Accésit SECF en el apartado Trabajo Fin de Máster Oficial

**Identificación de corredores ecológicos potenciales
para el oso pardo en la región Sureste de los Cárpatos
en Rumania. Modelización de la conectividad mediante
superficies de resistencia basadas en modelos de idoneidad
de hábitat y en opinión experta**

**Identifying potential corridors for the brown bear in the Southeastern region
of the Romanian Carpathians. Connectivity modelling using alternate
landscape resistance based on habitat suitability
models and expert knowledge**

García-Sánchez, M.P.^{1*}; Fedorca, A.²; Alonso González, C.¹

¹*Departamento de Sistemas y Recursos Naturales.
Escuela Técnica Superior de Ingenierías de Montes, Forestal y del Medio Natural,
Universidad Politécnica de Madrid, C/ José Antonio Novais 10, 28040 Madrid, España*

²*National Institute for Research and Development in Forestry Marin Dracea,
Closca Street 13, 500040 Brasov, Rumanía*

* Autor para correspondencia: mpinogarsan@gmail.com

Resumen

La Cordillera de los Cárpatos en Rumania constituye un área prioritaria para la conservación del oso pardo (*Ursus arctos* L.) en el territorio europeo, ya que presenta grandes extensiones de hábitat para la especie con un alto grado de continuidad. No obstante, sin acciones responsables por parte de los gobernantes, los futuros proyectos de desarrollo localizados en este territorio representan una amenaza para la conectividad y la disponibilidad de hábitat de la especie. Se presenta, por tanto, la necesidad de identificar las zonas preferentes de paso para la especie con el fin de definir y proteger una red ecológica resiliente que garantice la conectividad entre las poblaciones que habitan en el territorio. Concretamente, este estudio compara diferentes enfoques de modelización con el fin de identificar los corredores y áreas prioritarias para la conectividad del oso pardo a lo largo de la región sudeste de los Cárpatos. Para ello, primero se elaboraron diferentes mapas de resistencia en base a modelos de disponibilidad de hábitat (MaxEnt) y conocimiento experto. Posteriormente, se estimaron las distancias de mínimo coste (Linkage Mapper) y se aplicó teoría de circuitos (Circuitscape), para definir los principales corredores utilizados por la especie. Finalmente, se evaluó la contribución de cada uno de los elementos del paisaje identificados que conforman la red ecológica (Conefor 2.6). Este estudio proporciona nuevas conclusiones relacionadas con la aplicación de diferentes enfoques conceptuales de modelización de la conectividad, así como indica cuáles son las áreas prioritarias a integrar en los futuros planes territoriales y en la gestión de la especie.

Palabras clave: conectividad del paisaje, Conefor, distancias de mínimo coste, maxEnt, teoría de circuitos.

Summary

Romania is a priority area for the conservation of the brown bear (*Ursus arctos* L.) in the Carpathian region, since it offers rich and extensive areas of habitats that are not yet permanently fragmented. However, without responsible government actions, the upcoming events related to the very much needed economic development of the area pose a threat on both species and habitats connectivity in the region and elsewhere. Then, regarding the future plans and development projects on the mountain range, efforts should be addressed to preserve a resilient ecological network for the target species populations. Specifically, the goal of this study was to compare different modelling approaches to identify core areas and ecological corridors for the brown bear on a subnational regional scale in the Southeastern Carpathians. In order to do this, two friction surfaces were developed based on species distribution models and on expert opinion. Then, Linkage Mapper and Circuitscape software packages were used to spatially analyze landscape connectivity, based on minimum cost distances and circuit theory, respectively. Finally, a prioritization analysis was performed using Conefor 2.6 to assess the importance of the defined bear habitat and corridor areas. Thus, the study provides alternate results and new discussions on applying different conceptual approaches on connectivity modelling. In addition, priority areas are identified to be included in management and territorial plans and, therefore, to be protected against the negative effects of infrastructure development in the Southeastern Carpathians and to support smart development.

Keywords: landscape connectivity, Conefor, least-cost modelling, maxent, circuit theory.

