

EL USO DE LA MODELIZACIÓN ESPACIAL PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO. EL PROYECTO CARTOBIO: CARTOGRAFÍA DE ESPECIES DE CONSERVACIÓN PRIORITARIA DE CATALUÑA

Brotons, L.¹, Pla, M.¹, Villero, D.¹, Ruíz-Olmo, J.² y Camps, D.²

¹ Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. Crta. Sant Llorenç km. 2, 25280 Solsona, magda.pla@ctfc.cat

² Servei de Protecció de Fauna, Flora y Animals de Companyia. Departament de Medi Ambient y Habitatge, Generalitat de Catalunya). Dr. Roux 80, 08017 Barcelona.

Palabras clave: Modelización, adecuación del hábitat, SIG, conservación, Cataluña.

RESUMEN

El proyecto CARTOBIO surge ante la necesidad del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda de Cataluña de disponer de cartografía de las especies con un valor de conservación prioritario en su ámbito de responsabilidad. El objetivo principal del proyecto es recopilar la información existente sobre la presencia de estas especies y obtener cartografía continua de alta resolución para dar soporte a las tareas habituales de planificación y gestión del territorio en las que se requiera información espacial sobre su distribución.

La información de base es muy diversa: el tipo de datos (hojas de cálculo, bases de datos, mapas), los ámbitos geográficos, resoluciones espaciales (coordenadas UTM exactas, a nivel de cuadrícula UTM de 1km o 10km), tipos de muestreos, etc.

Las variables ambientales se generan a partir de cartografía de referencia. El proceso de generación se compone de distintos grados de complejidad, por ejemplo: algunas variables se derivan directamente de información existente (atlas climático digital, modelo digital de elevaciones, etc.), otras necesitan un proceso de elaboración más complejo (cálculo de la proporción de un tipo de hábitat en distintos radios de influencia, variables procedentes de sensores remotos, variables de influencia humana, etc.). Se han generado variables ambientales en distintas resoluciones, todas con un mismo ámbito geográfico marco, un origen de malla común y se ha estructurado una base de datos espaciales para su almacenaje.

A partir de la información de base con presencias de las especies, de las variables ambientales y del conocimiento experto, se aplican distintas técnicas de modelización para obtener un mapa cuantitativo de adecuación del hábitat.

En algunos casos a partir de los mapas cuantitativos de adecuación del hábitat es necesario ir más allá ofreciendo al gestor un mapa cualitativo con las áreas de interés para cada especie. Para ello se ha implementado una metodología objetiva siguiendo criterios ecológicos para obtener un mapa de zonas de interés con distintos grados de importancia para la conservación de las especies. Ésta información está resultando muy útil para la gestión patrimonio natural.

En los dos primeros años del proyecto se han generado distintos tipos de productos finales: mapas de adecuación del hábitat con sus metadatos completos y una ficha adjunta con la información necesaria para facilitar al gestor su interpretación, productos derivados de los modelos como los mapas de las zonas de especial interés para las especies, documentos de discusión (i.e. documentos con el análisis de escenarios dinámicos para especies en expansión) y documentos con propuestas metodológicas. En la presente comunicación se describe el desarrollo de un sistema de información para la modelización especies de conservación prioritaria y la generación de productos derivados que faciliten su interpretación para ser incorporados con facilidad a los diferentes procesos de decisión relacionados con el patrimonio natural.

1 Antecedentes

La recopilación y homogeneización de información sobre la distribución geográfica de especies prioritarias para la conservación es un elemento clave al mismo tiempo de plantear las estrategias para su conservación y gestión adecuadas [1, 2, 3].

Un ejemplo de la importancia de la estructuración de la información cartográfica en los procesos de planificación y gestión de la biodiversidad en Cataluña es la de la Cartografía de Especies de Conservación Prioritaria de Cataluña (CECP), promovida por el Departamento de Medio Ambiente y Vivienda, pretende recopilar y homogeneizar la información existente sobre la distribución de determinadas especies de fauna y flora en este ámbito territorial.

