



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultad de Filosofía y Letras

Memoria del Trabajo de Fin de Grado

Fragmentación de hábitats protegidos por infraestructuras viarias de transporte en Mallorca: evaluación, diagnóstico y propuestas de gestión.

Rafel Rosselló Melis

Grado en Geografía

Año académico 2015-16

DNI del alumno:41572373-B

Trabajo tutelado por Jorge Lorenzo Lacruz

Departamento de Geografía

Se autoriza a la Universidad a incluir este trabajo en el Repositorio Institucional para su consulta en acceso abierto y difusión en línea, con finalidades exclusivamente académicas y de investigación

Autor		Tutor	
Sí	No	Sí	No
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Índice de contenidos

Lista de tablas	3
Lista de figuras	3
Lista de acrónimos	4
Resumen	5
1. Introducción	7
2. Área de estudio	11
3. Materiales y métodos	15
3.1. Medidas sobre las infraestructuras	16
3.1.1. Superficie ocupada por infraestructuras de transporte:	16
3.1.2. Intensidad media de uso:	17
3.1.3. Intersección con las infraestructuras:	17
3.2.1. Tamaño de las teselas:	17
3.2.2. Forma de las teselas:	17
3.2.3. Superficie con efecto borde:	17
3.3. Medidas basadas en la conectividad ecológica:	17
3.3.1. Modelos basados en superficies distancia-coste ponderado:	18
3.4. Medidas de gestión propuestas:	19
4. Resultados	20
4.1. Medidas sobre las infraestructuras:	21
4.1.1. Superficie ocupada por las infraestructuras:	21
4.1.2. Intensidad media de uso de las infraestructuras:	21
4.1.3. Intersección con las infraestructuras:	22
4.2. Medidas sobre las propiedades topológicas de los hábitats:	23
4.2.1. Tamaño de las teselas:	23
4.2.2. Forma de las teselas:	24
4.2.3. Superficie con efecto borde:	25
4.3. Medidas basadas en la conectividad ecológica:	27
4.3.1. Pequeños vertebrados:	27
4.3.2. Medianos y grandes vertebrados	27
4.4. Medidas de gestión propuestas:	28
4.4.1. Creación de corredores ecológicos:	28
4.4.2. Pasos de fauna:	29
5. Discusión	30
6. Conclusiones	34

Agradecimientos	34
Referencias bibliográficas	35

Lista de tablas

Tabla 1. Información geográfica utilizada en el estudio: procedencia y descripción.	16
Tabla 2. Coeficientes introducidos en el cálculo de las matrices de fricción de vertebrados pequeños y medianos o grandes.	18
Tabla 3. Superficie de hábitat ocupada por las infraestructuras de transporte en Mallorca.	21
Tabla 4. Localización, espacio natural protegido (ENP) más cercano, altitud y pendiente media de los pasos de fauna propuestos.	29

Lista de figuras

Fig 1. Representación temporal de la evolución en la composición y configuración del paisaje atribuible a la fragmentación de hábitats. Según García (2011).	8
Fig 2. Efecto borde causado por la construcción de una carretera. Según Jaeger, et al. (2011).	9
Fig 3. (Arriba) Vegetación forestal de Mallorca. Elaboración propia a partir del Banco de Datos de la Naturaleza, 2006. (Abajo) Perfil altitudinal de vegetación. Elaboración propia.	13
Fig 4. Red de carreteras de Mallorca y tráfico rodado (Intensidad Media Diaria registrada en el año 2014). Elaboración propia a partir de datos cedidos por el Consell de Mallorca.	15
Fig 5. Esquema metodológico para la elaboración del mapa de conectividad ecológica.	19
Fig 6. Esquema metodológico para la localización corredores ecológicos y pasos de fauna.	20
Fig 7. Intensidad media de uso de las infraestructuras de Mallorca según datos del departamento de carreteras del Consell de Mallorca (2014).	21
Fig 8. Área focal intersecada por una infraestructura de transporte.	22
Fig 9. (Arriba) Tamaño de las teselas LIC. (Abajo) Tamaño de las teselas ZEPA, ambas expresadas en hectáreas.	23
Fig 10. Forma de las teselas de LIC a partir del perímetro normalizado.	24
Fig 11. Forma de las teselas ZEPA a partir del perímetro normalizado.	25
Fig 12. Proporción de hábitat de borde respecto al hábitat interior de las teselas LIC.	25
Fig 13. Proporción de hábitat de borde respecto al hábitat interior de las teselas ZEPA.	26
Fig 14. Conectividad ecológica de Mallorca para pequeños vertebrados.	27
Fig 15. Conectividad ecológica de Mallorca para medianos y grandes vertebrados.	27
Fig 16. Localización del corredor ecológico.	29
Fig.17. Localización de los pasos de fauna propuestos.	30