1. Introducción

La cordillera de los Cárpatos desempeña un importante papel como sistema ecológico transfronterizo permitiendo la dispersión de plantas y animales entre los paisajes naturales del norte y suroeste del continente europeo (Webster *et al.*, 2001). Entre otras especies, los Cárpatos albergan una de las mayores poblaciones de oso pardo en Europa, con gran concentración en Rumanía. Sin embargo, a pesar del crecimiento de la población registrado en los últimos años tanto en Europa como dentro del ámbito nacional de Rumanía (Chapron *et al.*, 2014), el oso pardo requiere superficies de gran extensión, y núcleos de hábitat conectados a lo largo del paisaje para preservar la diversidad genética de sus poblaciones, así como la de otras especies que comparten el mismo ecosistema (Swenson *et al.*, 2000).

Los futuros escenarios de desarrollo previstos en la región ponen en peligro la conectividad de las poblaciones de oso pardo. Específicamente, las fuertes presiones antrópicas como el desarrollo de infraestructuras, la expansión de territorios urbanos y rurales, la pérdida los usos tradicionales de la tierra, la agricultura de monocultivo y otros cambios en el uso de la tierra; que provocan la pérdida de hábitat y fragmentación del paisaje. Además, dichos factores acentúan el conflicto entre el oso y las actividades económicas locales, especialmente, la ganadería. Por todo ello, entre los desafíos más importantes en términos de conectividad en los Cárpatos para grandes carnívoros como el oso pardo, se incluye la delimitación de una red suficientemente densa de corredores que permita la dispersión de los individuos conectando las zonas con mayor densidad de población de la especie (Hilty *et al.*, 2019).

De acuerdo con las necesidades descritas, el presente estudio proporciona un análisis de conectividad del oso pardo a escala subnacional en Rumania, realizado mediante dos técnicas de modelización aplicadas para la especie en otras regiones de Europa (Posillico *et al.*, 2004; Mateo-Sánchez *et al.*, 2015; Ziółkowska *et al.*, 2016).

Los objetivos específicos perseguidos con dicho análisis fueron:

- Desarrollar modelos de idoneidad de hábitat con datos empíricos de radiotelemetría de collares GPS de oso.
- Definir las teselas de hábitat y crear la matriz de resistencias, mediante diferentes enfoques metodológicos.
- Identificar los corredores potenciales mediante Linkage Mapper y Circuitscape.
- Analizar la contribución de las teselas de hábitat y corredores a la conectividad global, obtenida mediante índices de conectividad “PC” (Conefor 6).
- Comparar los resultados de diferentes enfoques y definir los lugares clave en donde se deberán priorizar los esfuerzos de conservación para preservar la conectividad de la especie.

2. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en la región central de Rumanía, en la curvatura y región meridional de la cordillera de los Cárpatos y su extensión es de 10.466 km². La zona se caracteriza por presentar un amplio rango altitudinal y pendientes moderadas y acentuadas. El 50% del área de estudio está cubierta por superficie arbolada con densidades considerables y un alto grado de continuidad. Estas masas se alternan con áreas de menor extensión cubiertas por bosque de transición y matorral, brezales, praderas naturales y superficies de roca desnuda, sobre todo en los espacios abiertos de alta montaña. El resto del área está asociada a usos intensivos e infraestructuras. La mayoría de los tramos de carreteras nacionales a lo largo de la cordillera de los Cárpatos son vías únicas con dos o tres carriles, no muy restrictivas pero muy concurridas.

3. Materiales y metodología

Para la consecución de los objetivos propuestos, se ha diseñado un marco metodológico en el que se diferencian tres fases principales (*Fig. 1*).

Figura 1. Esquema del marco metodológico aplicado en este estudio.

A continuación, se describe cada una de las fases de estudio en las que se ha estructurado el análisis de conectividad.