Este proyecto es fruto de la colaboración entre el Servicio de Planificación y Gestión del Entorno Natural y el Servicio de Protección de la Fauna, Flora y Animales de Compañía.

Tradicionalmente, la cartografía de la biodiversidad ha consistido principalmente en la delimitación de áreas de distribución o en la representación de citaciones sobre una malla UTM (10 Km o 1 Km). A efectos prácticos, esto se ha traducido en una gran heterogeneidad cartográfica, donde la casuística de cada especie ha condicionado la obtención de una cartografía carente de una evaluación objetiva de su fiabilidad y, en especial, que ofrece dificultades para integrar la información de diferentes especies, necesaria para afrontar los retos de la gestión y conservación de la biodiversidad con una perspectiva territorial amplia [4, 5].

En este contexto, la generalización de los sistemas de información geográfica y el desarrollo de métodos estadísticos para modelizar la distribución de las especies ha supuesto un gran avance para la cartografía de la biodiversidad. Estos métodos permiten extrapolar las relaciones existentes entre observaciones realizadas al campo (datos de presencia, presencia/ausencia o abundancia) y variables ambientales a todo el ámbito geográfico estudiado, el que permite identificar las zonas más idóneas para la especie y, por lo tanto, donde la probabilidad que la especie sea (aunque no se haya detectado) más elevada. Este proceso es el que se nombra modelización del hábitat [1, 6, 7].

Los modelos de hábitat tienen como objetivo estimar el hábitat utilizado por una especie a partir de su caracterización mediante variables ambientales que permiten su representación espacial. Existen ejemplos del uso de los modelos predictivos como herramienta de soporte para la conservación de la biodiversidad y la gestión y planificación del medio natural en Australia desde aproximadamente el año 2000 [8]; y en USA también utilizan la modelización espacial para generar mapas de la dinámica de los recursos biológicos de cara a hacer frente a las amenazas de las especies invasoras [9].

En nuestro país existen ya algunos ejemplos de aplicación de modelos de hábitat a algunos componentes de la biodiversidad, sobresaliendo entre ellos los ejercicios de modelización realizados en el marco del Atlas de las Aves Nidificantes de Cataluña [10].

Otro ejemplo, en tal caso aplicado a la planificación territorial, es el Sistema de Información Territorial de la Red de Espacios Libres (SITxell), promovido por la Diputación de Barcelona con la finalidad de establecer una base cartográfica y alfanumérica, que ayude a estudiar, analizar, valorar y planificar los espacios libres [11]. El SITxell dispone de un módulo de fauna y conectividad, que promueve el desarrollo de cartografía de grupos faunísticos con la finalidad de evaluar el valor de conservación del territorio, y que, al mismo tiempo sirve de base para el análisis de la conectividad del territorio [12]. En definitiva, la aplicación de estas metodologías en Cataluña se encuentra en una fase incipiente. Así pues, el presente proyecto pretende aprovechar la información existente y las metodologías de modelización de hábitat para obtener una cartografía de base de las especies de conservación prioritaria.

2 Objetivos

El objetivo general del proyecto CARTOBIO es dar respuesta a las necesidades del *Departament de Medi Ambient i Habitatge* en el campo de la cartografía específica para la conservación de especies amenazadas o de interés especial o para la resolución de conflictos específicos con la actividad humana. A lo largo del año 2007, al tratarse del primero año del proyecto, además de la generación de cartografía de especies, se realizó un esfuerzo especial para el desarrollo conceptual y metodológico del proyecto. A lo largo del 2008, se han aplicado las bases metodológicas y conceptuales para continuar generando mapas de distribución de distintas especies de vertebrados y también de artrópodos, consolidando la metodología definida pero también adaptándola a las necesidades que se van planteando en función de los objetivos de cada una de las especies. Desde el inicio del proyecto los principales objetivos planteados son:

