

# Investigación

Sastre, P., de Lucio, J.V. y Martínez, C. 2002. *Modelos de conectividad del paisaje a distintas escalas. Ejemplos de aplicación en la Comunidad de Madrid. Ecosistemas 2002/2* (URL: <http://www.aet.org/ecosistemas/022/investigacion5.htm>)

## ***Modelos de conectividad del paisaje a distintas escalas. Ejemplos de aplicación en la Comunidad de Madrid***

**Pablo Sastre, José Vicente de Lucio y Carlota Martínez**

**Dpto. Interuniversitario de Ecología, Sección de Alcalá, Edificio de Ciencias, Universidad de Alcalá, 28871 Alcalá de Henares.**

*Los cambios en el paisaje de la Comunidad de Madrid pueden afectar en gran medida a la capacidad de dispersión de las especies, amenazando la conservación de la integridad ecológica y la conectividad funcional de la red de espacios naturales. Los elementos lineales del paisaje tienen un papel fundamental en la conectividad por sus funciones de corredor y de barrera. Sin embargo, pasan desapercibidos a las escalas normales de planificación territorial. En este trabajo presentamos el desarrollo de modelos de conectividad para analizar el efecto de distintos escenarios de desarrollo urbanístico sobre la conectividad de la Red Natura 2000 en la Comunidad de Madrid. En estos modelos incorporamos el efecto de los elementos lineales del paisaje, tanto barreras (carreteras) como corredores (ríos, setos), a escalas de mayor detalle. Los modelos de conectividad proporcionan mapas y medidas de la permeabilidad del paisaje que tienen una aplicación directa en la designación de corredores y redes de conservación.*

### **Introducción**

Los cambios de uso del suelo pueden afectar en gran medida a la capacidad de dispersión de las especies, dando lugar a procesos de fragmentación de las poblaciones y los consiguientes problemas para su conservación. El mantenimiento de la conectividad ecológica en el territorio se ha ido perfilando como un objetivo de las políticas de conservación de la naturaleza. Los conjuntos de espacios naturales protegidos tienden en la actualidad a constituirse legalmente como redes de conservación (Múgica *et al.*, 2002). La conservación de la conectividad y la integridad ecológica de la red de espacios naturales Natura 2000 es, además, un requisito legal impuesto por la Directiva europea de Hábitats (1992).

En la Comunidad de Madrid los espacios naturales legalmente protegidos y los Lugares de Importancia Comunitaria (LICs), estos últimos seleccionados por contener hábitats y especies recogidos en la Directiva 92/43, comprenden alrededor del 40% del territorio (CIAM 1997). Siguiendo las indicaciones de la Directiva, el procedimiento de identificación de estos lugares ya contó con un criterio de conectividad física que aseguraba una continuidad espacial (de Lucio *et al.*, 1997). Sin embargo, no existen estudios acerca de la conectividad funcional proporcionada por este conjunto de espacios ni sobre la influencia de los intensos procesos actuales de cambios de uso del suelo que se están dando en este territorio.

La aplicación de modelos de conectividad para el estudio de los procesos ecológicos y la dispersión de las especies constituye una herramienta innovadora de gran utilidad para la planificación y gestión de los recursos naturales. Los modelos de conectividad producen imágenes gráficas de la permeabilidad del

paisaje en función de la distancia máxima de dispersión y de la permeabilidad de los distintos tipos de uso del suelo (resistencia al paso de los organismos o de las especies), y permiten determinar la accesibilidad de un fragmento de hábitat o de cualquier punto del territorio (Villalba *et al.*, 1998; With, 1997; Gustafson y Gardner, 1996; With y Crist, 1995; Ims, 1995).

Los elementos lineales del paisaje tienen un papel fundamental en la calidad del paisaje y en el mantenimiento de la conectividad, ejerciendo funciones de corredor (Anderson y Danielson, 1997; Burel y Baudry, 1995; Haas, 1995) y de barrera (Reed *et al.*, 1996). Sin embargo, la planificación territorial y la conservación de la naturaleza suelen realizarse a determinadas escalas a las que estos elementos pasan desapercibidos (Sastre, 1999; Sastre y de Lucio, 1998).