3.1. Modelización de la idoneidad de hábitat – *MaxEnt*

En una primera fase se desarrollaron los modelos de idoneidad de hábitat mediante el método de máxima entropía de *MaxEnt*. Este método está basado en la estimación de la probabilidad de presencia de la especie a lo largo del territorio, a partir de puntos de localización y variables ambientales. Concretamente, para el desarrollo de los modelos se utilizaron 1.129 datos de emisores GPS de 28 osos radiomarcados, filtrados de un total de 63,124 registros (*Fig. 2*) con el fin de evitar el sesgo en los modelos por autocorrelación de los datos (Mateo-Sánchez *et al.*, 2014; Popescu *et al.* 2018; Posillico *et al.*, 2004).

Figura 2. Datos GPS de los osos radiomarcados (63,124 datos telemétricos de posición registrados desde 2006 a 2019). Se representan en el mismo plano las Zonas Especiales de Conservación (ZECs), espacios protegidos de la Red Natura 2000.

Por otro lado, al inicio del análisis se consideraron 47 variables ambientales asociadas a factores ecológicos y antrópicos que influyen en la presencia de la especie. De este grupo de variables se seleccionaron aquellas con mayor poder predictivo

Figura 3. Resultados gráficos de los diferentes modelos tipo de idoneidad de hábitat (en términos de probabilidad de presencia de la especie de 0 a 1), de MaxEnt. A parte, de las diferentes variables contempladas en cada uno de los escenarios de modelización, se ha variado la escala de estimación de sus valores de acuerdo con su capacidad de percepción por la especie (Mateo-Sánchez *et al.* 2015; Ziółkowska *et al.* 2016). Por ejemplo, los valores de las variables climáticas y la pendiente del terreno utilizados en el modelo J-ZONAL corresponden al valor medio de todos los píxeles comprendidos en un radio de 16 km; mientras que los valores de las variables de J-MICRO se estiman en un radio de 1 km, considerados factores ecológicos o antrópicos que tienen un efecto a pequeña escala sobre la presencia de la especie. Por otro lado, el modelo tipo M y Z cuenta con variables predictoras estimadas para radios de 1 a 32 km

para los modelos, y se combinaron con el fin de obtener diferentes escenarios de modelización (Fig. 3).

Además de los mapas de distribución de la especie, se analizaron las probabilidades de presencia obtenidas en función de cada una de las variables ambientales, con el fin de identificar las preferencias de hábitat de la especie sobre la zona de estudio. De esta manera, los valores de probabilidad (de 0 a 1) fueron interpretados como índices de idoneidad de hábitat para el oso pardo, siendo mayores cuanto más disponibilidad de hábitat exista en la zona.

Para concluir esta fase, se evaluaron todos los modelos comprobando la variabilidad y coherencia de su predicción, a partir de la replicación del análisis mediante el método de validación cruzada.

4. Modelización de conectividad

4.1. Delimitación de las teselas de hábitat

Se identificaron en primer lugar las teselas de hábitat, definidas como las zonas

con las características idóneas para el desarrollo de la actividad vital del oso y entre las cuales se producen los flujos ecológicos de los individuos. La delimitación de estas unidades espaciales se realizó a partir de:

- (a) La selección de las superficies idoneidad de hábitat con mayor o igual de 0,5, en base al modelo “A” de MaxEnt, y, alternativamente, mediante
- (b) La identificación de superficies que cumplen con una serie de características preferidas por la especie para cubrir sus necesidades de alimentación, reproducción y refugio, en base a referencias bibliográficas validadas por criterio experto.

4.2. Creación de la matriz de resistencia

Los mapas de resistencia representan la permeabilidad que ofrece el territorio al paso de los individuos y, de manera similar a la definición de teselas de hábitat, se han generado diferentes mapas aplicando dos enfoques. Por un lado, se utilizó la función inversa de los valores de idoneidad de hábitat de MaxEnt, suponiendo que la permeabilidad del paisaje es proporcional a la idoneidad del hábitat de la especie (A). Y, de manera alternativa, se clasificó el territorio asignando valores de resistencia a ocho factores ecológicos y antrópicos, ponderados mediante criterio experto (Fig. 4).

Figura 4. Mapas de resistencias obtenidos: (A) a partir de la transformación inversa de los valores de idoneidad de del modelo A de MaxEnt; y (B) a partir de la suma de resistencias asignadas a las variables del paisaje basado en criterio experto.