- Caracterización y homogeneización de la información de base de las especies de especial interés para el *Departament de Medi Ambient i Habitatge*.
- Estructuración y desarrollo de una base de datos de variables ambientales del sistema de información geográfica articulado en el marco del CARTOBIO.
- Síntesis de los métodos de modelización de la distribución de las especies, dando especial atención a las estrategias para mejorar los resultados de la modelización en frente de las deficiencias en la información de algunas de las especies objetivo.
- Definición de los productos cartográficos resultantes: base de datos biológicos sobre las especies de interés, cartografía elaborada con sus metadatos completos y ficha descriptiva. Los productos resultantes, a parte de los mapas de distribución deben tener la información necesaria para ayudar al gestor a entenderla y utilizarla correctamente.
- Generación de distintos productos cartográficos de especies de vertebrados (mamíferos y reptiles) y artrópodos.

3 Metodología

La presente propuesta se marca como hito la recopilación de las observaciones georeferenciadas y adecuadas al desarrollo de modelos de hábitat de alta resolución. Estos datos deben servir para generar cartografía temática de las diferentes especies de especial interés de conservación en Cataluña a resoluciones de trabajo apropiadas por las tareas de gestión y planificación relacionadas con estas especies. Así, el proyecto CARTOBIO presenta tres ejes principales que se describen en los siguientes apartados.

3.1 *Recopilación de datos apropiados para la modelización ambiental*

El primero eje plantea el desarrollo de una estrategia de recopilación de datos georeferenciados apropiada a la modelización ambiental. Éstos datos son de dos tipo principales, los datos faunísticos y los datos ambientales que servirán para estimar las distribuciones de las diferentes especies. Los datos faunísticos se recuperarán a partir de las diferentes fuentes de información existentes. Estas fuentes pueden ser de diferente tipología y van desde las base de datos contenidos en el marco del BIOCAT (principalmente convenientes para especies poco conocidas), hasta estudios específicos llevados a cabo por grupos de investigadores con el cuales se trataría de desarrollar trabajos de cooperación conjunta para posibilitar la utilización de los mejores datos disponibles para cada especie en las tareas de modelización.

Referente a la disponibilidad de datos ambientales, Cataluña ha generado una de las mejores bases digitales sobre información ambiental en un ámbito europeo. Esta disponibilidad permite el desarrollo de modelos de hábitat basados en los parámetros ambientales más importantes y a priori significativos para los diferentes grupos de interés de conservación. Éstos datos incluyen imágenes provenientes de satélite, que solo de manera reciente han sido incorporadas, con un gran potencial, en estudios de carácter ecológico.

Estas variables ambientales se derivarán a partir de la información ambiental disponible en cada momento. En referencia a este tipo de información, hay que separar las bases a partir de las que se pueden derivar variables ambientales con relativa facilidad (información ambiental primaria, como la generada directamente a partir de modelos digitales de elevación, atlas climáticos o usos del suelo) de las que requieren tratamiento específico por razones de su complejidad, resolución u origen (información ambientales secundarias como la derivada a partir de diferentes pasos intermedios a partir del mapa de hábitats de Cataluña o la proveniente de sensores remotos).

3.2 *Generación de la cartografía sobre la distribución de especies de especial interés de conservación*

El segundo eje del proyecto plantea la generación de cartografía temática sobre la distribución de especies de especial interés de conservación en Cataluña. Esta cartografía está basada en la aplicación de diferentes metodologías de modelización del hábitat a partir de diferentes variables ambientales y espaciales. La generación de mapas específicos va estrictamente ligada a estimas cuantificadas de su capacidad predictiva y de su incertidumbre. A pesar de ser comúnmente ignorada, la información sobre esta capacidad predictiva se considera de importancia capital en el proceso de aplicación y utilización de la información ecológica generada en tareas de gestión y planificación territorial.

