

Clavero, I., Santos, M., Navarro, R., Guerrero, J.J., Cáceres, F. Moreira, J.M. (2010): Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 759-776. ISBN: 978-84-472-1294-1

## IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCENARIOS FUTUROS SOBRE EL MAPA DE USOS DE SUELO DE ANDALUCÍA

*I. Clavero<sup>1</sup>, M. Santos<sup>2</sup>, R. Navarro<sup>3</sup>, J.J. Guerrero<sup>2</sup>, F. Cáceres<sup>1</sup>, J. M. Moreira<sup>1</sup>*

(1) Red de Información Ambiental de Andalucía. Dirección General de Desarrollo Sostenible e Información Ambiental, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Avda. Manuel Siurot, 50, 41071 – Sevilla

inmaculada.clavero.ext@juntadeandalucia.es, francisco.caceres@juntadeandalucia.es, josem.moreira@juntadeandalucia.es

(2) Red de Información Ambiental de Andalucía. Empresa de Gestión Medioambiental S.A., Johan Gutenberg, 1 (Isla de la Cartuja), 41092 Sevilla

msantos@egmasa.es, jjguerrero@egmasa.es

(3) Grupo de Investigación Evaluación y Restauración de Sistemas Agrícolas y Forestales. Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Forestal. Campus de Rabanales. Edificio Leonardo da Vinci. Ctra. NIV km 396, 14071, Córdoba.

ir1nacer@uco.es

### RESUMEN

La Consejería de Medio Ambiente (CMA) ha puesto en marcha un estudio para la generación de cartografía prospectiva de usos de suelo en la Andalucía del siglo XXI. El objeto de este proyecto es explorar y analizar la posible evolución a medio-largo plazo de los usos del suelo y sus implicaciones ambientales, en un contexto de cambio global según diferentes escenarios. Los estudios prospectivos tales como, la construcción de escenarios, permiten iluminar la toma de decisiones. La distribución de los usos de suelo influye en el crecimiento y desarrollo de nuestra sociedad y representa un elemento importante para predecir los impactos ambientales.

Actualmente la CMA dispone de una cartografía con los más elevados niveles de detalle y precisión espacial, que cumple los estándares cartográficos internacionales, y que cubre los últimos 50 años en la evolución de los usos del suelo en nuestra región. El poder anticipar, bajo diferentes supuestos de desarrollo socioeconómico, la evolución y la distribución de los usos del suelo en el futuro, supondría avanzar y complementar esta línea de trabajo. La integración de estos factores se ha llevado a cabo mediante autómatas celulares utilizados para modelar los cambios de uso y el desarrollo urbano.

Palabras Clave: Prospectiva, uso de suelo, escenarios, cambio, autómatas celulares.

### ABSTRACT

*The Environmental Ministry of the Andalusian Regional Government has initiated a study to generate prospective mapping of land uses in Andalusia in the XXI century. The goal of this project is to explore and analyze medium to long-term land uses changes and their environmental implications according to different scenarios in the context of*

*global change. Predicting land use change under such scenarios will provide valuable information to decision makers. The distribution of the land uses influences in the growth and development of our society and thus represents a crucial element to predict future environmental impacts.*

*The Environmental Ministry of Andalusia currently has maps available that depict land use changes in the region over the past 50 years and contain the highest level of detail and spatial precision according to international cartographic standards. The power to predict the growth and distribution of future land uses under different assumptions of socioeconomic development will advance and complement this work. The integration of these factors is carried out based on cellular automata applied to model land use changes and urban development.*

**Key Words:** *Prospective, land use, scenarios, change, cellular automata.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La Consejería de Medio Ambiente (CMA) ha puesto en marcha este estudio para la generación de cartografía prospectiva de usos de suelo en la Andalucía del siglo XXI. El objeto de este proyecto es explorar y analizar la posible evolución a medio-largo plazo de los usos del suelo en Andalucía y sus implicaciones ambientales según diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico.

La cartografía de usos de suelo ha constituido en Andalucía una herramienta fundamental para el análisis de los cambios que han acontecido en el paisaje. El registro de estos cambios, principalmente a través de documentos cartográficos, se ha realizado en Andalucía desde 1976, año en el que se genera el Mapa de cultivos y aprovechamientos desarrollado por el Ministerio de Agricultura. Posteriormente, en el año 1987 el proyecto CORINE establece las bases metodológicas para el estudio de las coberturas vegetales, implementándose dichas bases en Andalucía. El IGN español obtendría a partir del CORINE, el mapa de ocupación del suelo de España y ambas fuentes, Landcover y mapa de ocupación, supondrían el punto de partida para el mapa de usos andaluz, que se presentaría en su primera versión en el año 1991. Tras este año, y con periodicidad cuatrimestral se llevaron a cabo actualizaciones (1995, 1999, 2003, 2007) que, actualmente, constituyen informaciones gráficas y estadísticas de gran valor que permiten analizar la evolución de los cambios con una perspectiva temporal de veinte años (Moreira et al., 2007). El análisis de los cambios de ocupación del territorio que se producen como consecuencia de las diversas actividades humanas que se desarrollan sobre él, y por la dinámica natural de los ecosistemas, constituye un indicador de trascendental importancia para avanzar en el conocimiento de las potencialidades hacia un desarrollo más sostenible (IMA, 2009).

En este sentido, y sobre la base del Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía, se propuso el desarrollo de escenarios futuros para predecir el cambio de uso de suelo en un periodo de aproximadamente 30 años. Los escenarios son suposiciones de lo que puede ocurrir. A diferencia de las proyecciones, los escenarios no representan, necesariamente, lo que se espera que ocurra en el futuro (Wollenberg et al., 2001). La gran utilidad de estos escenarios es que sirven como herramienta a la hora de tomar decisiones para el futuro que puedan afectar de forma regional a factores sociales y ambientales. Los principales factores que influyen en las diferentes etapas de los escenarios se denominan fuerzas motrices y, los valores de éstas pueden ser asumidos por los escenarios objeto de estudio o bien, tomados de otros escenarios ya establecidos. Las fuerzas motrices constituyen un complejo sistema de interacciones que afecta al paisaje tanto a nivel temporal como espacial. Su análisis y representación no es fácil debido a que intervienen muchos factores en la definición de cada una de ellas. Varios estudios han examinado los factores económicos y sociales que impulsan el cambio de uso de suelo (Turner et al., 1993; Hersperger and Bürgi, 2007). Estos estudios agrupan las fuerzas motrices en cinco categorías principales: Demografía, Economía, Sociedad, Política y Tecnología.

Todo ello integrado conduce al empleo de la modelización para obtener productos finales en el uso del suelo. La modelización es un método dentro de las distintas herramientas disponibles para estudiar la dinámica de cambios de uso de suelo. Esta dinámica de cambio de uso de suelo ha despertado un gran interés tanto a nivel de investigación, social y económico. Se debe tener en cuenta que se parte de una situación pasada o presente hacia una situación futura. Estos modelos tienen un aspecto en común y es que simulan la dinámica del paisaje hacia el futuro teniendo como base unos escenarios establecidos (Kok et al., 2007).

Parker et al. (2002) establecieron una clasificación de modelos para estudios de uso de suelo. En dicha clasificación se encuentran modelos con ecuaciones, modelos de sistema, modelos basados en técnicas estadísticas, modelos evolutivos, modelos celulares, modelos híbridos, modelos basados en agentes y por último modelos multi-agentes.