El objetivo general de nuestro trabajo es el desarrollo de modelos para analizar los posibles efectos de los cambios de uso del suelo sobre la conectividad ecológica en la Comunidad de Madrid. Se consideran para ello varios escenarios tales como la implantación de la Red Natura 2000, la expansión urbanística prevista en los planes territoriales, junto con otros observables a escala de mayor detalle, por ejemplo la construcción de infraestructuras viarias y la implantación o eliminación de líneas de vegetación.

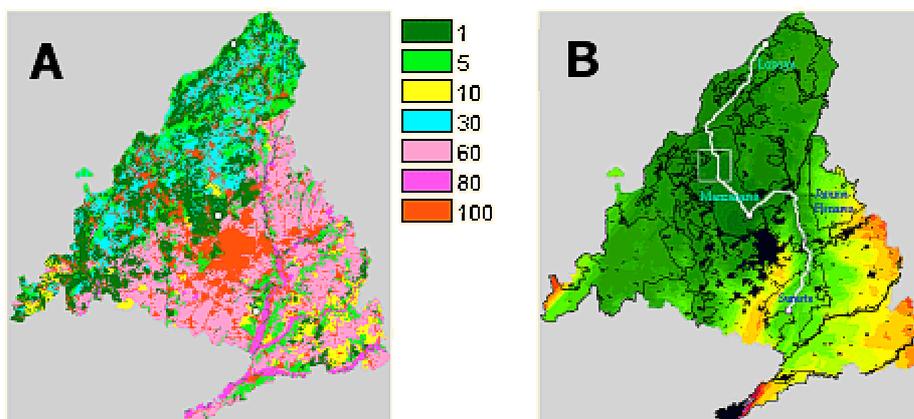
Se muestran a continuación tres ejemplos del procedimiento seguido para desarrollar un modelo de conectividad aplicado a la red de espacios naturales protegidos de la Comunidad de Madrid, modelizar el efecto de distintos escenarios de cambios de uso del suelo (desarrollo urbanístico) e incorporar en los modelos de conectividad el efecto de los elementos lineales del paisaje, tanto barreras (carreteras) como corredores (ríos, setos).

## **Conectividad entre los espacios naturales de la Red Natura 2000**

Los modelos de conectividad proporcionan mapas de distancias de coste que representan el esfuerzo o la dificultad que supone para una especie alcanzar cada punto del territorio desde los puntos de origen. A partir de estos mapas de conectividad pueden calcularse las rutas de mínimo coste entre los puntos de origen, rutas que tienen una aplicación directa para el diseño de redes y corredores ecológicos (Barrio *et al.*, 1998; Bielsa, 1996; Pearson *et al.*, 1996; Brown y Veitch, 1995).

Entre las especies que son objeto de medidas de conservación en la Comunidad de Madrid, el grupo de especies asociadas a los hábitats forestales es uno de los más numerosos, incluyendo insectos (p.ej. el lepidóptero *Coscinia romeii*), reptiles (p.ej. la culebra de herradura *Coluber hippocrepis*), aves (p.ej. el trepador azul, *Sitta europaea*) y mamíferos (p.ej. el gato montés, *Felis sylvestris*). Aunque cada especie tiene sus propias características, requerimientos ecológicos y capacidad de dispersión, es útil el hacer una evaluación general del grupo y definir los parámetros del modelo de conectividad para una especie forestal 'tipo'.

Los valores de fricción o resistencia al desplazamiento representan el coste o la dificultad que supone para una especie desplazarse por los distintos tipos de hábitat. Por ejemplo, para una especie forestal los hábitats forestales tienen baja resistencia y los espacios abiertos tienen alta resistencia. En la **Figura 1A** se muestra el mapa de resistencia al desplazamiento para una especie forestal 'tipo' obtenido a partir del mapa de vegetación y usos del suelo (**Tabla 1**). Los valores de resistencia se han asignado a cada categoría del mapa en función de la información bibliográfica existente sobre las especies (referencias). El coste de desplazamiento a través de un píxel de 100 x 100 m es igual a 1 unidad en los hábitats forestales, mientras que en las barreras (zonas urbanas, embalses) el desplazamiento tiene un coste de 100 unidades por cada píxel.