Así pues CARTOBIO ha procedido al desarrollo transversal de cartografía, por un lado, de carácter estático basada en la información disponible en el momento de su generación, en la que en etapas más avanzadas del proyecto, se plantea la actualización periódica de la cartografía a medida que los datos ambientales o faunísticos cambien de manera significativa. Por otro lado, también se ha desarrollado cartografía de carácter dinámico (el caso del análisis de la expansión del mosquito tigre en Cataluña), en la que se han generado distintos modelos a partir de información climática de distintos años y de la evolución de la información faunística de los distintos años des de que se detectaron las primeras presencias del mosquito. La aplicación de la metodología empleada en la generación de mapas temáticos debe ser también hipotéticamente utilizada en la generación de escenarios de cambio de distribución futuros creados a partir de diferentes situaciones de gestión o planificación figuradas o previstas.

En la mayoría de las especies modelizadas hasta el momento, la información faunística de base son datos de presencia, por este motivo la mayor parte de los modelos se han realizado mediante el método estadístico de la máxima entropía implementado en el programa MAXENT [13, 14].

3.3 *Ofrecer al gestor la información complementaria necesaria para el buen uso de los productos de la modelización*

El tercer eje plantea la necesidad de ofrecer al gestor del territorio un producto completo, no solamente una cartografía de calidad de hábitat para cada especie si no también la información necesaria para entender éste producto y

facilitar su buen uso. Así pues, para cada especie analizada en el marco del proyecto CARTOBIO, se ha procedido a la creación de un fichero MMZ de MiraMon [15] que incluye la cartografía generada en forma de raster continuo con sus metadatos completos, así como una ficha descriptiva de sus particularidades, interpretación general y limitaciones del proceso de modelización. No se puede interpretar ni utilizar un mapa elaborado en el marco del CARTOBIO correctamente sin tener en cuenta la información que contiene su ficha correspondiente.

El principal objetivo de la ficha descriptiva es explicar de manera clara y sintética el proceso seguido en la creación del mapa correspondiente, y aportar las claves necesarias para entender mejor la información ecológica de cara a que se pueda hacer un buen empleo. El contenido específico de cada una de las apartados de las fichas descriptivas es el siguiente:

- Especie: número común y científico de la especie modelizada. caso de que el mapa corresponda a un aspecto particular de la biología de la especie (i.e. división por géneros, lugares de festejo o lugares de puesta), la descripción genérica sobre la tipología de las observaciones utilizadas se incluirá en este apartado.
- Resumen: objetivo del mapa y breve resumen del proceso seguido.
- Información ecológica: información ecológica básica sobre la especie estudiada de tipo (área de distribución global y catalana, fenología, hábitats que ocupa, etc.) extraída de bibliografía específica y de consulta a expertos.
- Información biológica de base: se caracteriza la información empleada como variable de respuesta en los modelos. Puede provenir de información biológica recogida al campo, información bibliográfica o cartografía preexistente. Se especifica el origen de los datos, el período de obtención o la época de realización de las prospecciones, los métodos de muestreo empleados, su diseño metodológico, los autores y finalmente la resolución espacial a la que los datos han sido obtenidos y su fiabilidad.
- Información ambiental: variables ambientales empleadas para construir el modelo, y que servirán para elaborar el mapa final. También incluye información sobre las fuentes de información a partir de las que se obtiene cada variable ambiental, su resolución espacial y el ámbito de trabajo.
- Modelización estadística utilizada: descripción del método de modelización utilizado y breve explicación de sus características principales.
- Evaluación y consideraciones ecológicas del modelo: descripción de los procesos estadísticos y de conocimiento de experto seguidos para evaluar el modelo y sus resultados. Cuando sea posible, se muestran las curvas de respuesta de las variables ambientales utilizadas. Así mismo se hacen las consideraciones ecológicas de carácter general oportunas que ayudan a interpretar el resultado del modelo obtenido. Hay que remarcar que el objetivo del proyecto CARTOBIO es la generación de cartografía temática y no la interpretación ecológica detallada de los resultados. Es por esto, que la interpretación ecológica incluida en la ficha de interpretación de la especie se considera solo como una interpretación aproximada y que la importancia o interpretación de los resultados podrían variar en un estudio específico más detallado.
- Interpretación del mapa final: interpretación de la información que proporciona el mapa obtenido, juntamente como una descripción técnica del ámbito del modelo, su resolución espacial y las unidades del mapa (información incluida en los metadatos del mapa generado). Cuando ha sido necesario generar más de un mapa, en este apartado se justifican los motivos.
- Limitaciones y perspectivas: en este apartado se incluye una breve discusión sobre las posibilidades para superar las limitaciones de la información biológica de base y de las variables ambientales, además de recoger propuestas de futuro con el objetivo de mejorar la cartografía obtenida.