Se ha observado una tendencia creciente en el uso de autómatas celulares para modelar los cambios de uso de suelo y desarrollo urbano (Engelen et al., 1995). Un autómata celular consiste en la agrupación regular de celdas. El estado de cada celda es definido por el estado previo de las celdas vecinas. Aunque los autómatas celulares usan reglas simples pueden generar comportamientos complejos. Sin embargo, es importante recordar que el uso de los autómatas celulares con una alta tecnología (tanto de software como hardware), y con buenos datos disponibles, ha comenzado recientemente (Kumar, 2003). Se han realizado varios estudios (Barredo y Demicheli, 2003; Barredo et al., 2003; Batty, 2003; Han et al., 2009; Petrov et al., 2009) sobre modelos urbanos con autómatas celulares capaces de modelizar dinámicas espaciales reproduciendo patrones complejos a partir de elementos sencillos. En particular, se destacará el modelo METRONAMICA desarrollado en 1992 por el Instituto de Investigación para el Conocimiento de Sistemas (*Research Institute for Knowledge Systems*, RIKS) en colaboración con Roger Blanco de la Universidad de Canadá ([www.riks.nl/](http://www.riks.nl/)). Este modelo se aplica a todo el territorio a modelar, además permite explorar tanto aspectos económicos como medioambientales. El fin es estimular y facilitar la sensibilización y el aprendizaje tras una etapa previa de debate en la toma de decisiones (RIKS BV, 2005a). Un aspecto importante en este modelo es que permite incorporar variables referentes a la población, uso del suelo, economía etcétera, para encontrar una solución en la que estén implícitos los aspectos económicos, ecológicos y sociales (Uljee et al., 2006).

La Agencia Europea de Medio Ambiente inició el proyecto PRELUDE (*PRospective Environmental analysis of Land Use Development in Europe*) (EEA, 2007a) con el fin de desarrollar escenarios coherentes que describan de manera plausible la evolución y el futuro de los usos del territorio y sus posibles impactos en Europa con la aplicación de Metronamica.

Este proyecto europeo es el que servirá como referencia para la implementación de escenarios futuros en la Comunidad de Andalucía. Los escenarios establecidos en el proyecto PRELUDE se adaptaron a Andalucía para intentar reflejar en las distintas situaciones presentadas en los escenarios cómo evolucionarían los usos de suelo a largo plazo y los impactos ocasionados en el paisaje.

## 2. ANTECEDENTES

Los modelos predictivos de cambios de usos del suelo han experimentado un desarrollo espectacular en los últimos años, siendo especialmente relevantes aquellos que se han ocupado de modelizar procesos dinámicos complejos.

Los estudios de uso de suelo y concretamente asociados a cambios ocurridos a largo plazo se han abordado a nivel europeo desde distintas perspectivas. En este sentido se citan por ejemplo los siguientes proyectos:

- Comisión Europea: SCENAR 2020 (Escenario 2020) cuyo objetivo es identificar las tendencias futuras y las fuerzas motrices que serán el marco para la economía rural y agrícola europea en el horizonte 2020.

- Desarrollo sostenible y Sistemas de Innovación, Universidad de Wageningen: EURURALIS cuya ambición es doble puesto que pretende servir de apoyo a los políticos en la toma de decisiones sobre el futuro de las zonas rurales de la UE-27 con datos sólidos y, por otro lado, aprender acerca de la interacción de muchas fuerzas que impulsan el futuro de la Europa rural.

- Agencia Europea de Medio Ambiente: PRELUDE (“PRospective Environmental analysis of Land Use Development in Europe”) cuyo objetivo es explorar lo que puede ser Europa desde ahora hasta 30 años. No se pretende hacer predicciones exactas pero si analizar la posible evolución de los usos de suelo a través de cinco escenarios de carácter socio-económico.

- Joint Research Centre: MOLAND (“Modelling of Future Urban and Regional Land Use Development”) cuyo objetivo es evaluar y modelar el pasado, presente y futuro urbano y desarrollo regional desde el punto de vista del desarrollo sostenible mediante la creación de una base de datos de usos de suelo y red de transporte para varias regiones y ciudades de Europa.

Cabe destacar el proyecto PRELUDE ([www.eea.europa.eu/themes/scenarios/prelude](http://www.eea.europa.eu/themes/scenarios/prelude)), sus escenarios se desarrollaron con la intención de recoger lo que podía ocurrir a largo plazo. Estos escenarios fueron elaborados cuidadosamente por expertos europeos en distintas disciplinas (economía, demografía, industria, etcétera), incluyendo la interacción directa con equipos de modelización responsables de la cuantificación de los escenarios (EEA, 2007a; EEA, 2007b). Basándose en diferentes hipótesis como el cambio climático, ambiental, económico, social y tecnológico se desarrollaron cinco escenarios cualitativos. En cada uno se reflejan los cambios ocurridos en el uso del suelo y los impactos causados en el medio ambiente.

## Descripción de los escenarios desarrollados en PRELUDE

La definición de los escenarios está basada en la descripción de fuerzas motrices referentes a categorías como demografía, desarrollo económico, etc. que cobran una mayor o menor importancia según el escenario de análisis. A continuación se resumen las principales características de los escenarios establecidos en el proyecto PRELUDE (RISK, 2005b):

1. Europa de Contraste: Este escenario está caracterizado por la globalización, la disminución de la solidaridad y la pasividad del gobierno. Por otro lado, los efectos del cambio climático repercuten directamente sobre la actividad agrícola.

2. Europa de la armonía: Los ingredientes principales en este escenario son la crisis energética, el aumento relativo de la sensibilización ambiental y el desarrollo rural. Las grandes inundaciones acontecidas provocan que las personas abandonen las zonas más vulnerables.

3. Europa de la estructura: Este escenario está relacionado con la optimización del uso de la tierra y la fuerte ordenación del territorio en respuesta a un envejecimiento de la sociedad y un sector agrícola en declive.

4. Europa de la innovación: Lo esencial en este escenario es la concienciación ambiental, la innovación tecnológica y la descentralización.

5. Europa de la cohesión: En este escenario el cambio climático y los desastres naturales son los protagonistas. Las inundaciones y las sequías afectan a muchas personas lo que provoca que salte la alarma a los distintos gobiernos europeos.

Cada uno de estos escenarios fueron elaborados con el objetivo principal de ayudar a la toma de decisiones de los políticos en cada uno de los países de análisis. Los resultados de los escenarios PRELUDE no son previsiones ni predicciones. Son descripciones de futuros hipotéticos, los cuales ayudan a una reflexión estratégica sobre algunos de los retos a los que se enfrenta Europa respecto al medio ambiente, desarrollo rural entre otros.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Modelo de Uso de Suelo

#### 3.1.1. Descripción

El funcionamiento de Metronamica se lleva a cabo mediante la asignación de las actividades económicas y demográficas a través de autómatas celulares basados en modelos de uso de suelo (Engelen et al., 1995).

A partir del Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía de los años 1999 y 2007 (E: 1/25.000) se procedió a reclasificar la leyenda. La leyenda de usos de suelo utilizada consta de 28 usos diferentes, los cuales han sido subdivididos en tres categorías ya que así lo requiere el modelo:

- Libres (*vacants*): Usos que cambian como consecuencia de la dinámica de otros usos (ej.: matorral)
- Funcionales (*functions*): Usos con elevada tendencia al cambio (ej.: tejido urbano)
- Característicos (*features*): Usos que no suelen experimentar cambios (ej.: marismas)

Los usos funcionales son los más importantes en el modelo ya que son los que experimentan mayores cambios por lo que la correcta elección resulta imprescindible.

El área modelada (Andalucía) está representada como un mosaico de celdas que constituye el patrón de cambio del modelo de usos de suelo de la Comunidad Andaluza. Cada celda representa un uso de suelo determinado. El tamaño de celda seleccionado para Andalucía ha sido de 250x250 metros.

La razón de la rasterización de la cartografía elaborada y su incorporación en un SIG raster es sencilla: tener la información en un modelo de datos basado en la división del espacio en una malla regular, lo cual es perfectamente integrable con un autómata celular, ya que los autómatas celulares emplean por definición, como uno de sus componentes básicos, un espacio n-dimensional dividido en teselas homogéneas (Torrens, 2000), que en este caso y en general para las aplicaciones espaciales, está constituido por celdas bidimensionales (Benavente, 2006).

La relativa atracción de una celda, así como sus limitaciones y oportunidades de cambiar de un uso de suelo a otro está regido principalmente por cuatro elementos (Van Delden y Engelen, 2005):

- **Idoneidad (*suitability*)**. Este término hace referencia al grado en que una celda es capaz de contener un uso según la actividad económica o residencial asociada a éste. Los mapas de idoneidad se elaboran para los usos incluidos dentro de las categorías de libres y funcionales. Los factores usados para la elaboración de los mapas de idoneidad para Andalucía han sido: altitud, pendiente, temperatura máxima y mínima, precipitación y desertificación.