4.3. Identificación de corredores mediante *Linkage Mapper* y *Circuitscape*

Una vez delimitadas y elegidas las teselas de hábitat, y obtenidos los mapas de resistencia, se llevó a cabo el análisis de conectividad mediante las extensiones de

ArcMap de Linkage Mapper y Circuitscape. Se decidió aplicar ambas herramientas ya que se consideran complementarias. La ejecución de estas herramientas se repitió por cada uno de los mapas de resistencias obtenidos en la anterior fase de estudio (mapas A y B), de modo que se obtienen cuatro modelos de conectividad diferentes para el oso. Tras la obtención de las rutas y corredores utilizados por la especie para moverse entre las teselas, se clasificaron en función de su calidad y funcionalidad potencial. Esto permitió comparar los resultados de los cuatro modelos con el fin de identificar los beneficios o deficiencias que supone aplicar uno u otro enfoque en este tipo de análisis.

5. Identificación de teselas de hábitat y corredores prioritarios - Conefor

En la tercera y última fase del análisis, se estimó la contribución que suponen los elementos de la red obtenidos a la conectividad global de la región de estudio, en términos de probabilidad de conectividad (siglas en inglés, PC). Para ello se utilizó, el software Conefor 2.6. Esta herramienta simula la desaparición o afección de cada uno de los elementos de la red por separado, y calcula la pérdida de conectividad global en % (dPC) que supondría dicho acontecimiento en la región, según las características intrínsecas del elemento, su ubicación dentro de la matriz, y su función como conector con el resto de teselas y rutas.

5. Resultados y discusión

5.1. Preferencias de hábitat y fiabilidad de los modelos de MaxEnt

Los diferentes modelos predictivos de MaxEnt mostraron patrones comunes, en cuanto a las preferencias de hábitat de la especie identificadas. Entre ellos, los resultados indican que los terrenos de bajas-medias pendientes, así como los ecosistemas ribereños y sus áreas adyacentes, son elementos clave del paisaje para la presencia del oso pardo y, por lo tanto, para su dispersión y el intercambio genético entre las poblaciones presentes en la región de estudio.

En cuanto al efecto de los factores antrópicos, los modelos muestran que la proximidad a infraestructuras humanas (carreteras y asentamientos) está directamente relacionada con la presencia de hábitat de oso. Esta observación puede venir explicada por la continuidad de las cubiertas forestales en la región de estudio, la proximidad de los cursos fluviales a las carreteras, así como la cercanía de las grandes ciudades como Brasov a áreas con un alto grado de naturalidad.

5.2. Corredores de oso y análisis comparativo de los enfoques aplicados

Como resultado de la comparación de los modelos obtenidos mediante Linkage Mapper y Circuitscape, a partir de los dos mapas de resistencia (*Fig. 5*), destaca la simplificación de los caminos obtenidos a partir del modelo de idoneidad, en

Figura 5. Caminos de mínimo coste acumulado con buffer de 1 km (verde) y zonas de menor resistencia al paso de la corriente (áreas rojas), identificadas por el oso pardo a partir de dos mapas de resistencias: (a) basado en los modelos de idoneidad de hábitat; (b) basado en la clasificación del territorio según criterio experto. En ambos mapas de conectividad se detectan estrechamientos de las franjas de corriente eléctrica p “cuellos de botella”. Estos son zonas críticas de enlace y prioritarias para la ejecución de medidas de conservación.

comparación con el método basado en criterio experto. No obstante, los resultados muestran coincidencias entre los dos enfoques metodológicos implementados, como la ubicación de las rutas obtenidas.