4 Resultados

Durante los años 2007 y parte del 2008 se ha procedido a la generación de cartografía temática para las especies recogidas en la Tabla 1.

Los primeros resultados del CARTOBIO mejoran sustancialmente la información existente sobre la distribución espacial de las especies modelizadas, en la Figura 1 se muestra el ejemplo de la cartografía existente en el DMAH y la cartografía equivalente resultado del proceso de modelización para el caso del sisón (*Tetrax tetrax*).

En la Figura 2 se muestra otro ejemplo de un mapa resultante de CARTOBIO con su ficha descriptiva asociada.

ESPECIE	PRODUCTO	ÁMBITO
Reptiles		
Lagartija aranesa <i>Iberolacerta aranica</i>	Adecuación del hábitat dentro del área de empleo	Pirineos
Lagartija pallaresa <i>Iberolacerta aurelioi</i>	Adecuación del hábitat dentro de las áreas de empleo	Pirineos
Lagarto ágil <i>Lacerta agilis</i>	Adecuación del hábitat dentro de las áreas de empleo	Pirineos
Tortuga mediterránea <i>Testudo hermanni</i>	Calidad del hábitat	Sierra de la Albera
Aves		
Urogallo <i>Tetrao urogallus</i>	Calidad de hábitat en zonas de canto de machos (año 2005).	Pirineos
Sisón <i>Tetrax tetrax</i>	Calidad del hábitat de reproducción (año 2007)	Plana de Lleida
Mamíferos		
Armiño <i>Mustela erminea</i>	Calidad del hábitat	Pirineos
Oso pardo <i>Ursus arctos</i>	Calidad del hábitat de machos, hembras (por separado y conjuntamente) y calidad de hábitat de crías. Cada caso para primavera, verano, otoño y invierno.	Pirineos
Quirópteros 10 especies	Calidad del hábitat	Cataluña
Artrópodos		
Ortópteros 160 especies	Calidad del hábitat	Cataluña
Mosquito tigre <i>Aedes albopictus</i>	Análisis de la expansión del mosquito tigre en Cataluña 2005-2007	Cataluña

Tabla 1: Cartografía generada en el marco del proyecto CARTOBIO 2007-2008.