- **Zonificación (*zoning*)**. Los mapas de zonificación son utilizados para hacer cumplir las restricciones espaciales sobre la asignación de los usos del suelo. Estos mapas son elaborados para los usos de suelo funcionales. Las áreas protegidas o los lugares históricos son restricciones a la hora de la ocupación de un uso determinado por lo que son empleados para la elaboración de estos mapas. Para cada uso hay una serie temporal definida por el usuario, precisando que celdas pueden o no pueden contener un uso en particular (RIKS, 2005a). Los mapas de zonificación se mantienen constantes durante la simulación a no ser que el usuario los cambie.

- **Accesibilidad (*accessibility*)**. La accesibilidad hace referencia a la facilidad con la que una actividad puede realizarse en una celda en particular a través de la red de transporte. La accesibilidad es calculada para los usos funcionales.

- **Combinación dinámica de usos de suelo**. Para cada uso de suelo funcional existe un conjunto de interacción espacial de reglas que determinan el grado por el cual se siente atraído o repelido por los otros usos presentes a su alrededor. El entorno está compuesto por 196 celdas ya que se utiliza un radio de 8 celdas. Si la atracción es muy alta el uso intentará ocupar ese lugar, si no buscará lugares más atractivos.

En base a estos cuatro elementos, el modelo calcula en cada paso de la simulación el potencial de transición para cada celda y función. La figura 1 muestra de forma esquemática cada uno de estos elementos.

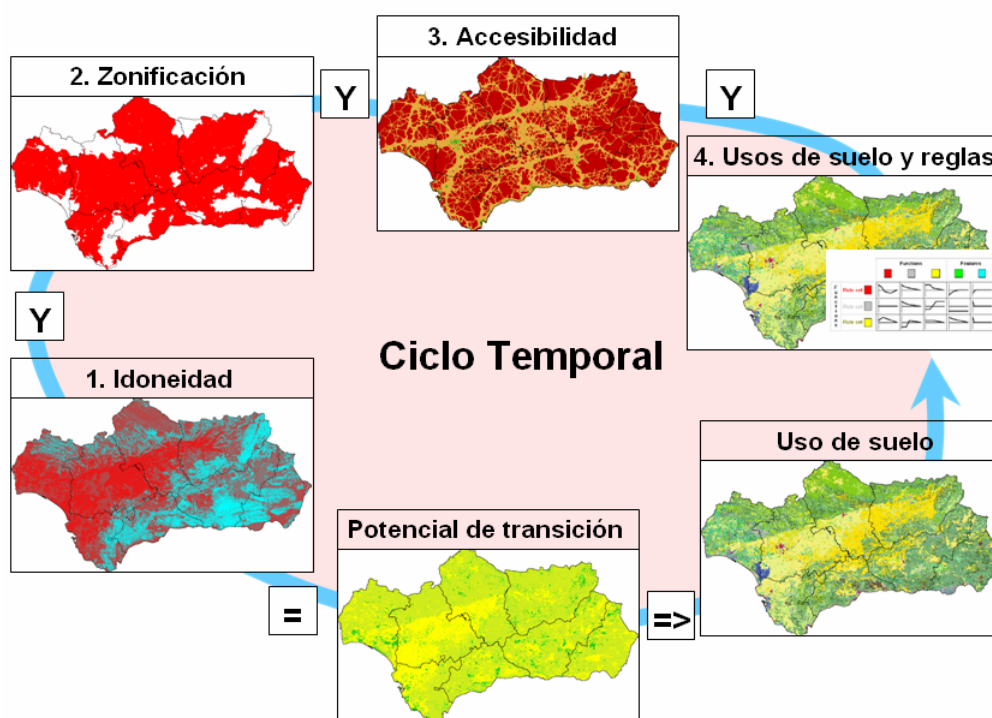


Figura 1. Fuerzas del modelo de uso de suelo a escala local.

Metronamica lleva a cabo la simulación para un periodo de tiempo determinado. Para cada año se obtienen los resultados tanto numéricos como visuales del nuevo mapa de cambio de uso de suelo generado (figura 2). Además el modelo calcula unos indicadores que expresan los cambios económicos, sociales y ambientales según se especifique.

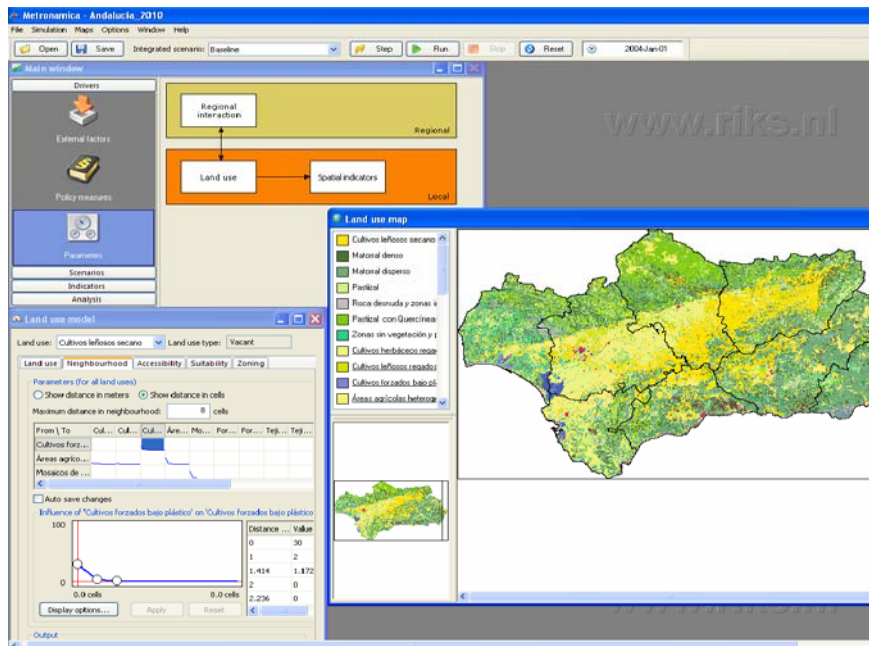


Figura 2. Interfaz de la aplicación Metronamica.

## 3.2. Autómata celular

### 3.2.1 Introducción

Los autómatas celulares son capaces de modelizar dinámicas espaciales reproduciendo los patrones complejos que muestran las ciudades, como señala Frankhauser (1998), y además presentan la particularidad de reproducir dichos patrones estando compuestos de elementos sencillos (Wolfram, 1984).

El nombre de autómata celular es debido a que se componen de celdas dispuestas de la misma forma que la cuadrículas de un tablero de ajedrez (Van Delden et al., 2008). El estado de cada celda es función de una regla de transición simple. Originalmente los autómatas celulares fueron desarrollados para investigar la dinámica de la naturaleza, pero posteriormente se han ido reconstruyendo para representar los sistemas de una forma más realista, aumentando con ello la complejidad del modelo. Las características principales de un autómata celular son las siguientes:

#### *Tamaño de celda*

El tamaño de celda a considerar depende de los objetivos del estudio, la disponibilidad de los datos y el tamaño del área a modelar. Generalmente se encuentra comprendido dentro del intervalo de 50 a 1000 metros. Para la Comunidad de Andalucía se eligió un tamaño de celda de 250 x 250 metros ya que con este tamaño quedaban bien definidos los usos del suelo.

#### *La vecindad*

La vecindad se define como una región circular alrededor de una celda cuyo radio es de 8 celdas. La vecindad por tanto la componen 196 celdas (figura 3) dispuestas en 30 zonas que forman círculos concéntricos (RIKS BV, 2007).