5.3. Tercera fase: Teselas de hábitat y corredores prioritarios para el oso pardo

Los resultados del análisis realizado con Conefor indican la importancia que tienen las grandes teselas de hábitat situadas en la región central sobre la conectividad global del paisaje, tanto por su extensión como por su localización en la red (Fig. 6). En cuanto a las contribuciones de los corredores como elementos de conexión, el análisis indica que los enlaces más importantes para el mantenimiento de la conectividad son los que unen las teselas longitudinales “6” y “5”; seguido de las rutas que conectan las teselas “1” y “3” (ver Fig. 6). La pérdida o afección de los cami-

Figura 6. Caminos de mínimo coste clasificados en función de su importancia como elementos conectores del paisaje en términos de dPC (%); y teselas de hábitat representadas en función de su contribución a la conectividad global en términos de dPC (%), según el escenario basado en criterio experto (escenario más restrictivo obtenido).

nos de mínimo coste que conectan estas teselas implicaría un efecto significativo en la probabilidad de conectividad global de la zona de estudio.

De acuerdo con la alta capacidad de dispersión del oso pardo, los resultados indican una contribución menor de las teselas vecinas, proveedoras de refugio a corto plazo, frente a las de alta calidad, que están más alejadas entre sí. Por otro lado, a pesar de mostrar tendencias irregulares, la Fig. 7 indica que los enlaces que superan los 5 km de longitud cuentan con contribuciones muy bajas en ambos escenarios de resistencia; destacando la contribución de aquellos con distancias entorno a los 2 km. A su vez, se ha hecho la misma relación con los valores de distancias de coste acumulado y se ha observado la sensibilidad evidente según aumenta su valor (Fig. 8). Se deduce de estos resultados que, además de preferir recorrer rutas de distancias menores de 5 km, el oso presenta una alta vulnerabilidad a elementos difícil de franquear, que suponen un coste elevado para el individuo.

Figura 7. Relación de la contribución de los corredores según su función como elementos conectores dPC (%) y la distancia del corredor en metros. Sólo se han representado los enlaces con dPC > 0. Cada gráfico muestra la relación para cada escenario de resistencia, MaxEnt o criterio experto.

Figura 8. Relación de la contribución de los corredores según su función como elementos conectores dPC (%) y la distancia del corredor en metros y en términos de distancia efectiva o de coste acumulado. Sólo se han representado los enlaces con dPC > 0. Cada gráfico muestra la relación para cada escenario de resistencia, MaxEnt o criterio experto.

En vista de estos resultados, se puede confirmar la gran utilidad de las metodologías aplicadas y del uso de datos empíricos, para localizar los corredores ecológicos para el oso pardo, así como para otras especies con gran capacidad de dispersión y requerimientos de hábitat similares, como las poblaciones de lobo y lince presentes en la región de estudio. La transferencia de conocimiento obtenido en este tipo de estudios debe servir de apoyo al diseño de medidas de conservación específicas y su integración en los planes territoriales a escala local, e incluso promover la coexistencia entre el oso y los humanos, junto a las medidas de información, participación, y de prevención y compensación por daños.

6. Conclusiones

1. Si bien los resultados de la modelización de idoneidad del hábitat para el oso muestran buenos parámetros de validación, las predicciones obtenidas se consideran poco realistas en las zonas con ausencia de datos de telemetría.
2. Frente a la aplicación de enfoques alternativos para la modelización de corredores, el escenario de resistencias basado en opinión experta resultó ser el más realistas de los dos. Sin embargo, no se han identificado evidencias suficientes para determinar la prevalencia de una metodología sobre otra. Por otro lado, los resultados de la modelización verifican la existencia de corredores potenciales para el movimiento de la especie, previamente identificados en trabajos anteriores. Este hecho evidencia la efectividad del método aplicado en el presente estudio.
3. De acuerdo con los índices obtenidos mediante Conefor, se puede afirmar que el tamaño de las teselas de hábitat es tan importante como la existencia de rutas que permitan a los osos dispersarse por trayectos de larga distancia. Adicionalmente, se debe destacar que no identificaron diferencias significativas entre los escenarios de resistencia para la identificación de zonas prioritarias.

Agradecimientos

Agradecemos a todo el equipo de cinegética del INCDS Marin Dracea (Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Forestal Marin Dracea), que ha contribuido a reunir el conjunto de datos analizados en el presente estudio. Además, deseo agradecer también el apoyo y colaboración puntual de los profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid, Joaquín Solana Gutiérrez y Sergio González Ávila.