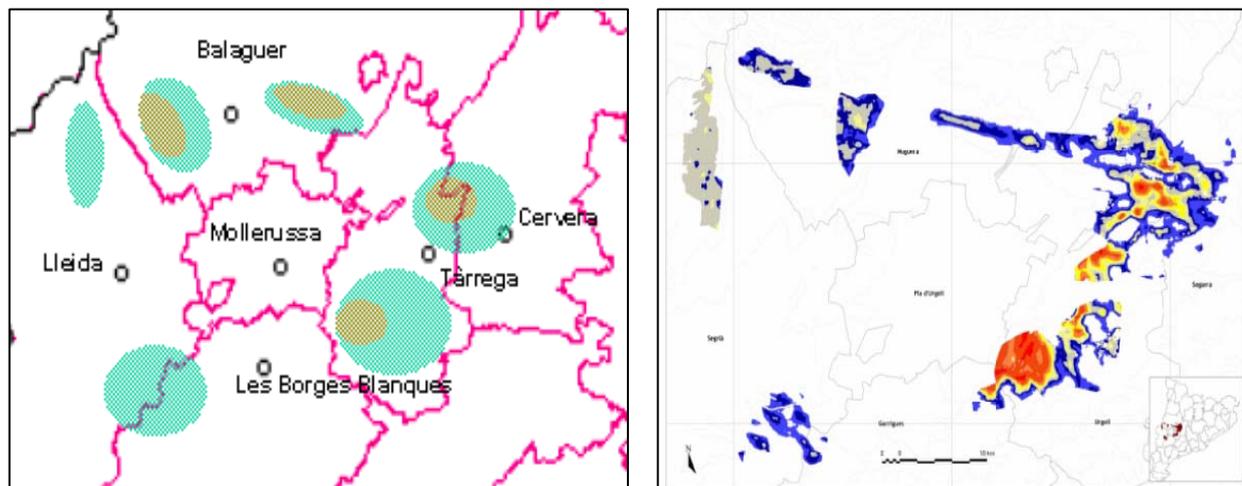


Figura 1: Ejemplo de cartografía original disponible en el DMAH sobre el sisón (*Tetrax tetrax*) y a la izquierda cartografía obtenida en el proyecto CARTOBIO, concretamente corresponde a un mapa de idoneidad de hábitat para las puestas de sisón en el 2007.

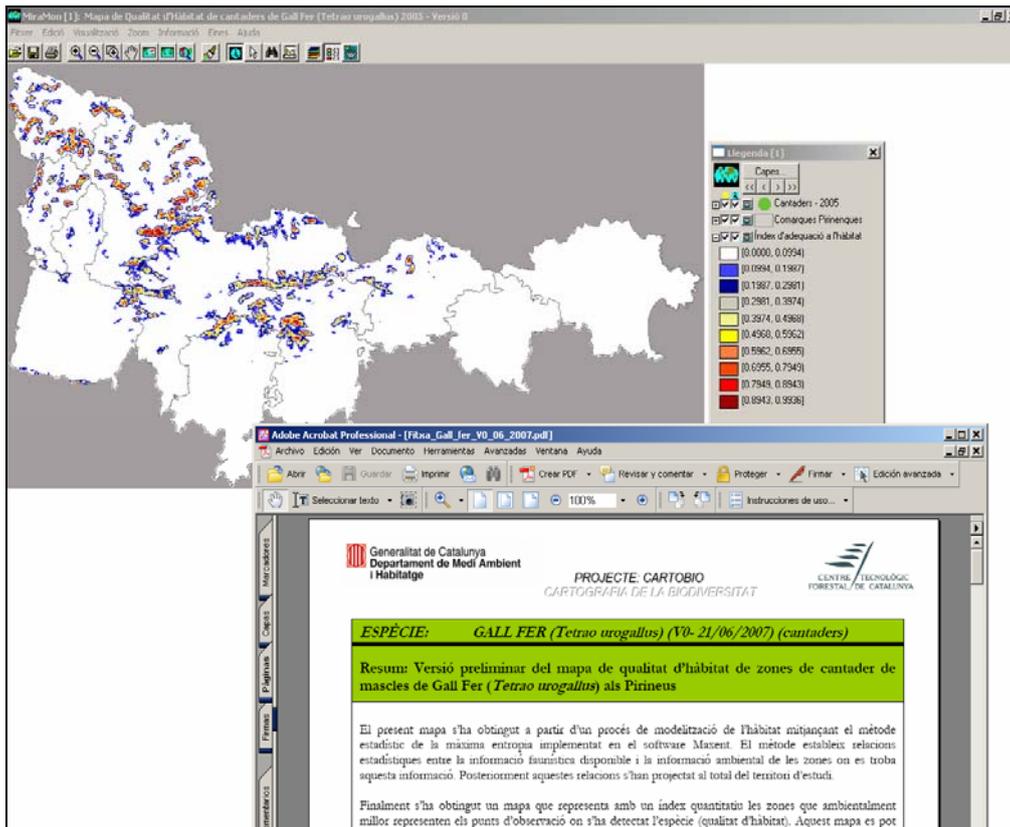


Figura 2: Mapa de calidad del hábitat para cantaderos de urogallo en el Pirineo de Cataluña con su ficha explicativa asociada y accesible des del propio mapa.