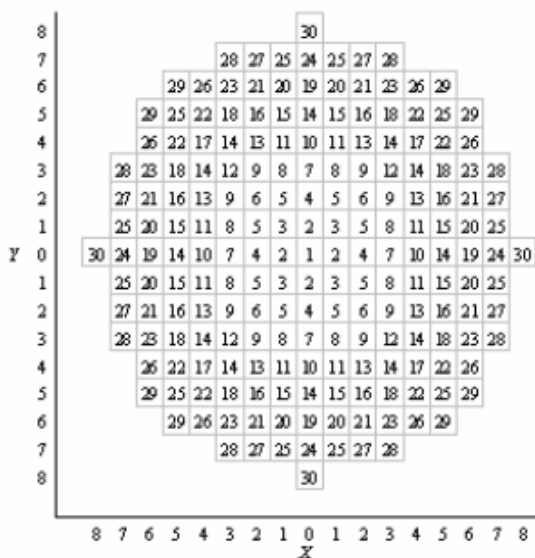


Figura 3. Todas las celdas de la vecindad se encuentran en un círculo concéntrico.

*Estado de las celdas*

El estado de las celdas representa el uso predominante en cada celda. Hay que distinguir entre los usos dinámicos (*function*) y los estáticos (*feature*). Estos últimos no cambiarán pero influyen en la dinámica de los usos dinámicos y, por lo tanto, afectarán al proceso final de asignación de uso de suelo.

*Efecto de la vecindad*

La idea fundamental de un autómata celular es que el estado de una celda en cualquier momento depende del estado de las celdas de su entorno (vecindad). Este efecto se calcula para cada estado de los usos funcionales. En este modelo, el efecto de vecindad puede representar una atracción (positivo) o repulsión (negativo) entre los usos de suelo como muestra la figura 4 (RIKS, 2007).

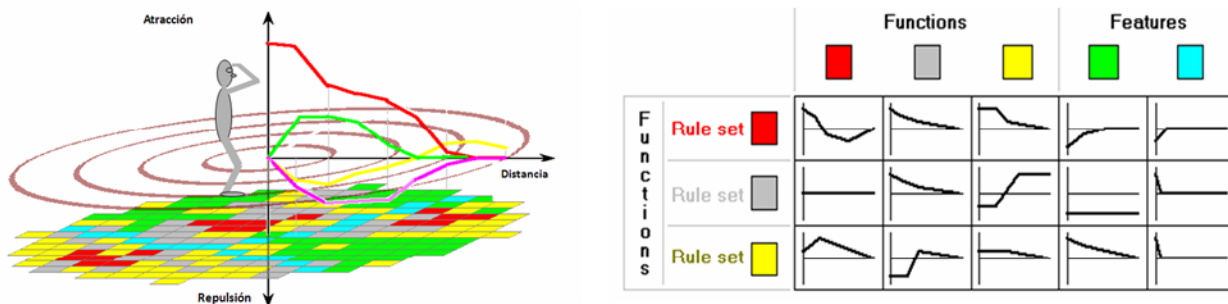
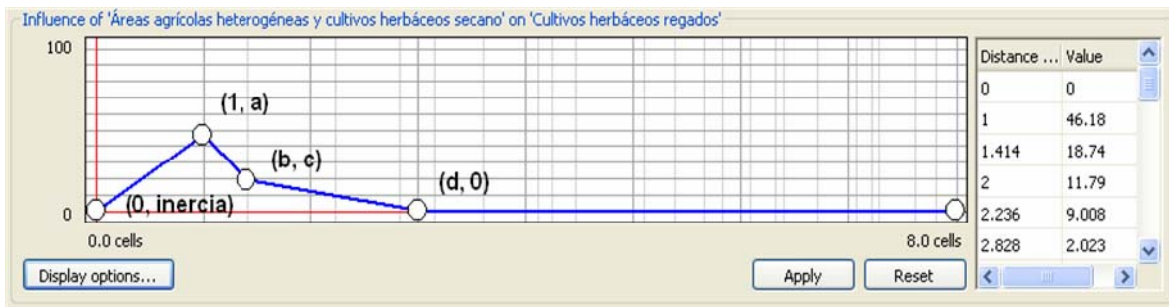


Figura 4. Efecto de vecindad con 196 celdas (izquierda). Reglas de transición entre los usos funcionales y característicos (derecha).

En general, las celdas que están más alejadas de esta vecindad tendrán un efecto menor. Un ejemplo de la influencia que puede tener un uso de suelo sobre otro se observa en la figura 5. Las características principales de esta curva son:

- El valor de la inercia. Este valor se sitúa siempre en el eje Y, es decir, a una distancia 0. El primer punto sería (0, *inercia*).
- El segundo punto localizado a distancia 1. Este valor está indicado por (1,a).

- El último valor de la curva (a distancia  $d$ ) debe ser 0 debido a que a distancia mayores de  $d$  la función tomaría valor 0. Este punto se indicaría por  $(d,0)$ .
- Hay un punto  $(b,c)$  que puede situarse en cualquier lugar entre el segundo y el último punto.



**Figura 5.** Ejemplo de la función de influencia del uso “Áreas agrícolas heterogéneas y cultivos herbáceos en seco” sobre “Cultivos herbáceos regados”.

### Reglas de transición

El objetivo final del modelo del autómata celular es asignar un estado a cada celda del mapa para simular el comportamiento dinámico de los usos de suelo. La asignación se basa en un algoritmo que indica el potencial de asignación. Este potencial de asignación depende del efecto de vecindad, la aptitud física o institucional de la localización, la disponibilidad de la red de transporte y de un factor estocástico para tener en cuenta los posibles efectos impredecibles. Este conjunto conforma las normas de asignación del modelo.

### 3.3. Herramientas

Con el fin de construir y evaluar las distintas estrategias y escenarios están disponibles dos herramientas que ayudan a la elaboración de mapas de entrada en Metronamica y al análisis de los resultados: *Overlay Tools* y *Map Comparision Kit*.

#### Overlay Tools

Esta herramienta está diseñada para la elaboración de los mapas de idoneidad y zonificación. Los factores son las entradas. La combinación entre ellos dependerá de los pesos asignados, los cuales se indican mediante una barra deslizante. Finalmente, el mapa resultante es exportado a Metronamica.

La preparación de los mapas de idoneidad ha supuesto la realización de los histogramas para cada uso de suelo pertenecientes a las categorías de libres y funcionales en función de los factores físicos elegidos. Así se obtuvo el peso de cada clase (ej.: cultivos leñosos regados) dentro del factor físico considerado (ej.: factor temperatura o altitud) de forma objetiva.

Igualmente fue necesario un análisis de la contribución de los distintos factores físicos a través del programa de modelado MaxEnt (Philips et al., 2004) para obtener en este caso el peso de cada factor sobre los demás.

La figura 6 muestra la elaboración del mapa de idoneidad para el uso “Cultivos leñosos regados”. En dicha figura se pueden distinguir varias partes:

- Parte 1: En ella aparecen los diferentes factores y la clasificación dentro de los mismos.
- Parte 2: Es el lugar donde se asignan los pesos a través de las barras deslizantes. Los valores están comprendidos entre 0 y 10
- Parte 3: Mapa del factor. En este caso representa la altitud.
- Parte 4: Mapa correspondiente a la idoneidad del factor, es decir, a cada intervalo de altitud también se ha asignado un peso determinado.



- Parte 5: Mapa de idoneidad del uso “Cultivos leñosos regados”. Los colores azulados significan nula o escasa idoneidad y los colores rojizos media o alta idoneidad.

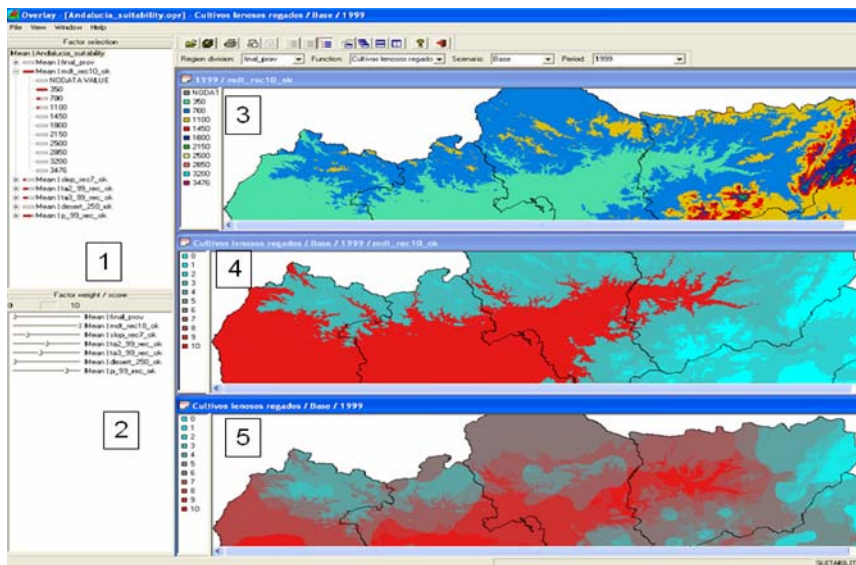


Figura 6. Elaboración del mapa de idoneidad con la herramienta Overlay Tool.

Una aproximación similar se realiza para la elaboración de los mapas de zonificación (Figura 7). En este caso el mapa de zonificación hace referencia al uso “Tejido urbano continuo”. Al igual que en el apartado de idoneidad se pueden distinguir varias partes:

- Parte 1: Listado de factores que intervienen.
- Parte 2: Mapa característico del factor, por ejemplo los Espacios Naturales Protegidos.
- Parte 3: Mapa de zonificación del factor (el color rojo indica que en esa localización el uso está permitido en el momento inicial, el color verde que está permitido en el t=1 en el futuro, el azul que estará permitido para un cierto momento t=2 y, finalmente, el color blanco que en esa localización el uso no está permitido)
- Parte 4: Mapa de zonificación para el uso en cuestión.

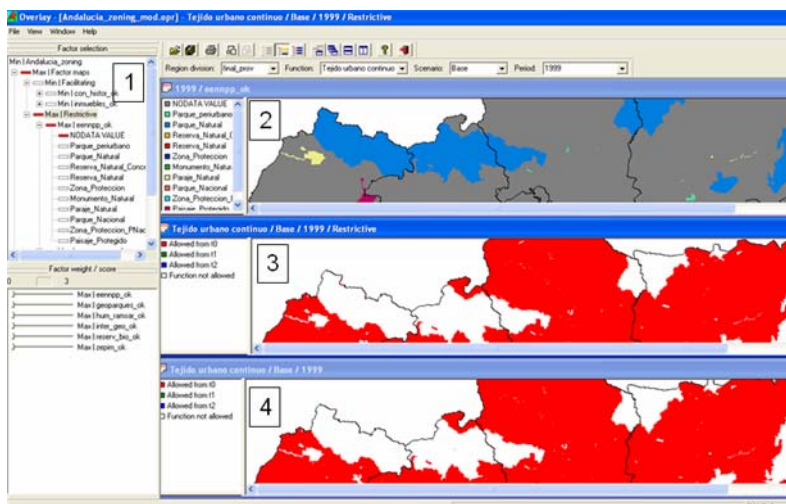


Figura 7. Elaboración del mapa de zonificación con la herramienta Overlay Tool.

### Map Comparision Kit

Map Comparision Kit es una herramienta que permite comparar pares de mapas generados en Metronamica. Es una herramienta esencial para comparar y analizar la distribución espacial de las distintas alternativas generadas. Está equipado de distintas técnicas estadísticas como el índice Kappa que permiten realizar dichas comparaciones

(Van Delden et al., 2005). Esta herramienta se ha usado en el proceso de la calibración para comparar el mapa real y el mapa obtenido de la simulación en Metronamica.

#### 4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.

Una vez implementado el modelo, el problema principal es la calibración del mismo. Dicho proceso no es fácil ya que intervienen una multitud de parámetros que influyen en los resultados finales de la obtención de la evolución de los usos de suelo. Para ello, a partir del Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía del año 1999 se ha planteado la calibración del modelo para tratar de simular la situación de 2007, de tal forma que se obtengan unos resultados los más aproximados posibles a la situación real del Mapa de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo del año 2007. Este proceso de la calibración requiere de un conjunto de pruebas que permitan ir ajustando los parámetros a la realidad del área modelada.

Una vez calibrado y validado el modelo se simularía la evolución de los usos de suelo hasta el año 2035 según los distintos escenarios de análisis. En la calibración resulta imprescindible entender que en cada interacción se obtienen un conjunto de potenciales de transición para cada celda y uso. Los potenciales de transición se calculan según la siguiente fórmula:

$$P_k = r(\alpha) N_k S_k A_k Z_k$$

Dónde:

$r(\alpha)$  = parámetro de perturbación aleatoria.

$N_k$  = efecto de la vecindad

$S_k$  = idoneidad

$A_k$  = efecto de la accesibilidad

$Z_k$  = zonificación

El procedimiento de la calibración consta de varios pasos que se muestran a continuación. Normalmente cuando se modifica un parámetro es para corregir un problema particular que ocurre en el mapa simulado. Sin embargo, es frecuente que al realizar un cambio en algún parámetro para obtener un mejor resultado se generen efectos secundarios no deseados, es decir, se introducen anomalías en el mapa simulado. Por ello, en cada paso del proceso de la calibración hay que comprobar esos efectos secundarios y ajustar los parámetros para minimizarlos.

Los pasos a seguir (figura 8) son:

1º.- Introducir la demanda de celdas para cada uso.

2º.- Ajustar las reglas de atracción y repulsión entre los mismos.

3º.- Calibrar el parámetro  $\alpha$

4º.-Introducir los mapas de idoneidad y zonificación así como ajustar los parámetros correspondientes a la accesibilidad.

5º.- Repetir los pasos desde el segundo al cuarto punto hasta que se obtenga el mapa simulado lo más próximo al real.

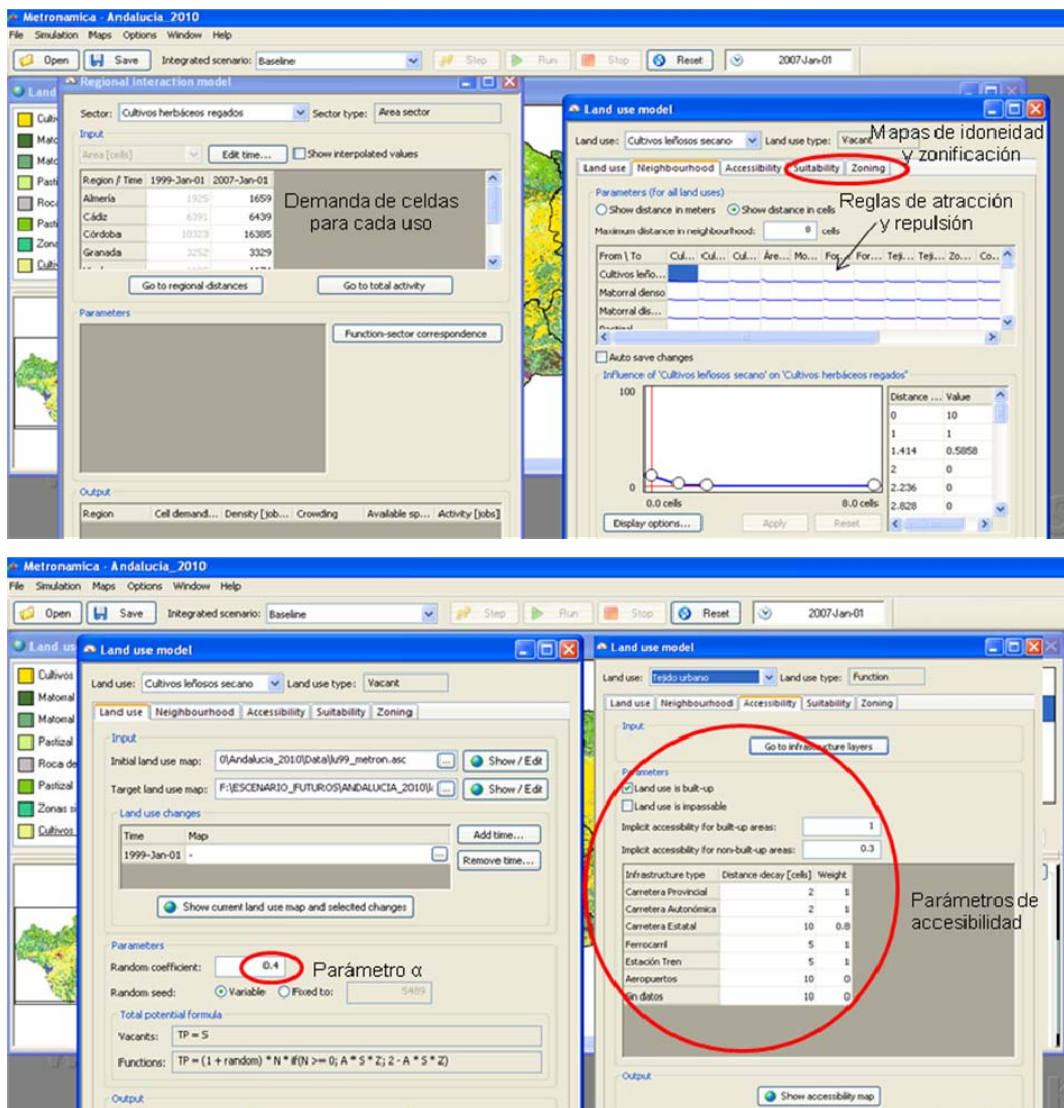
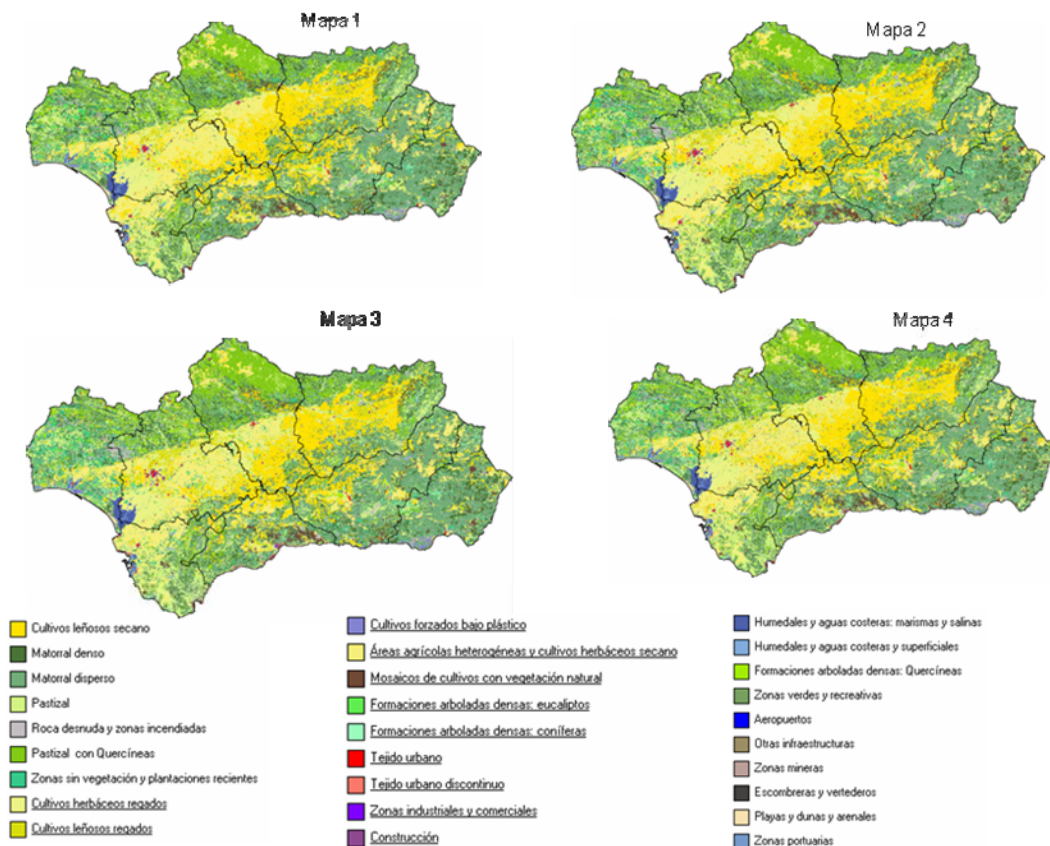


Figura 8. Pasos a seguir en el proceso de la calibración de los parámetros.

En los análisis de la calibración se hará referencia a cuatro mapas (Figura 9): mapa de uso de suelo del año 1999 (Mapa 1), mapa real de uso de suelo del año 2007 (Mapa 2), mapa simulado del año 2007 (Mapa 3) y el mapa de referencia del año 2007 (Mapa 4) creado usando el método *Random Constraint Match (RCM)* disponible en la herramienta *Map Comparision Kit*. Como se ha comentado con anterioridad se ha utilizado la herramienta *Map Comparision Kit* para comparar mapas dos a dos una vez incorporados y calibrados los parámetros y para el análisis de los resultados.



**Figura 9.** Mapas usados y elaborados en el proceso de la calibración y validación. Mapa de uso de suelo del año 1999 (Mapa 1), mapa real de uso de suelo del año 2007 (Mapa 2), mapa simulado del año 2007 (Mapa 3) y el mapa de referencia del año 2007 (Mapa 4).

Para evaluar la calidad de la calibración y, por tanto la validación del modelo se han realizado diferentes procesos de análisis que se han agrupado en dos bloques: Interpretación visual y Bondad del ajuste. En cada uno de estos bloques se han realizado varias pruebas que se comentan a continuación.

*Interpretación visual*

Una vez obtenido el Mapa 3 (mapa simulado del año 2007) se comparó con el Mapa 2 (mapa real de uso de suelo del año 2007). Este proceso se emplea principalmente para localizar espacialmente que los grandes cambios ocurridos entre el Mapa 1 (mapa de uso de suelo del año 1999) y el Mapa 2 (mapa real de uso de suelo del año 2007) ocurren entre el Mapa 1 y el Mapa 3. Este análisis se sustenta con la realización y el análisis de las matrices de contingencia entre los pares de mapas comentados.

*Bondad del ajuste*

En este bloque se han realizado dos análisis: Por categoría y el estadístico Kappa.

- Por categoría: Consiste en analizar clase por clase de uso de suelo (categoría) entre el Mapa 2 y el Mapa 3 qué coincidencia existe, respecto a celdas se refiere, entre esos dos mapas. En la figura 10 se muestra el análisis por categoría respecto al uso “Matorral denso”. Como se observa en dicha figura, la leyenda y la tabla asociada a la estadística sirven para valorar los resultados. La leyenda indica si no existe ninguna coincidencia, si hay coincidencia para ese uso entre los dos mapas o si el uso en cuestión está presente sólo en uno de los mapas. La tabla de los resultados estadísticos muestra el número de celdas coincidentes entre los mapas.

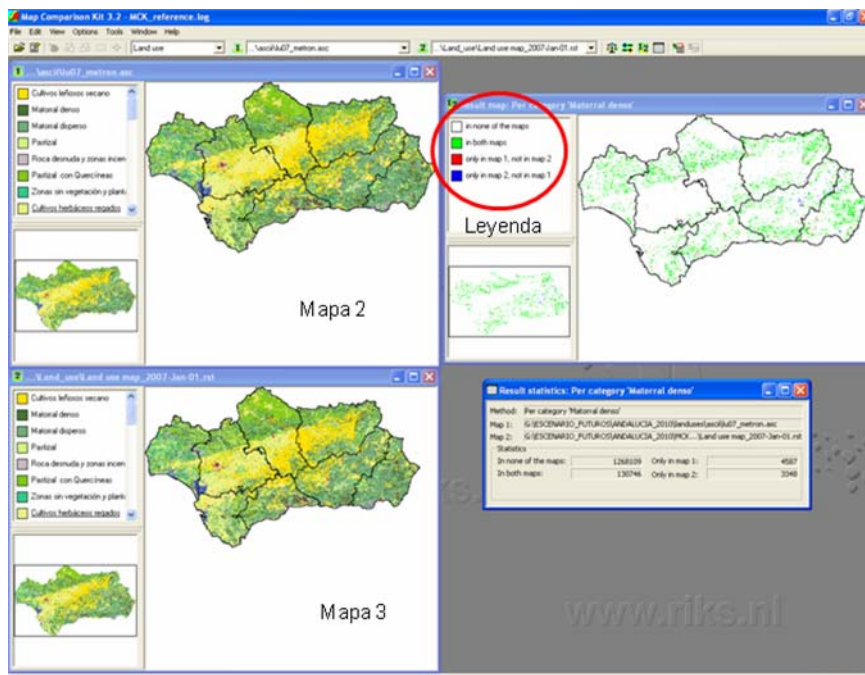


Figura 10. Análisis por categoría del uso “Matorral denso” utilizando la herramienta Map Comparison Kit.

