

MODELIZACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BOSQUE Y LA DIVERSIDAD DE AVES FORESTALES MEDIANTE REDES NEURONALES: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN FORESTAL SOSTENIBLE

Assu Gil-Tena¹, Cristina Vega-García¹, Lluís Brotons i Alabau^{2,3} y Santiago Saura Martínez de Toda^{1,2}

¹ Universitat de Lleida. Departament d'Enginyeria Agroforestal. Av. Alcalde Rovira Roure 191. 25198-LLEIDA (España). Correo electrónico: ssaura@eagrof.udl.es

² Centre Tecnològic Forestal de Catalunya. c/Pujada del Seminari s/n. 25280-SOLSONA (Lleida-España).

³ Institut Català d'Ornitologia. Museu de Ciències Naturals. Zoologia. Passeig Picasso s/n. 08003-BARCELONA (España)

Resumen

Las aves forestales juegan un papel ecológico fundamental en nuestros bosques y se consideran un buen indicador de su biodiversidad. La determinación de las características del bosque que influyen en la diversidad de aves forestales es esencial para aplicar una gestión forestal sostenible orientada a conservar la biodiversidad de estos ecosistemas. Para ello se han modelizado mediante redes neuronales las relaciones entre la composición y estructura del bosque y la diversidad (riqueza y rareza) de aves forestales a escala 1 x 1 km en la provincia de Lleida a partir de datos del Atlas de Aves Nidificantes de Cataluña y del Mapa Forestal de España (1:50.000). Las correlaciones obtenidas entre observaciones reales y estimadas han sido del 0,63 para la riqueza y de 0,48 para la rareza. Los mayores errores de predicción se localizan en aquellas zonas con mayor diversidad de aves forestales, probablemente debido al papel desconocido de variables ambientales distintas a las consideradas (clima, topografía). La diversidad de aves forestales se ve favorecida por la superficie de bosque, la variedad de especies arboladas, una alta fracción de cabida cubierta, y por un avanzado estado de desarrollo del bosque, siendo estas dos últimas variables especialmente relevantes respecto a la rareza.

Palabras clave: *Biodiversidad forestal, Composición y estructura del bosque, Ecología del paisaje, Fracción de cabida cubierta*

INTRODUCCIÓN

Existe una notable falta de conocimiento acerca de la influencia de la gestión forestal sobre la biodiversidad de los bosques. Se hace necesario por ello profundizar en el estudio de las relaciones entre las características del bos-

que y los diferentes componentes de su biodiversidad. Las aves forestales juegan un papel ecológico fundamental en nuestros bosques y se consideran un buen indicador de su biodiversidad (SEKERCIOGLU, 2006). Diversas observaciones indican que su distribución se relaciona con los bosques a diferentes escalas espaciales

(WARREN et al., 2005; YAMAURA et al., 2005, MITCHELL et al., 2006) y no únicamente a escala de rodal. Por este motivo el desarrollo reciente de métodos cuantitativos en ecología del paisaje proporciona nuevas perspectivas para el análisis de la biodiversidad de los ecosistemas forestales.

En este estudio se han modelizado las relaciones entre la composición y estructura del bosque y la diversidad (riqueza y rareza) de aves forestales a escala de paisaje (1x1 km) mediante redes neuronales, para proporcionar recomendaciones de gestión forestal para la preservación de la diversidad de avifauna forestal en la provincia de Lleida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos de aves forestales

Se ha partido de los datos de los censos realizados por voluntarios para el Atlas de Aves Nidificantes de Cataluña elaborado en el período 1999-2002 (ESTRADA et al., 2004). Se ha calculado la riqueza y rareza de 56 especies de aves forestales mediante datos de presencia/ausencia (Tabla 1). Se han seleccionado las especies de aves como forestales según su matriz de selección de hábitat (ESTRADA et al., 2004) y se han estudiado en un total de 742 cuadrículas UTM 1 x 1 km localizadas en la provincia de Lleida. La

rareza para una UTM se ha calculado como la suma de la inversa de las presencias de cada especie en Cataluña para las especies presentes en la UTM en cuestión (ver ARAÚJO et al., 2005).

Variables de estructura y composición del bosque

Con el objetivo de disponer de información sobre los bosques de la provincia de Lleida, se ha utilizado el Mapa Forestal de España a escala 1:50.000 (MFE50; MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2006), realizado en coordinación con el Tercer Inventario Forestal Nacional. El MFE50 presenta una unidad mínima cartografiada de 6,25 ha, disminuyendo a 2,2 ha en el caso de teselas enclavadas dentro de matriz de no hábitat, y considera bosque a las masas arboladas con una fracción de cabida cubierta (FCC) de más del 5%.

Las variables de estructura y composición del bosque consideradas en cada UTM 1x1 km han sido las siguientes:

- Área de bosque según distintos intervalos de FCC. Se han calculado 4 variables de área de bosque: el área de bosque total a partir de una FCC > 5%, el área de bosque con una FCC entre el 5 y el 30%, entre el 30 y el 70% y de más del 70%.
- Fracción de cabida cubierta media.
- Porcentaje de bosque de coníferas, en contraposición con el de frondosas.

<i>Accipiter gentilis</i>	<i>Dendrocopos major</i>	<i>Oriolus oriolus</i>	<i>Serinus citrinella</i>
<i>Accipiter nisus</i>	<i>Dryocopus martius</i>	<i>Parus ater</i>	<i>Sitta europaea</i>
<i>Aegithalos caudatus</i>	<i>Emberiza cia</i>	<i>Parus caeruleus</i>	<i>Streptopelia turtur</i>
<i>Anthus trivialis</i>	<i>Erithacus rubecula</i>	<i>Parus cristatus</i>	<i>Sylvia atricapilla</i>
<i>Buteo buteo</i>	<i>Falco subbuteo</i>	<i>Parus major</i>	<i>Sylvia borin</i>
<i>Carduelis spinus</i>	<i>Ficedula hypoleuca</i>	<i>Parus palustris</i>	<i>Sylvia cantillans</i>
<i>Certhia brachydactyla</i>	<i>Fringilla coelebs</i>	<i>Pernis apivorus</i>	<i>Sylvia hortensis</i>
<i>Certhia familiaris</i>	<i>Garrulus glandarius</i>	<i>Phylloscopus bonelli</i>	<i>Sylvia melanocephala</i>
<i>Circaetus gallicus</i>	<i>Hieraaetus pennatus</i>	<i>Phylloscopus collybita</i>	<i>Tetrao urogallus</i>
<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	<i>Jynx torquilla</i>	<i>Picus viridis</i>	<i>Troglodytes troglodytes</i>
<i>Columba palumbus</i>	<i>Loxia curvirostra</i>	<i>Prunella modularis</i>	<i>Turdus merula</i>
<i>Corvus corax</i>	<i>Lullula arborea</i>	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	<i>Turdus philomelos</i>
<i>Corvus corone</i>	<i>Milvus milvus</i>	<i>Regulus ignicapilla</i>	<i>Turdus torquatus</i>
<i>Cuculus canorus</i>	<i>Muscicapa striata</i>	<i>Regulus regulus</i>	<i>Turdus viscivorus</i>

Tabla 1. Especies de aves forestales nidificantes estudiadas

- Estado de desarrollo, media de las clases naturales de edad (re poblado (1), monte bravo (2), latizal (3) y fustal (4)) ponderada por el área de cada tesela de bosque.
- Variables de diversidad del hábitat forestal (les tres primeras se han cuantificado mediante el índice de Shannon-Wiener):
 - FCC, a partir de la proporción de bosque según 5 clases de FCC diferentes (5-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80% y 80-100%).
 - Estado de desarrollo, a partir de la proporción de superficie de bosque correspondiente a cada uno de los cuatro estados de desarrollo descritos anteriormente.
 - Especies arbóreas forestales, a partir de la proporción de superficie de bosque cubierta por cada especie.
 - Porcentaje de masas forestales mono-específicas, calculado como el porcentaje de bosque cubierto por rodales en los que al menos el 90% de los árboles corresponden a la misma especie principal.

Análisis de datos

El análisis de datos se ha llevado a cabo mediante modelos simulados de redes neuronales artificiales que permiten detectar patrones complejos como los que probablemente se dan entre los ecosistemas forestales y la diversidad de aves a estudiar, en los que puede haber variables que pueden estar altamente correlacionadas entre sí o alejadas de los supuestos de normalidad que presuponen los modelos estadísticos convencionales (BRAVO-OVIEDO Y KINDERMANN, 2004; VEGA-GARCÍA & CHUVIECO, 2006).

La construcción de las redes neuronales se ha basado en el modelo general de perceptrón multicapa con un algoritmo mejorado de construcción por correlación en cascada, basado en una regla de

aprendizaje en gradiente adaptativo. La determinación de variables de entrada a las redes (*inputs*) se optimizó mediante la aplicación previa de un algoritmo genético. Con el objeto de conseguir redes que recojan adecuadamente las relaciones a estudiar, manteniendo su capacidad de generalización, se ha segregado un 80% de los datos para la construcción del modelo (2/3 para el entrenamiento y 1/3 para el test) y un 20% para su posterior validación (ver VEGA-GARCÍA & CHUVIECO, 2006). Se han generado numerosas redes con diferentes arquitecturas pero solo una capa oculta que han sido evaluadas por su capacidad de predecir correctamente los datos de entrenamiento y test, pero sobre todo por su eficacia en tratar con los datos de validación, no vistos por las redes con anterioridad. La aptitud de los modelos se ha evaluado mediante la correlación entre la variable estimada y la observada. El análisis de sensibilidad o influencia de las variables en los modelos se ha realizado mediante la derivada parcial de cada variable independiente respecto a la dependiente (riqueza o rareza), y mediante su frecuencia de selección en el algoritmo genético. Todos estos análisis se han realizado con el programa informático Neural-SIM™ (NEURALWARE, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las mejores redes neuronales obtenidas proporcionaron correlaciones entre datos observados y estimados superiores al 0,6 para la riqueza y al 0,4 para la rareza (Tabla 2). Los mayores errores de predicción de los modelos se localizaron en aquellas cuadrículas con los valores más altos de diversidad, que mostraron una tendencia a ser subestimados por las redes neuronales (ver Figura 1).

		r	Error absoluto	RMS
RIQUEZA	Entrenamiento	0,636	3,780	4,885
	Test	0,634	3,620	4,450
	Validación	0,609	4,011	4,9942
RAREZA	Entrenamiento	0,428	0,015	0,030
	Test	0,520	0,014	0,025
	Validación	0,490	0,017	0,032

Tabla 2. Evaluación del ajuste de las mejores redes neuronales

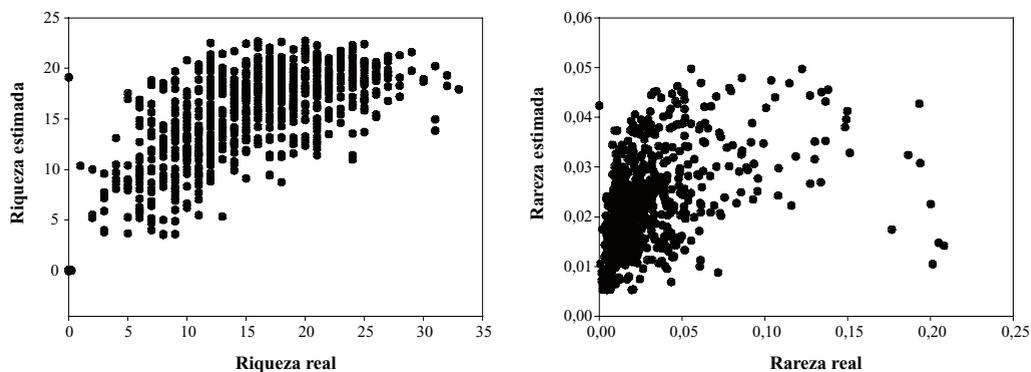


Figura 1. Evaluación gráfica del ajuste de la red neuronal para la riqueza y rareza de aves fore

Por orden de importancia las variables más influyentes fueron la superficie de bosque (según distintos grados de fracción de cabida cubierta), la fracción de cabida cubierta, el estado de desarrollo, la diversidad de especies arbóreas y la abundancia de coníferas o frondosas (Tablas 3 y 4).

Los resultados ponen de manifiesto la necesidad prioritaria de una disponibilidad suficiente de hábitat de bosque (GIL-TENA et al., 2007), aunque en el caso de la rareza la presencia de bosque con una FCC superior al 70% es el determinante principal. No obstante, cabe destacar que en estudios anteriores se ha mostrado que FCC superiores al 70% no favorecen a la riqueza de especies (GIL-TENA et al., 2007). Además, la estrecha relación entre la FCC y el área de bosque hace que esta variable adquiera una

importancia considerable, aunque en el caso de la rareza no ha sido posible evaluar la influencia de la variable debido a que la transformación de entrada a la red no es derivable (Tabla 4).

El efecto beneficioso de un avanzado estado de desarrollo puede estar asociado a una mayor proporción de cavidades y de madera muerta que permite una mayor disponibilidad de sustratos de nidificación y alimentación (CAMPODRON, 2001). Por su parte los bosques con mayor diversidad de especies arbóreas suelen albergar un mayor número de hábitats diferentes para un mayor número de especies (ver GIL-TENA et al., 2007). El efecto contradictorio de los bosques de coníferas sobre la riqueza y la rareza concuerda con resultados anteriores (ver GIL-TENA et al., 2007), y pone de manifiesto también la menor

	RIQUEZA	RAREZA
Área de bosque (FCC>5%)	1	0,917
Área de bosque (5<FCC 30%)	0,528	0,167
Área de bosque (30<FCC 70%)	0,250	0,111
Área de bosque (FCC>70%)	0,153	0,639
FCC	0,889	0,500
Estado de desarrollo	0,833	0,972
Porcentaje de coníferas	0,583	0,833
Diversidad de especies arbóreas	0,972	0,861
Diversidad de estado de desarrollo	0,361	0,486
Diversidad de FCC	0,236	0,278
Masas monoespecificas	0,111	0,083

Tabla 3. Frecuencia de selección de las variables en el algoritmo genético previo a la construcción de las redes neuronales

	MEDIA RIQUEZA	MEDIA RAREZA
Área de bosque (FCC>5%)	0,248	0,074
Área de bosque (5<FCC 30%)	0	0
Área de bosque (30<FCC 70%)	0	0
Área de bosque (FCC>70%)	0	0,501
FCC	0,259	NA (**)
Estado de desarrollo	0,050	0,170
Porcentaje de coníferas	-0,037	0,023
Diversidad de especies arbóreas	0,106	0,043
Diversidad de estado de desarrollo	-0,0005	0
Diversidad de FCC	0	0
Masas monoespecíficas	0	0

Tabla 4. Análisis de sensibilidad. Representa la tasa de cambio de la variable dependiente (riqueza o rareza) relativa al cambio de cada variable independiente. En términos matemáticos, son las derivadas parciales de los outputs con respecto a los inputs. (**) No aplicable debido a que la función de entrada de la variable en la red neuronal no es derivable

relación de la diversidad de aves forestales y un tipo de bosque en particular respecto a otras características de estructura de bosque o de estadios sucesionales (MITCHELL *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DE GESTIÓN

La gestión forestal sostenible en Lleida debe considerar las características del bosque que favorecen la diversidad de aves forestales según este estudio, es decir, el mantenimiento o aumento de la superficie de bosque, una alta fracción de cabida cubierta, especialmente para las aves de mayor rareza (bosque con FCC superior al 70%), un avanzado estado de desarrollo de las masas y variedad de especies arbóreas. En este sentido, el método de ordenación por rodales podría ser especialmente adecuado para este tipo de gestión. Por otra parte, se deberían erradicar prácticas muy arraigadas en el sector forestal en Cataluña como son las cortas por huroneo ya que no permiten los estados de desarrollo avanzados. Además la homogeneización que se está produciendo en el paisaje forestal por el abandono de las actividades rurales, incluida la gestión forestal, no favorece la diversidad de especies arbóreas ni de estructuras forestales características de estados de desarrollo avanzados.

Aunque ya se ha señalado que las características estructurales de los bosques tienen más impor-

tancia que la presencia de determinadas especies arbóreas, los bosques de frondosas presentan una riqueza de aves algo mayor, aunque, tal y como se desprende de los resultados, las aves de mayor rareza parecen estar asociadas en mayor medida a los bosques de resinosas, como los de los pisos montano y subalpino de la zona de estudio.

Por último, la diferencia entre los resultados obtenidos para la riqueza y la rareza ponen de manifiesto la necesidad de determinar con más detalle cómo afectan las características de bosque a las especies de aves más raras en Cataluña para implementar la gestión según sus preferencias de hábitat forestal. Se hace además necesario incluir en el análisis otros factores ambientales (clima, topografía, etc.) para mejorar el poder predictivo en la modelización de la diversidad de la avifauna forestal, así como realizar análisis a otras escalas, en otras zonas de estudio y con variables forestales más finas (trabajos actualmente en desarrollo).

Agradecimientos

Agradecemos la financiación del proyecto IBEPFOR (CGL2006-00312/BOS, Plan Nacional de I+D+I) y el trabajo de los voluntarios que hicieron posible el Atlas de Aves Nidificantes de Cataluña, financiado por el Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Cataluña y la Fundació Territori i

Paisatge. A. Gil-Tena disfruta de una beca predoctoral (2007FIC-00874) del Departament d'Educació i Universitats de la Generalitat de Catalunya y con el apoyo del Fondo Social Europeo y Lluís Brotons de un contrato Ramón y Cajal del Ministerio de Educación y Ciencia. El Mapa Forestal de España ha sido proporcionado por la Dirección General para la Biodiversidad (Ministerio de Medio Ambiente).

BIBLIOGRAFÍA

- ARAÚJO, M.B.; THUILLER, W.; WILLIAMS, P.H. & REGINSTER, I.; 2005. Downscaling European species atlas distributions to a finer resolution: implications for conservation planning. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 14: 17-30.
- BRAVO-OVIEDO, A. Y KINDERMANN, G.; 2004. Modelización de sistemas ecológicos mediante redes neuronales. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 18: 311-316.
- CAMPRODON, J.; 2001. Tratamientos forestales y conservación de la fauna vertebrada. En: J. Camprodon y E. Plana (eds.), *Conservación de la biodiversidad y gestión forestal. Su aplicación en la fauna vertebrada*: 135-179. Edicions Universitat de Barcelona. Barcelona.
- ESTRADA, J.; PEDROCCHI, V.; BROTONS, L. Y HERRANDO, S. (EDS.); 2004. *Atlas dels ocells nidificants de Catalunya 1999-2002*. Institut Català d'Ornitologia (ICO)/Lynx Edicions. Barcelona.
- GIL-TENA, A.; SAURA, S. & BROTONS, L.; 2007. Effects of forest composition and structure on bird species richness in a Mediterranean context: Implications for forest ecosystem management. *Forest Ecol. Manage.* 242: 470-476.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE; 2006. *Tercer Inventario Forestal Nacional*. Lleida. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Madrid.
- MITCHELL, M.S.; RUTZMOSER, S.H.; WIGLEY, T.B.; LOEHLE, C.; GERWIN, J.A.; KEYSER, P.D.; LANCIA, R.A.; PERRY, R.W.; REYNOLDS, C.J.; THILL, R.E.; WEIH, R.; WHITE, D. & WOOD, P.B.; 2006. Relationships between avian richness and landscape structure at multiple scales using multiple landscapes. *Forest Ecol. Manage.* 221: 155-169.
- NEURALWARE; 2000. *NeuralSIM, the Complete Solution for Neural Data Modeling. User Guide*. NeuralWare. Pittsburgh, PA.
- SEKERCIOGLU, C.H.; 2006. Increasing awareness of avian ecological function. *Trends Ecol. Evol.* 21: 464-471.
- VEGA-GARCÍA, C & CHUVIECO, E; 2006. Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in mediterranean landscapes. *Landsc. Ecol.* 21: 595-605.
- WARREN, T.L.; BETTS, M.G.; DIAMOND, A.W. & FORBES, G.J.; 2005. The influence of local habitat and landscape composition on cavity-nesting birds in a forested mosaic. *Forest Ecol. Manage.* 214: 331-343.
- YAMAURA, Y.; KATOH, K.; FUJITA, G. & HIGUCHI, H.; 2005. The effect of landscape contexts on wintering bird communities in rural Japan. *Forest Ecol. Manage.* 216: 187-200.