5 Aplicaciones actuales

Cumpliendo con los objetivos del proyecto, la cartografía resultante del proceso de modelización se está utilizando cómo herramienta de soporte a la toma de decisiones en el día a día de la gestión del patrimonio natural. A continuación se describen algunos ejemplos:

- Determinación de posibles zonas de riesgo de ataque y depredación del oso pardo al ganado a partir de la comparación de la cabaña ganadera y la distribución espacial de los osos según los modelos.
- En el caso concreto del los modelos de oso pardo, urogallo y tortuga mediterránea las cartografías generadas se han utilizado para complementar las medidas de protección de los Parques Nacionales, Parque Natural, Zonas PEIN, Red Natura 2000 y otras figuras de planificación territorial que afectan a la distribución de dichas especies.
- Detección de nuevas posibles zonas a prospectar para conocer mejor la distribución real de las especies.
- Apoyo en la descripción y cálculo del hábitat disponible para la especie: tamaño, conectividad, altitud, orientación, vegetación, tipo de bosques, etc.
- Comparación de zonas y hábitats utilizados para el oso pardo autóctono (antes del 1990) y de los osos procedentes de la reintroducción.
- Definición de las zonas y hábitats utilizados para el oso pardo a lo largo del año y según el sexo y edad.

6 Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de los expertos en cada una de las especies: Santiago Palazón, Josep Maria Olmo Vidal, David Guixé, Gerard Bota, Carles Flaqué, Xavier Puig, Roger Eritja, Albert Vilardell y Leonardo Bejarano.

7 Referencias bibliográficas

- [1] Guisan, A. & Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- [2] Vaughan, I. P. & Ormerod, S. J. 2005. The continuing challenges of testing species distribution models. *Journal of Applied Ecology*, 42, 720-730.
- [3] Rodriguez, J. P., Brotons, L., Bustamante, J. & Seoane, J. 2007. The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 13, 243-251.
- [4] Wiens, J. J. & Donoghue, M. J. 2004. Historical biogeography, ecology and species richness. *Trends in Ecology & Evolution*, 19, 639-644.
- [5] Graham, C. H. & Hijmans, R. J. 2006. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global Ecology and Biogeography*, 15, 578-587.
- [6] Pulliam, H. R. 2000. On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*, 3, 349-361.
- [7] Peterson, A. T. 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor*, 103, 599-605.
- [8] Pearce J, Ferrier S. 2001. The practical value of modelling relative abundance of species for regional conservation planning. *Biological Conservation*. 98: 33-43.
- [9] Schnase, J.L., Stohlgren, T.J., & Smith, J.A. 2002. The National Invasive Species Forecasting System: A strategic NASA/USGS partnership to manage biological invasions. NASA Earth Science Enterprise Applications Division Special Issue. *Earth Observing Magazine*, August, pp. 46-49.
- [10] Estrada, J., Pedrocchi, V., Brotons, L. & Herrando, S. 2004. *Atles dels ocells nidificants de Catalunya 1999-2002 (Catalan breeding bird atlas 1999-2002)*, pp. 638. Barcelona: Institut Català d'Ornitologia (ICO) / Lynx Edicions.
- [11] Castell, C., Beltran, A. & Margall, M. 2003. El Sistema de Informació Territorial de la Red de Espacios Libres de la provincia de Barcelona (SITxell). In: *El Territorio como sistema. Conceptos y herramientas de ordenación* (Ed. by Folch, R.), pp. 291. Barcelona: Diputació de Barcelona.
- [12] MINUARTIA. 2003. Proposta d'estructuració del mòdul de fauna i connectivitat en el Sistema d'Informació Territorial de la Xarxa d'Espais Lliures de la província de Barcelona. Diputació de Barcelona (inèdit). pp. 54.
- [13] Phillips, S. J., Dudík, M. & Schapire, R. E. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. In: *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, pp. pages 655-662.
- [14] Phillips, S. J., Anderson, R. P. & Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- [15] Pons, X. 2004. *MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i software de Teledetecció*. Bellaterra: Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM.