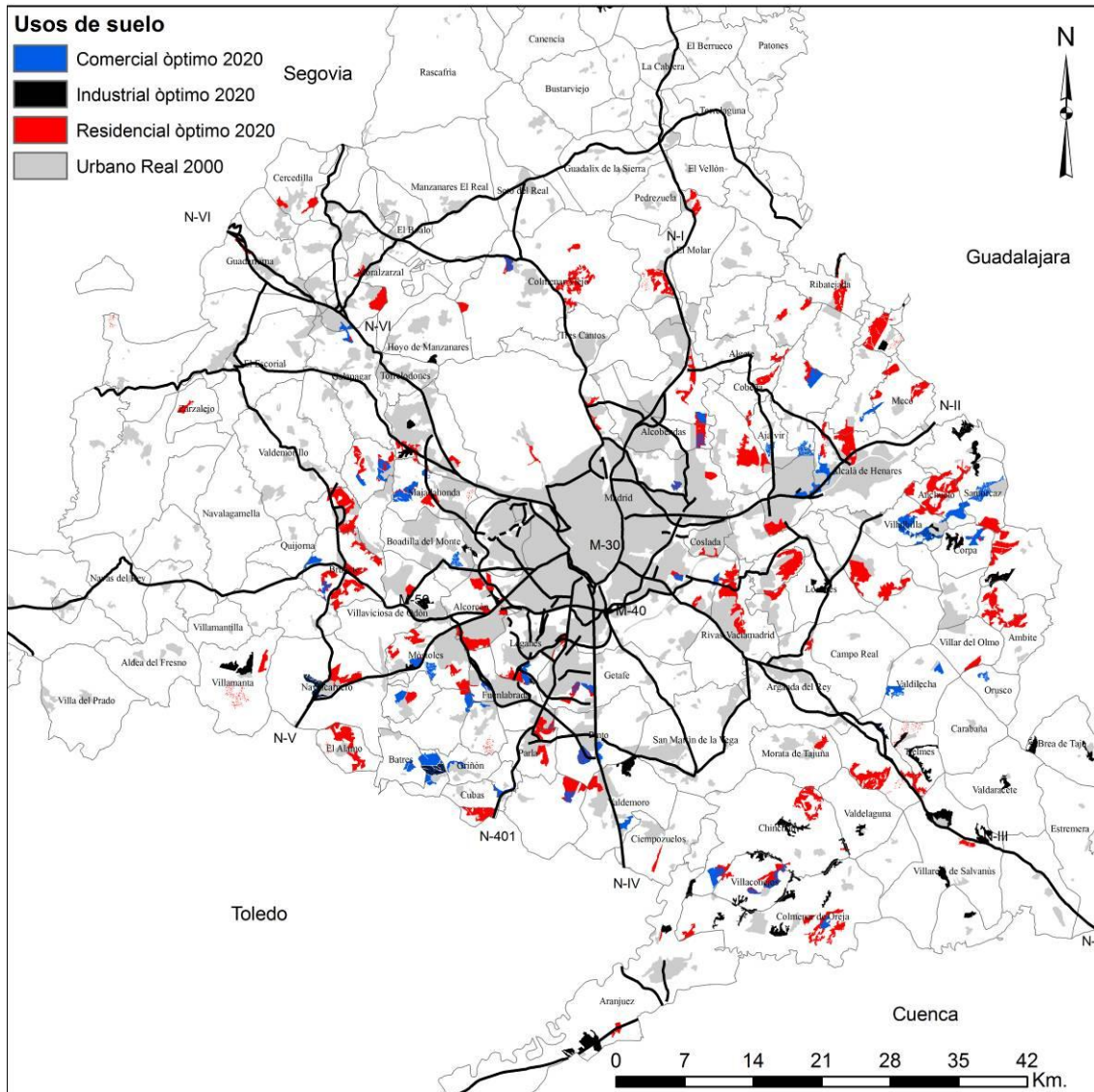
Figura 4. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2000, partiendo de la situación de 1990.

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157



**Figura 5. Crecimiento urbano real entre 1990 y 2000 (en la leyenda las zonas comerciales e industriales aparecen unidas, ya que en el CLC 1990 éstas están agrupadas en una sola categoría).**

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157



**Figura 6. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2020, partiendo de la situación real en el año 2000.**

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, nº 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157

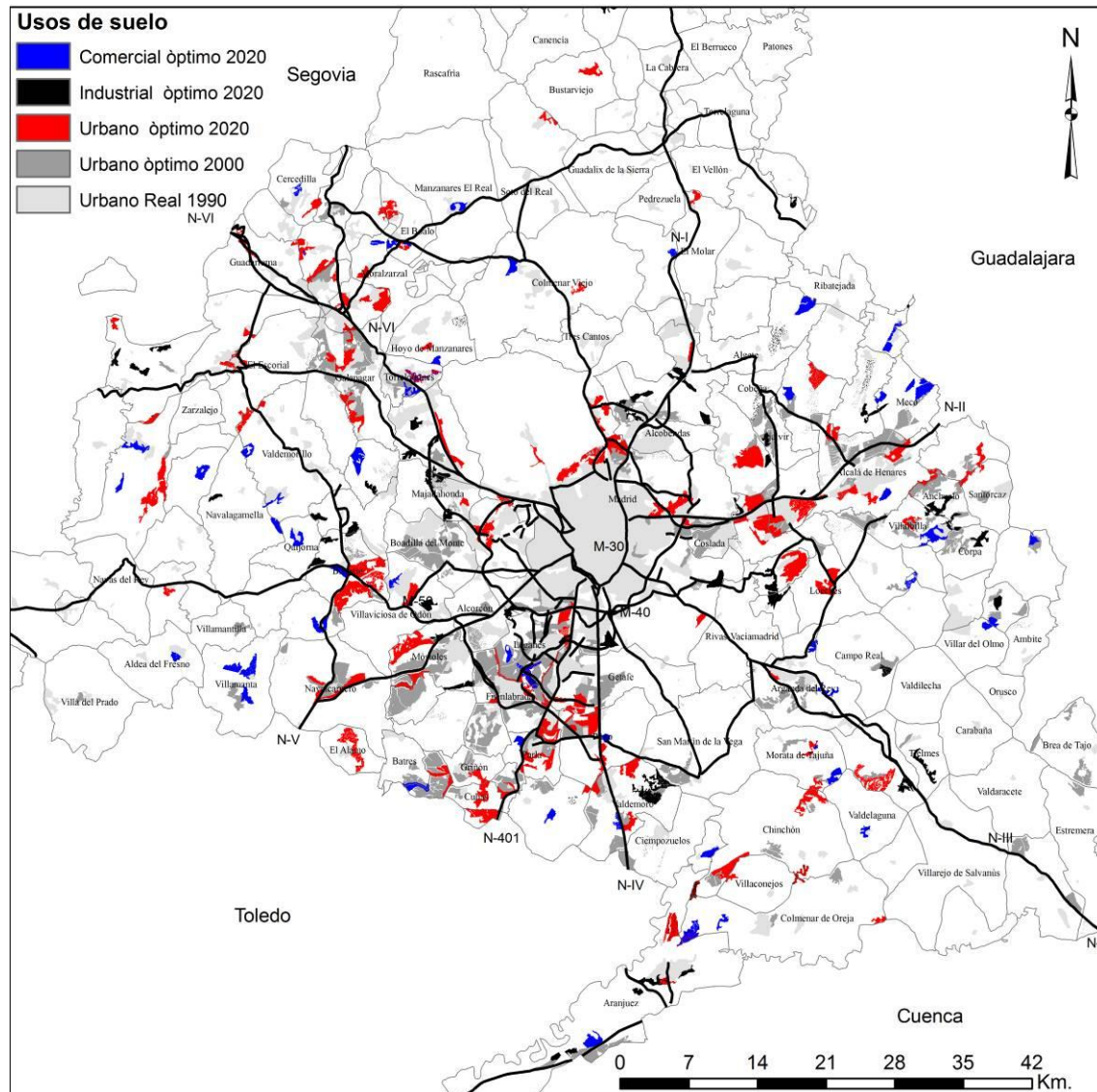
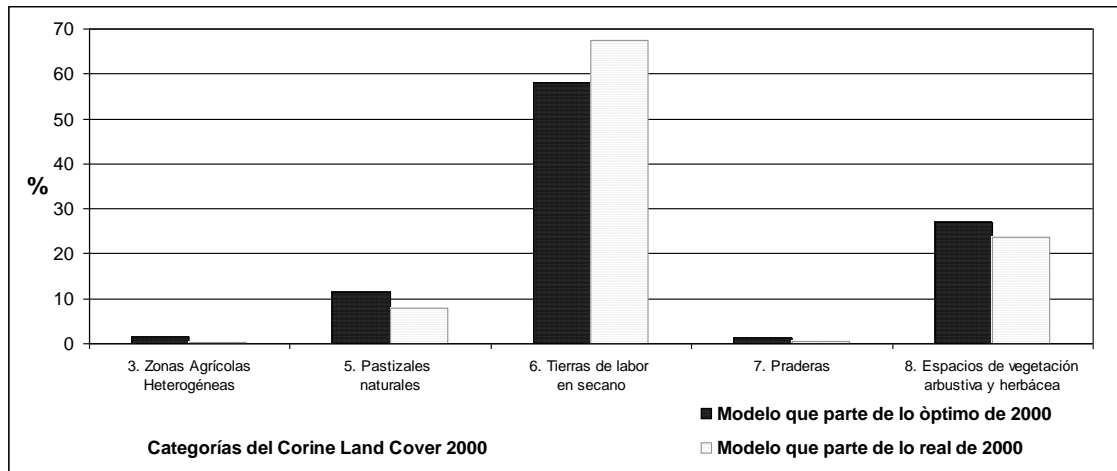


Figura 7. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2020, partiendo de los resultados de asignación "óptima" para el año 2000.

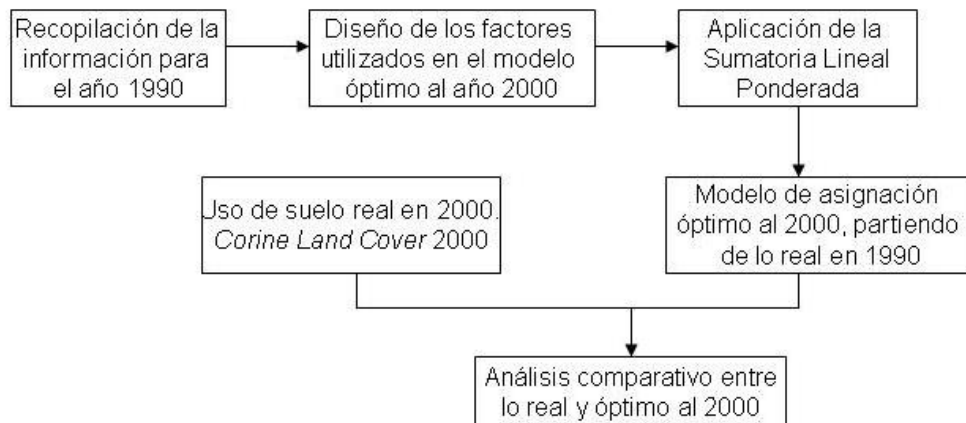
Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid", *GeoFocus (Artículos)*, n° 10, p. 103-134. ISSN: 1578-5157



**Figura 8. Consumo de usos de suelo para ambos modelos al 2020.**

### APÉNDICE 1. Esquema metodológico seguido para la obtención de los modelos de crecimiento urbano óptimos

#### Modelo de asignación óptimo al 2000



#### Modelos de asignación óptimo al 2020