Lista de acrónimos

LIC: Lugar de Importancia Comunitaria

ZEC: Zona de Especial Conservación

ZEPA: Zona de Especial Protección de Aves

SIG: Sistema de Información Geográfica

ZEIC: Zona de Especial Interés para la Conectividad

IMD: Intensidad Media Diaria

Resumen

La fragmentación de hábitats está considerada como una de las principales causas de la actual crisis de biodiversidad. Particularmente, la presencia de infraestructuras lineales de transporte representa una de las principales causas de la fragmentación de hábitats y sus efectos, una amenaza para la diversidad y riqueza de los hábitats y para la capacidad de dispersión de las especies. En este estudio se realiza una evaluación del estado de fragmentación de los hábitats protegidos (LIC y ZEPA) de Mallorca (Islas Baleares) y se analiza su relación con las infraestructuras viarias de transporte, a partir de la aplicación de distintos indicadores fisiográficos, morfométricos y de conectividad ecológica. Los análisis de conectividad ecológica se han fundamentado en el cálculo de matrices de fricción para el modelado de los movimientos de dispersión potenciales de distintos tipos de vertebrados. Posteriormente, se presentan una serie de medidas para la mitigación de los impactos detectados. En líneas generales, los análisis realizados muestran un mayor grado de fragmentación de los hábitats protegidos del norte de la isla y de la parte occidental de la Sierra de Tramuntana. Éstos últimos también presentan una mayor vulnerabilidad ante las perturbaciones externas, con una mayor proporción de hábitat de borde respecto al hábitat interior. En cuanto a los impactos causados por las carreteras, si bien la media de uso de las infraestructuras que atraviesan espacios mallorquines protegidos se sitúa en 5.500 vehículos/día, las mayores afecciones por tráfico rodado se concentran en determinados tramos de la sierra de Tramuntana y en el norte de la isla (bahía de Pollença, bahía de Alcudia y Artá), donde la intensidad de uso supera los 10.000 vehículos diarios. La conectividad ecológica de Mallorca es, en líneas generales, alta en las zonas de interior, media en las sierras de Tramuntana y Llevant y baja en las inmediaciones del área metropolitana de Palma. Sin embargo, a escala de detalle aparecen patrones de conectividad muy variables que se han tenido en cuenta para el diseño de las medidas de mitigación de los impactos. Estas medidas incluyen la creación de un corredor ecológico que facilite la conexión de los espacios protegidos en la zona Puigpunyent-Esporles, y la construcción de 9 pasos de fauna que favorezcan la permeabilización de la red viaria para el desplazamiento y dispersión de los vertebrados en la sierra de Tramuntana. Este estudio representa la primera aproximación científica al problema de la fragmentación de hábitats en Mallorca, una isla que soporta una altísima presión antrópica y que posee red de carretera de elevada densidad, aportando al mismo tiempo medidas de gestión de aplicabilidad directa y sencilla.