- Estadístico Kappa: El método de comparación del estadístico Kappa se basa en la comparación de las celdas de los mapas debido a que muestra si son iguales o no. Esto se traduce en un mapa (Figura 11) que representa la comparación de la distribución espacial del acuerdo o desacuerdo. En la figura 11 se observa igualmente la tabla estadística. En dicha tabla aparece tanto el valor del índice Kappa total como el referente a cada categoría de uso de suelo. El valor de Kappa total y el Kappa de las diferentes categorías debe de estar lo más próximo a 1.

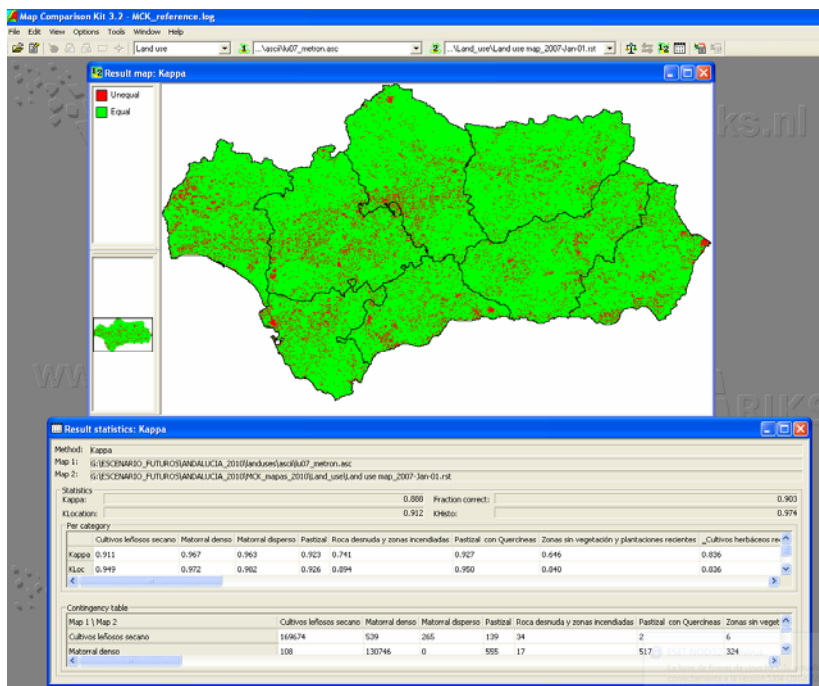


Figura 11. Obtención del índice kappa total y por categoría utilizando la herramienta Map Comparison Kit.

Con el objetivo de analizar la calidad de la calibración se comparan los resultados con los resultados de referencia desde un modelo neutral de referencia. La calibración es considerada lo suficientemente buena cuando se obtienen valores mayores que los resultados del modelo neutral. El modelo crea un nuevo mapa para ajustar

mínimamente el mapa inicial para obtener la misma composición que el mapa final. Los cambios producidos se distribuyen aleatoriamente. El esquema (Figura 12) seguido en este proceso es:

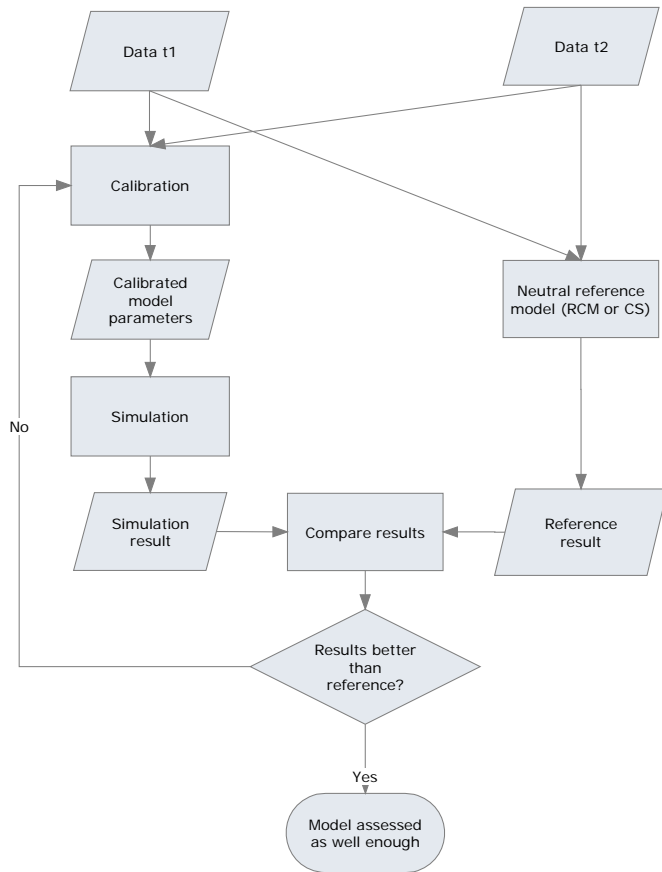


Figura 22. Esquema del procedimiento a seguir para evaluar la calidad del modelo.

Tal y como se muestra en la figura anterior, se ha partido de los mapas reales de los años 1999 (Mapa 1) y 2007 (Mapa 2). Tras la calibración se obtuvo el mapa simulado del año 2007 (Mapa 3). Por otro lado se realizó el mapa de referencia usando el método RCM (Mapa 4) integrado en *Map Comparision Kit*. Para analizar la calidad se compararon los diferentes índices Kappa entre los siguientes mapas:

Mapa 1 (real del año 1999)	Mapa 4 (de referencia)	$Kappa_{Location} = 1$
Mapa 2 (real del año 2007)	Mapa 4 (de referencia)	$Kappa_{Histo} = 1$
Mapa 2 (real del año 2007)	Mapa 4 (de referencia)	$Kappa = 0,722$
Mapa 2 (real del año 2007)	Mapa 3 (simulado 2007)	$Kappa = 0,888$

Con estos resultados obtenidos de los índices Kappa se observa que el valor de dicho índice cuando se comparó el Mapa 2 con el Mapa 3 fue mayor que el obtenido en la comparación del Mapa 2 con el Mapa 4. Estos resultados arrojaron que el modelo es válido y, por lo tanto, puede ser utilizado para realizar las simulaciones.

## 5. CONCLUSIONES

Con este estudio, la Consejería de Medioambiente de la Junta de Andalucía ha iniciado una línea de generación y análisis de escenarios futuros. El proyecto cuenta con el asesoramiento del Centro Temático de Usos de Suelo e Información Geográfica (Agencia Europea de Medioambiente) y del Instituto de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Centro Común de Investigación (Comisión Europea).

Entre los objetivos de esta línea se encuentra el desarrollo de un modelo dinámico, cuya finalidad será crear una herramienta en la que se reflejen los aspectos sociales, económicos y ambientales producidos en un horizonte temporal a 30 años. Dicha herramienta servirá de apoyo a la toma de decisiones y desarrollo de normativas, de manera que el gestor pueda tener siempre presente la incidencia de las normativas en el territorio. De este modo ayudará a centrar los esfuerzos de prevención y mitigación que contemplan los distintos planes estratégicos que rigen las actuaciones de la Consejería de Medio Ambiente.