**Figura 1.-** A) Mapa de resistencias (costes de desplazamiento) para el caso de especies forestales, obtenido a partir del mapa de vegetación y usos del suelo. B) Mapa de distancias de coste a partir del punto de origen de Manzanares. Se muestran las rutas de mínimo coste a los puntos de destino de Lozoya y Sureste (líneas blancas), sobre el mapa de Lugares incluidos en la Red Natura 2000.

Como punto de origen para analizar la conectividad entre los LICs de la Red Natura 2000 (CIAM, 1997) (Alberche-Cofio, Guadarrama, Manzanares, Guadalix, Lozoya, Jarama-Henares y Sureste) se ha seleccionado el centro de la mayor mancha de hábitat forestal presente en cada uno de ellos. En la **Figura 1B** se muestra el mapa de distancias de coste obtenido desde el punto de origen en el Monte de El Pardo (LIC Manzanares), indicando también dos puntos de destino en los LIC Lozoya y Sureste, y la trayectoria de la ruta de mínimo coste a estos puntos. Se observa la importancia de los espacios incluidos en la red Natura 2000 para la conectividad desde el Monte de El Pardo hacia el norte (Manzanares, Lozoya) y hacia el Sureste (Manzanares, Jarama-Henares, Sureste). La ruta de mínimo coste entre los LICs Manzanares y Sureste coincide en gran parte de su trazado con el río Jarama.

**Tabla 1.-** Valores de resistencia (costes de desplazamiento) asignados a las categorías del mapa de vegetación y usos del suelo para el caso de una especie forestal tipo. Se indica la superficie aproximada de cada categoría existente en la Comunidad de Madrid.

Tipos de vegetación y usos	Resistencia	Superficie (ha)
Regadío	80	32.688
Secano	60	225.274
Embalse	100	5.393
Enebral, sabinar	1	4.815
Froncosa caduc.	1	36.258

Frondosa perenn.	1	83.306
Matorral	5	102.687
Mosaicos	10	39.004
Pastizal	30	71.546
Pinar	1	65.977
Roquedo	30	15.582
Urbano, industrial	100	82.588

## Efecto de la expansión urbanística sobre la conectividad

La expansión urbanística y los cambios en la política agraria son las principales causas de los cambios de uso del suelo que se observan en la Comunidad de Madrid. El estudio de estos cambios y sus posibles efectos sobre los procesos ecológicos resulta imprescindible para la evaluación de impacto ambiental y la planificación del territorio (Atauri *et al.*, 2000; Zárate *et al.*, 1994; Bird *et al.*, 1994; Harms *et al.*, 1991).

Para diseñar posibles escenarios de expansión urbanística es necesario tener en cuenta que el desarrollo urbanístico está limitado por una serie de factores, tanto físicos (p.ej. pendientes altas) como administrativos (p.ej. espacios protegidos). También pueden considerarse los diferentes planes de ordenación urbana donde se califica el suelo.

Se considera a continuación un modelo hipotético de expansión limitado exclusivamente por condicionantes geográficos básicos. Actualmente el desarrollo urbanístico de la Comunidad de Madrid puede considerarse restringido en las zonas situadas a más de 1.200 metros de altitud o con pendiente superior al 20%, en las vías pecuarias, en el dominio público de los cursos fluviales y en los espacios incluidos en la Red Natura 2000.