7. Bibliografía

- Bohn, U.; Neuhäusl, R.; unter Mitarbeit von/ with contributions by Gollub, G.; Hettwer, C.; Neuhäuslová, Z.; Raus, Th.; Schlüter, H.; Weber, H.; (2000/2003): Karte der natürlichen Vegetation Europas / Map of the Natural Vegetation of Europe. Maßstab / Scale 1 : 2 500 000. Münster (Landwirtschaftsverlag). Pg 70.
- Chapron, G. *et al.* (2014). Recovery of large carnivores in Europe's modern human-dominated landscapes. *Science* 346, 1517. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.1257553>
- Drielsma, M.; Manion, G.; Ferrier, S.; (2007) 'The spatial links tool: Automated mapping of habitat linkages in variegated landscapes', *Ecological Modelling*, 200(3–4), pp. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.08.017>
- Fedorca, A. *et al.* (2019) 'Inferring fine-scale spatial structure of the brown bear (*Ursus arctos*) population in the Carpathians prior to infrastructure development', *Scientific Reports*. Springer US, 9(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45999-y>
- Fernández, N. *et al.* (2012) 'Brown bears at the edge: Modeling habitat constraints at the periphery of the Carpathian population', *Biological Conservation*, 153(September), pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.04.013>
- Hilty, J.; Worboys, G.; Keeley, A.; Woodley, S.; Lausche, B.; Locke, H.; Carr, M.; Pulsford I.; Pittock, J.; White, W.; Theobald, D.; Levine, J.; Reuling, M.; Ament, R.; Tabor, G.; (May 2019). (Draft) Guidance on safeguarding ecological corridors in the context of ecological networks for conservation. Gland, Switzerland: IUCN.
- Mateo Sánchez, M.C.; Cushman, S.A.; Saura, S.; (2014) 'Scale dependence in habitat selection: the case of the endangered brown bear (*Ursus arctos*) in the Cantabrian Range (NW Spain)', *International Journal of Geographical Information Science*. 2012 Taylor & Francis, 28(8), pp. 1531–1546. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.776684>
- Mateo-Sánchez, María C. *et al.* (2015) 'A comparative framework to infer landscape effects on population genetic structure: are habitat suitability models effective in explaining gene flow?', *Landscape Ecology*, 30(8), pp. 1405–1420. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0194-4>
- Popa, M.; Jurj, R.; Sirbu, G.; Ionescu, G.; Fedorca, A.; Ionescu, O.; (2018). Home range, daily and seasonal activity of brown bear (*ursus arctos*) in Southeastern Carpathians – a GPS/GSM telemetry study. Proceedings of the Biennial International Symposium "Forest and Sustainable Development" 8th Edition, 25th-27th of October 2018, Brasov, Romania.
- Popescu, V.D.; Artelle, K.A.; Pop, M.I.; Manolache, S.; Rozyłowicz, L.; (2016). Assessing biological realism of wildlife population estimates in data-poor systems. *Journal of Applied Ecology* 53:1248-1259. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12660>
- Posillico, M. *et al.* (2004) 'A habitat model for brown bear conservation and land use planning in the central Apennines', *Biological Conservation*, 118(2), pp. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2003.07.017>
- Saura, S.; Pascual-Hortal, L.; (2007) 'A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study', *Landscape and Urban Planning*, 83(2–3), pp. 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.005>
- Swenson, J.E.; Gerstl, N.; Dahle, B.; Zedrosser, A.; (2000) 'Action Plan for the conservation of the Brown Bear (*Ursus arctos*) in Europe'. Council of Europe Publishing.

- Webster, R.; Holt, S.; Avis, C.; Sturm, M.; (2001) 'The Status of the Carpathians. A report developed as a part of The Carpathian Ecoregion Initiative'. WWF Danube-Carpathian Programme.
- Ziółkowska, E. *et al.* (2016) 'Assessing differences in connectivity based on habitat versus movement models for brown bears in the Carpathians', *Landscape Ecology*, 31(8), pp. 1863–1882. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0368-8>