En este estudio se ha optado por considerar los escenarios descritos en el proyecto europeo PRELUDE con la posibilidad de poder incorporar nuevas fuerzas o eliminar las existentes para adecuarlos a la Comunidad de Andalucía, así como definir nuevos escenarios considerando las fuerzas motrices que más pueden influir en el futuro de Andalucía. En este momento se está desarrollando la integración de los escenarios con las fuerzas motrices que las caracterizan y la información tanto cartográfica como estadística necesaria para Andalucía, y el análisis de la evolución a medio y largo plazo de los usos de Andalucía.

Los estudios prospectivos y en concreto, la construcción de escenarios, permiten iluminar la toma de decisiones. Asimismo se puede orientar la acción de gobierno hacia los futuros más deseables desde los puntos de vista social y ambiental. Ello confiere a este tipo de proyectos especial utilidad e interés.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los estudios de futuro no deben considerarse como un fin, sino como un medio para incentivar y fomentar la toma de decisiones estratégicas. Los escenarios son guiones que describen caminos alternativos hacia un futuro posible apoyado en hipótesis razonables. Son construcciones intelectuales que ayudan a comprender lo que puede ocurrir, no lo que va a ocurrir, ni lo que debe ocurrir, ni lo que la gente quiere que ocurra

La forma en que se distribuyan los usos del suelo será sin duda, el ámbito en el que se plasmará de manera más clara la evolución de nuestra sociedad, constituyendo un elemento de primer orden a la hora de buscar una aproximación a una situación ambiental futura lo más adecuada posible. Es ya reconocido que la elevada tasa de cambio de usos del suelo y el cambio climático constituyen actualmente los impulsores directos más importantes del Cambio Global. Ambos procesos operan simultáneamente y se retroalimentan a distintas escalas espaciales y temporales.

El poder anticipar, bajo diferentes supuestos de desarrollo socioeconómico, la evolución y la distribución de los usos del suelo en el futuro, supondría avanzar y complementar esta línea de trabajo. Es fundamental integrar las distintas áreas de conocimiento que más repercusión puedan tener en los cambios de uso de suelo en Andalucía, permitiendo visualizar con un grado importante de fiabilidad, el futuro posible referente a los cambios que se puedan producir en los usos de suelo.

El gran reto de este proyecto es anticipar el futuro y reducir la incertidumbre, en un contexto de cambio global, para la toma de decisiones de los gobernantes, tanto orientada a la gestión adaptativa como a la planificación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barredo, J. y Demicheli, L. (2003): Urban sustainability in developing countries' megacities: modelling and predicting future urban growth in Lagos. *Cities*, 20 (5): 297–310.
- Barredo, J., Kasanko, M., McCormick, N. y Lavallo C. (2003). Modelling dynamic spatial processes simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64 (3): 145–160.
- Barredo J, I; Demicheli, L, Lavallo, C; Kasanko, M; McCormick, N (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(1): 65-84.
- Batty, M. (2003). Agents, cells and cities: new representational models for simulating multi-scale urban dynamics. *CASA Working Paper*, 65: 1-40.
- Benavente, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus (Artículos)*, 6, 81-113
- EEA – European Environment Agency. (2007a). Land-use scenarios for Europe: Qualitative and quantitative analysis n a European scale (PRELUDE), *Technical report No 9/2007*. European Environment Agency, Copenhagen
- EEA – European Environment Agency. (2007b). Prospective Environmental Analysis of Land Use Development in Europe: From participatory scenarios to long-term strategies. *Amsterdam conference on the human dimensions of global environmental change*. European Environment Agency.
- Engelen G., White, R., Uljee, I. y Drazan, P. (1995). Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems, *Environmental monitoring and Assessment* 30: 203-214.
- Frankhauser, P (1998). Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, 127-145.
- Han, J., Hayashi, Y., Cao, X., y Imura H. (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 (3): 133 -141
- Hersperger, A.M. y Bürgi, M. (2007). Driving forces of landscape change in the urbanizing Limmat valley, Switzerland. En: E. Koomen, J. Stillwell, A. Bakema,. Y H. Scholten, (Ed.), *Modelling land-use change; progress and applications*. Springer, Dordrecht, pp. 45-60. [http://reports.eea.europa.eu/eea\\_report\\_2006\\_11/en](http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2006_11/en)
- IMA 2009: Consejería de Medio Ambiente (2010). *Medio Ambiente en Andalucía. Informe 2009*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. ISBN: 978-84-92807-43-7.
- Kok, K., Verburg, P. y Veldkamp, T. (2007). Integrated assessment of the land system: The future of land use. *Land Use Policy* 24 (3): 217-520.



- Kumar, A. (2003). Modelling land use land cover changes using cellular automata in a geo-spatial environment. M Sc Thesis, ITC Netherlands. [http://www.itc.nl/library/Academic\\_output/2003/MSc\\_theses\\_2003.asp](http://www.itc.nl/library/Academic_output/2003/MSc_theses_2003.asp).
- Moreira J.M. (2006). *Guía técnica del Mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de Andalucía Escala 1:25.000*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Moreira Madueño, J.M. (2007): *Mapa de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo de Andalucía, Escala 1:25.000*. Guía Técnica. Junta de Andalucía. 208 pp.
- Parker, D., Manson, S., Janssen, M., Hoffmann, M. y Deadman, P. (2003). Multi-agents systems for the simulation of land-use and land-cover change. *Annals of the Association of American Geographers*, 93 (2): 314-337.
- Petrov, L., Lavalle, C., y Kasanko, M. (2009). Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 92 (1): 10-23.
- Phillips, S. J., Dudik, M. y Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proc. of the 21st International Conference on Machine Learning*, Banff, Canada, 2004.
- RIKS BV (2005a). *METRONAMICA - a dynamic spatial land use model*. RIKS, Maastricht, The Netherlands, 17 pp.
- RIKS BV (2005b). *PRELUDE. Quantification and spatial modelling of land use/land cover changes*. RISK. Maastricht, The Netherlands, 218 pp.
- RIKS BV (2007). *METRONAMICA. Model description*. RISK, Maastricht, The Netherlands, 70 pp.
- Turner, B.L., Moss, R.H. and Skole, D.L. (1993) Relating land-use and global land-cover change: A proposal for an IGBP-HDP core project. Report from the IGBP-HDP Working Group on Land- Use/Land-Cover Change. *Joint publication of the International Geosphere-Biosphere Programme (Report No. 24) and the Human Dimensions of Global Environmental Change Programme (Report No. 5)*. Stockholm: Royal Swedish Academy of Sciences.
- Torrens, P M. (2000). How cellular models of urban systems work. *CASA working paper series*, nº 28.
- Uljee, I., Van Delden, H., Luja, P., Van der Meulen, M., Hagen, A., Hurkens, J., y Engelen, G. (2006). *METRONAMICA User manual*. RISK, Maastricht, The Netherlands. 132 pp.
- Van Delden, H. y G. Engelen (2005), Combining participatory approaches and modelling: lessons from two practical cases of policy support. In: A. Voinov, A.J. Jakeman, y A.E. Rizzoli, (ed). *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software"*. International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA.
- Van Delden, H., J. C. Escudero, Uljee, I. y Engelen, G. (2005). METRONAMICA: A dynamic spatial land use model applied to Vitoria-Gasteiz. *Virtual Seminar of the MILES Project*. Centro de Estudios Ambientales, Vitoria-Gasteiz.

Van Delden, H., Hurkens, J., Vanhout, L., Luján, P., Shi Y., Muhammad, S., Van Vliet, J., Hagen, A., Ketz P., Stuczynski, T., Lopatka, A., Siebillec, R., Fudenko, R., Korzeniowska-Puculek, R., Ciaaina, P., Paracchini, M.L., Calvo, S. y Gómez, O. (2008). *Dynamic land use change modelling for cap. LUMOCAP. Impact Assessment on the rural landscape*. Comisión Europea.

Verburg, P.H., Schot, P., Dijst, M., y Veldkamp, A. (2004): Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geojournal* 61(4): 309-324.

White, R; Engelen, G; Uljee, I (1997). The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3): 323-343.

Wolfram, S (1984). Cellular Automata as model of Complexity. *Nature*, 311, 419- 424.

Wollenberg, E., Edmunds, D. y Buck, L. (2001). *Escenarios como instrumento para el manejo forestal adaptable*. Center for international forestry research, Bolivia, 44 pp.