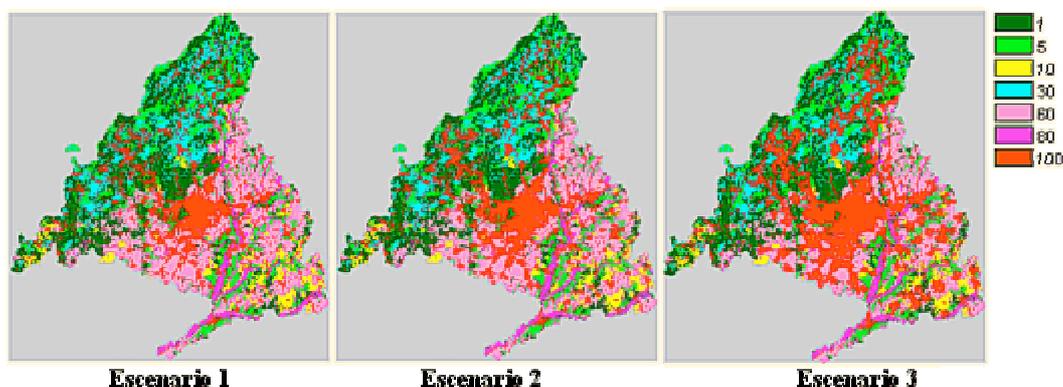
La expansión urbanística tiene lugar a partir de los núcleos urbanos actuales, no siendo previsible la construcción de nuevas urbanizaciones alejadas de ellos. Los diferentes escenarios pueden representarse variando la distancia máxima de expansión. Esta distancia se mide siempre a través de zonas no incluidas en el mapa final de restricciones, por lo que no siempre es en línea recta desde los núcleos urbanos actuales.

Las vías de comunicación pueden favorecer en gran medida el desarrollo urbanístico. Por ello en cada escenario la distancia máxima de expansión es mayor a lo largo de las carreteras (**Tabla 2**). Por ejemplo, en el Escenario 1 se considera una distancia máxima de 200 metros a partir de los núcleos urbanos actuales, pero esta distancia máxima se amplía hasta 500 metros en aquellas zonas situadas a menos de 200 metros de una carretera.

**Tabla 2.-** Escenarios de expansión urbanística a partir de los núcleos urbanos actuales. En cada escenario, la distancia máxima utilizada se amplía en zonas cercanas a las carreteras.

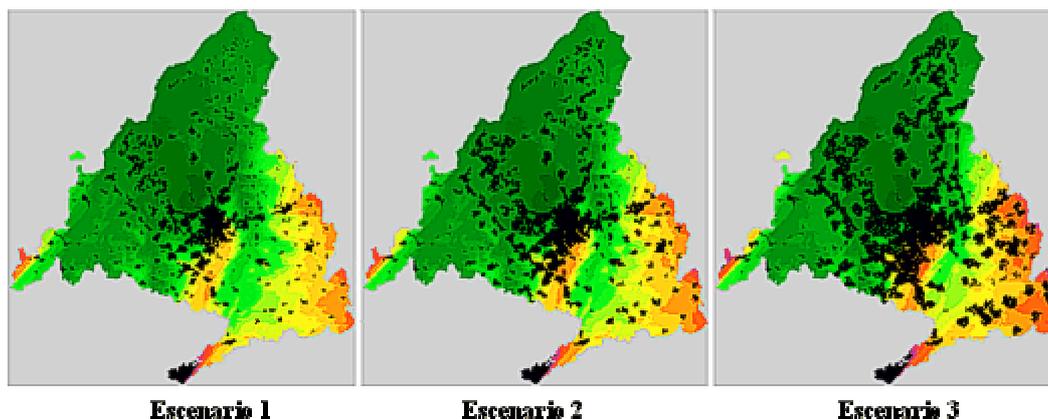
	Distancia máxima a núcleos urbanos (metros)	Superficie de expansión (ha)	% respecto a la superficie actual
Actual	-	-	0
Escenario 1	200 m (500 m si carretera < 200 m)	21.104	40 %
Escenario 2	500 m (1000 m si carretera < 500 m)	64.742	120 %
Escenario 3	1000 m (2000 m si carretera < 1000 m)	140.868	270 %

Al introducir los escenarios de expansión urbanística en los modelos de conectividad se producen cambios en los mapas de resistencia debido al aumento de zonas urbanas en detrimento de otras categorías más permeables (**Figura 2**). Se observa que algunos núcleos urbanos tienen su crecimiento muy limitado por las restricciones impuestas en el diseño de los escenarios. Sin embargo, en el conjunto de la Comunidad de Madrid, las restricciones no impiden una gran expansión urbanística. La superficie de expansión de cada escenario se recoge en la **Tabla 2**.



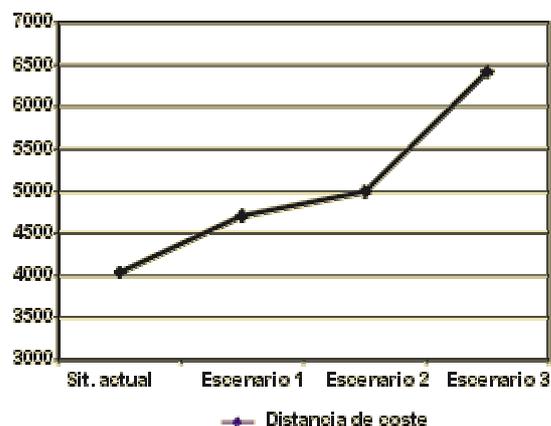
**Figura 2.-** Mapas de resistencias (para el caso de especies forestales) correspondientes a posibles escenarios de expansión urbanística a partir de los núcleos urbanos actuales. Respecto a la superficie urbana actual, los escenarios representan expansiones de aproximadamente 40% (Escenario 1), 120% (Escenario 2) y 270% (Escenario 3).

Los efectos de la expansión urbanística se reflejan en los mapas resultantes de los modelos de conectividad (**Figura 3**). El aumento de las distancias de coste (reducción de la conectividad) se observa en muchas zonas, por ejemplo en la conexión Manzanares-Sureste a lo largo del río Jarama.



**Figura 3.-** Mapas de distancias de costa a partir del punto de origen de Manzanares resultantes de aplicar los modelos de conectividad a los distintos escenarios de expansión urbanística.

La reducción de la conectividad del paisaje por efecto de la expansión urbanística también puede mostrarse mediante medidas numéricas (Barrio *et al.*, 1998; Schumaker, 1996). Por ejemplo, la distancia de costa mínima entre dos puntos es un parámetro que permite evaluar cuantitativamente los efectos de los cambios de uso del suelo sobre la conectividad. Entre los puntos de origen situados en Manzanares y Sureste se observan cambios en esta medida al introducir los escenarios de expansión urbanística (**Figura 4**).

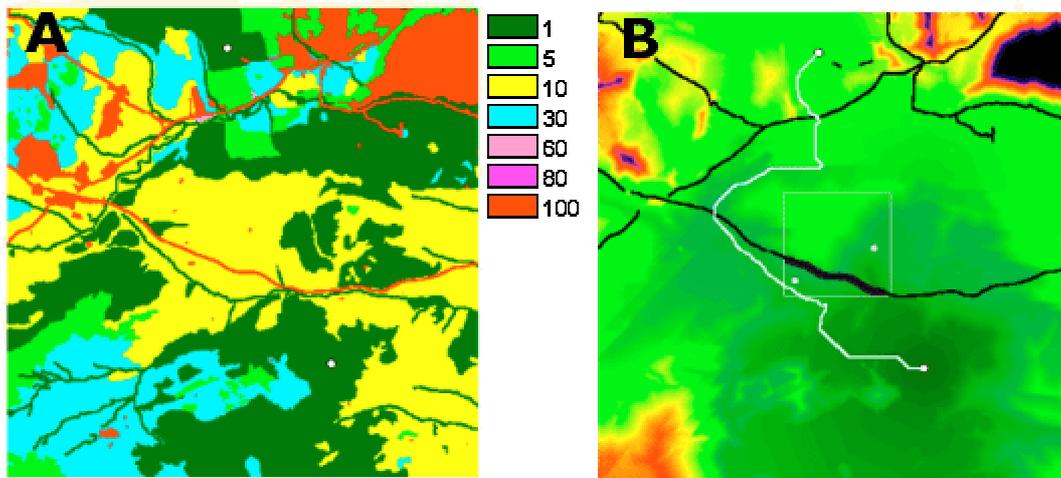


**Figura 4.-** Efecto de la expansión urbanística (escenarios 1, 2 y 3) sobre la conectividad entre los puntos de origen de Manzanares y Sureste (distancia mínima de costa).

## Incorporación del papel de las barreras y los corredores lineales a distintas escalas

La información referente a los elementos lineales del paisaje requiere el uso de escalas espaciales detalladas. En este caso se han realizado dos ensayos diferentes, considerando distintas escalas de trabajo, zonas de estudio y tipos de elementos lineales.

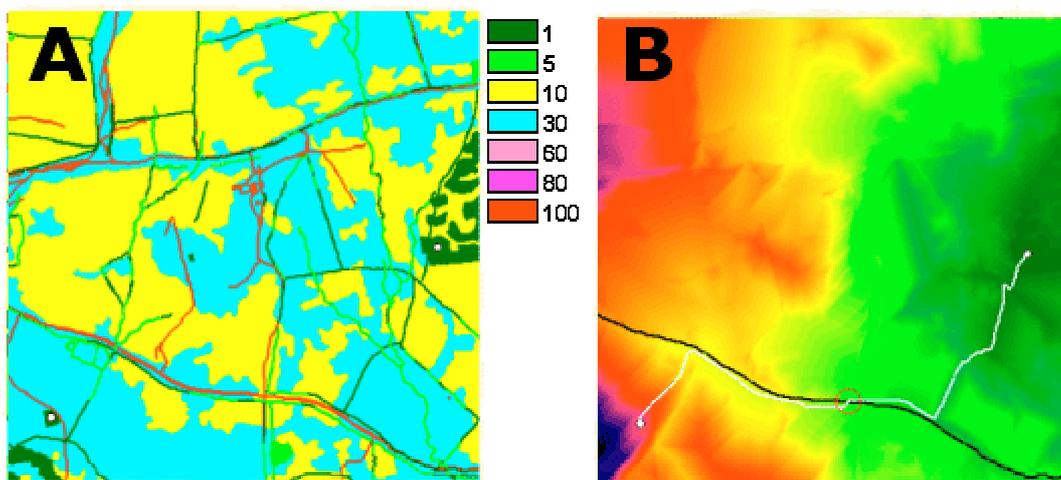
La incorporación de ríos y carreteras se ha realizado a una escala intermedia, en una zona de 10 x 10 km, a partir de fotos aéreas a escala 1:18.000. La zona corresponde a una cuadrícula UTM (30TVL20) situada en la ruta de mínimo coste entre los puntos de origen de Manzanares y Lozoya (cuadro indicado en la **Figura 1B**). En esta zona existen carreteras con dirección este-oeste que dificultan la conectividad entre las manchas de hábitat forestal situadas al norte y al sur de la zona (**Figura 5A**).



**Figura 5.-** Modelo de conectividad a escala intermedia con incorporación de ríos y carreteras en una zona de 10 x 10 km (UTM 30TVL20). **A)** Mapa de resistencias obtenido a partir de fotografías aéreas escala 1:18.000 y puntos de origen (puntos blancos). **B)** Mapa de distancias de coste desde el punto de origen situado al sur de la zona y ruta de mínimo coste hasta el punto situado al norte (línea blanca).

Para incorporar las barreras y corredores lineales en los modelos de conectividad (Villalba *et al.*, 1998; Schippers *et al.*, 1996) es necesario asignar un valor de resistencia a cada tipo de elemento lineal. En este caso se han asignado a los ríos y a las carreteras valores de resistencia iguales a 1 y a 100 unidades, respectivamente. En la **Figura 5B** se muestran los mapas de conectividad resultantes y las rutas de mínimo coste. Se observa que los ríos pueden tener un importante papel como corredores, condicionando la trayectoria de las rutas de mínimo coste.

A una escala más detallada se ha incorporado información referente a riberas, arroyos, setos y tapias, a partir de fotos aéreas a escala 1:6.500. Este análisis se ha realizado en una zona de 2 x 2 km, situada en torno a la ruta de mínimo coste resultante del anterior análisis a escala intermedia (cuadro indicado en la **Figura 5B**), y que se encuentra atravesada por una carretera (**Figura 6A**). Se ha seleccionado un punto de origen a cada lado de esta carretera, con el fin de evaluar si el punto de cruce de la carretera está influido por la distribución espacial de los corredores lineales.



**Figura 6.-** Modelo de conectividad a escala detallada con incorporación de riberas, arroyos, setos y tapias en una zona de 2 x 2 km (cuadro de situación en la **Figura 5B**). **A)** Mapa de resistencias obtenido a partir de fotografías aéreas escala 1:6.500 y puntos de origen (puntos blancos). **B)** Mapa de distancias de coste y ruta de mínimo coste entre los puntos situados a cada lado de la carretera

(línea blanca).

Los valores de resistencias asignados a los elementos lineales en este caso han sido: 100 unidades para las carreteras y pistas, 1 unidad para los setos y las riberas y 5 unidades para las tapias de piedra y los arroyos sin ribera. En la Figura 6B se muestran los mapas de conectividad resultantes y las rutas de mínimo coste. Se observa que los setos entre parcelas o adyacentes a las carreteras pueden tener un importante papel en la conectividad, condicionando la trayectoria de las rutas de mínimo coste y el punto de cruce con la carretera (circulo rojo señalado en la Figura 6B).

## Conclusiones

Los resultados de este trabajo, mediante un conjunto de escenarios hipotéticos de cambio de uso del suelo modelizados con sistemas de información geográfica, sugieren distintas consecuencias para la conectividad entre los espacios naturales de la Comunidad de Madrid. Algunas de los escenarios estudiados amenazan la coherencia de la red de espacios naturales protegidos, hoy todavía factible, comprometiendo la implantación de la Red Natura 2000.

La conectividad del paisaje depende no sólo de las especies consideradas y los criterios de asignación de valores de resistencia, sino también de la escala espacial de análisis y de las fuentes de información utilizadas (tipos de elementos del paisaje cartografiados). El uso de fuentes de información a escalas detalladas es necesario para incluir la función de los elementos lineales del paisaje, los cuales pueden determinar en gran medida las trayectorias de mínimo coste.

Los modelos de conectividad tienen aplicaciones directas para la designación de corredores y redes de conservación y para la identificación de áreas particularmente relevantes para el mantenimiento de la funcionalidad territorial. En este sentido, la consideración del importante papel de los corredores lineales puede contribuir a la valoración y conservación de estos elementos. Los resultados de este trabajo nos animan a alimentar los modelos con los datos reales de los distintos planes y programas previstos para la Comunidad de Madrid en los próximos años.

## Referencias

- Anderson, G.S. y Danielson, B.J. 1997. The effects of landscape composition and physiognomy on metapopulation size: the role of corridors. *Landscape Ecology* 12: 261-271.
- Atauri, J.A., Múgica, M., Ramírez-Sanz, L. y de Lucio, J.V. 2000. Assessment of nature conservation scenarios: species or landscape structure? A case study in the Madrid region. En Jongman, R. y Mander, U. (eds.). *Landscape Perspectives of Land Use Changes*, Pp. 167-190, International Series on Advances in Ecological Sciences 6, Wessex Institute.
- Barrio, G. del, Moral, R.G., Simón, J.C., Sánchez, E. y Cuadrado, A. 1998. *Identificación, delimitación y análisis de los elementos del paisaje necesarios para mejorar la coherencia de la Red Natura 2000. Región Alpina Española. Directiva Hábitats 92/43/CEE*. Asesores Técnicos de Medio Ambiente (ATECMA), S.L., Madrid.
- Bielsa, I. 1996. *Designing Ecological Networks at Regional Scale with GIS. A case study in the Ebro Basin (NE Spain)*. M.Sc.Thesis. Wageningen University, The Netherlands.

Bird, C., Peccol, E., Taylor, J., Brewer, T. y Keech, M. 1994. Monitoring landscape change - the role for GIS. *Landscape Research* 19: 120-127.

Brown, N.J. y Veitch, N. 1995. GIS, landcover and the identification of corridor location in England. En Hill, M.O. et al. (eds.). *The role of corridors, stepping stones and islands for species conservation in a changing climate*. Pp. English Nature Research Report 75.

Burel, F. y Baudry, J. 1995. Species biodiversity in changing agricultural landscapes: a case study in the Pays d'Auge, France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 55: 193-200.

CIAM. 1997. *Propuesta de lugares de interés para la conservación de la naturaleza en la Comunidad de Madrid: Red Natura 2000*. Centro de Investigaciones Ambientales de la Comunidad de Madrid "Fernando González Bernáldez". Madrid.

de Lucio, J.V., Ramírez, L., Sastre, P., Martínez, R., Cuevas, J.A., Alcaide, T. y Fernández, L. 1997. *Metodología de Evaluación multiobjetivo/multicriterio para el apoyo a la toma de decisiones en la selección de zonas especiales de conservación (Natura 2000) en la Comunidad de Madrid*. Serie Documentos N° 25, Centro de Investigaciones Ambientales de la Comunidad de Madrid "Fernando González Bernáldez". Madrid.

Gustafson, E.J. y Gardner, R.H. 1996. The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization. *Ecology* 77: 94-107.

Haas, C.A. 1995. Dispersal and use of corridors by birds in wooded patches on an agricultural landscape. *Conservation Biology* 9: 939-942.

Harms, W.B., Knaapen, J.P. y Rademakers, J.G.M. 1991. Landscape planning for nature restoration: Comparing regional scenarios. En Vos, C. y Opdam, P. (eds.). *Landscape ecology and management of a landscape under stress*.

Ims, R.A. 1995. Movement patterns related to spatial structures. En Hansson, L., Fahrig, L. y Merriam, G. (eds.), *Mosaic landscapes and ecological processes* Chapman & Hall.

Música, M., de Lucio, J.V., Martínez, C., Sastre, P., Atauri, J.A. y Montes, C. 2002. *Análisis de sistemas de coordinación territorial de espacios naturales protegidos*. EUROPARC-España, Fundación Fernando González Bernáldez, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. En prensa.

Música, M., Martínez, R. y Sastre Olmos, P. 1996. *Biogeographic Pilot Studies for the Assessment of State and Trends of Europe's Biodiversity. West Mediterranean Region*. European Centre for Nature Conservation (ECNC).

Pearson, S.M., Turner, M.G., Gardner, R.H. y O'Neill, R.V. 1996. An organism-based perspective of habitat fragmentation. En Szaro, R.C y Johnston, D.W. (eds.). *Biodiversity in managed landscapes. Theory and practice*. Oxford University Press.

Ramírez Sanz, L., Alcaide, M.T., Cuevas, J.A., Guillén, D.F. y Sastre Olmos, P. 2000. A methodology for environmental planning in Protected Natural Areas. *Journal of Environmental Planning and Management* 43: 785-798.

Reed, R.A., Johnson-Barnard, J. y Baker, W.L. 1996. Contribution of roads to forest fragmentation in the Rocky Mountains. *Conservation Biology* 10: 1098-1106.

Sastre Olmos, P. 1999. *Efecto de la escala en la estructura espacial de los elementos lineales y el mosaico del paisaje*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid.

Sastre Olmos, P. y de Lucio, J.V. 1998. Detecting and measuring landscape linear elements at different scales. En Dover, J.W. & Bunce, R.G.H. (eds.). *Key concepts in landscape ecology*. IALE (UK), Preston.

Schippers, P., Verboom, J., Knaapen, J.P. y van Apeldoorn, R.C. 1996. Dispersal and habitat connectivity in complex heterogeneous landscapes: an analysis with a GIS-based random walk model. *Ecography* 19: 97-106.

Schumaker, N. H. 1996. Using Landscape Indices to Predict Habitat Connectivity. *Ecology* 77:1210-1225.

Villalba, S, Gulinck, H., Verbeylen, G. y Matthysen, E. 1998. Relationship between patch connectivity and the occurrence of the European red squirrel, *Sciurus vulgaris*, in forest fragments within heterogeneous landscapes. En Dover, J.W. & Bunce, R.G.H. (eds.). *Key concepts in landscape ecology*. IALE (UK), Preston.

With, K.A. 1997. The application of neutral landscape models in conservation biology. *Conservation Biology* 11: 1069-1080.

With, K.A. y Crist, T.O. 1995. Critical thresholds in species' response to landscape structure. *Ecology* 76: 2446-2459.

Zárate, A., Ojeda, L., Rebollo, J.C., Pérez, M.P. y De Pablo, C.L. 1994. Homogeneización y fragmentación del paisaje de Madrid. *II Congreso de Ciencia del Paisaje "Paisaje y Medio Ambiente"*, Barcelona.