Palabras clave: *fragmentación, conectividad ecológica, red de carreteras, conservación de la biodiversidad, sistemas de información geográfica, región Mediterránea.*

1. Introducción

Históricamente, las relaciones entre las sociedades humanas y el medio natural han provocado una progresiva transformación del territorio, que se ha intensificado en las últimas décadas debido a un incremento de la población, la sobreexplotación de recursos y una capacidad tecnológica sin precedentes (Santos y Tellería, 2006), las cuales han ocasionado repercusiones significativas en la biodiversidad. La magnitud de estas transformaciones, especialmente las ocurridas durante el siglo XX, comprometen la conservación de los ecosistemas y organismos que los habitan (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

Un factor clave de transformación del territorio es la fragmentación de hábitats, la cual es considerada por numerosos autores como una de las principales causas de la crisis global de biodiversidad en la que estamos inmersos y una de las mayores amenazas para la conservación de hábitats y ecosistemas singulares (García, 2011; Santos y Tellería, 2006; Gurrutxaga y Lozano, 2010). Fundamentalmente, la fragmentación disminuye el territorio disponible para los hábitats, lo que provoca a su vez una creciente atomización de sus poblaciones faunísticas (Santos y Tellería, 2006). El concepto de fragmentación de hábitats varía en función del enfoque epistemológico del autor. Lindenmayer y Fischer (2006), definen la fragmentación como *un cambio en la estructura y configuración de los hábitats naturales dentro de un paisaje*, mientras que Hargis *et al.* (1999), Myers *et al.* (2000), Múgica de la Guerra *et al.* (2002) o Brook *et al.* (2003), citado en Szek (2012, p.209) sostienen que *la fragmentación se refiere principalmente a la pérdida y degradación de hábitats ya que un fragmento del paisaje es transformado para un diferente tipo de uso de la tierra*. Así mismo, existen otras aproximaciones teóricas que basan su definición en aspectos ambientales diversos (Szek, 2012).

Desde una perspectiva morfológica-espacial, la fragmentación conlleva la transformación de los ecosistemas y hábitats en un conjunto de *parches* aislados (fragmentos), rodeados de otros hábitats, distintos al original, denominados *matriz* (García, 2011). Esta alteración de hábitats o ecosistemas se traduce en un cambio progresivo en el paisaje, haciendo visible una pérdida de superficie de hábitat original, un aumento de los fragmentos de matriz y un aumento de la relación perímetro/superficie, lo que origina un incremento del efecto borde¹ (Martín *et al.*, 2006; Santos y Tellería, 2006; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010; García, 2011; Szek, 2012) (véase en **Fig.1**).

Forman (1995), identifica cinco estadios en el proceso de transformación del territorio: (1) Perforación del hábitat: aparición de aberturas en un hábitat continuo. (2) Disección del hábitat: división del hábitat por un elemento antrópico. (3) Fragmentación del hábitat. (4) Reducción del hábitat: disminución del tamaño del hábitat sin división. (5) Desaparición del hábitat: sustitución del hábitat original por uno nuevo. Es importante destacar la importancia del dinamismo temporal del proceso de modificación del paisaje, tal y como lo hace notar Forman en sus estudios (Szek, 2012), ya que los efectos de la fragmentación no son lineales, sino que se multiplican al alcanzar un porcentaje de hábitat destruido (Santos y Tellería, 2006). Las causas que explican la fragmentación de los hábitats son diversas, aunque la intensificación de la agricultura y el aprovechamiento forestal, la expansión urbanística y los procesos de industrialización, y la construcción de infraestructuras de transporte emergen como las principales. (Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J., 2010 y EUROPARC-España, 2009).

¹ El **efecto borde** consiste en el aumento de la relación perímetro/área de los fragmentos de hábitat en el paisaje, provocando una mayor permeabilidad de los procesos de fragmentación ante la influencia de los ambientes periféricos (Gurrutxaga y Lozano, 2006).

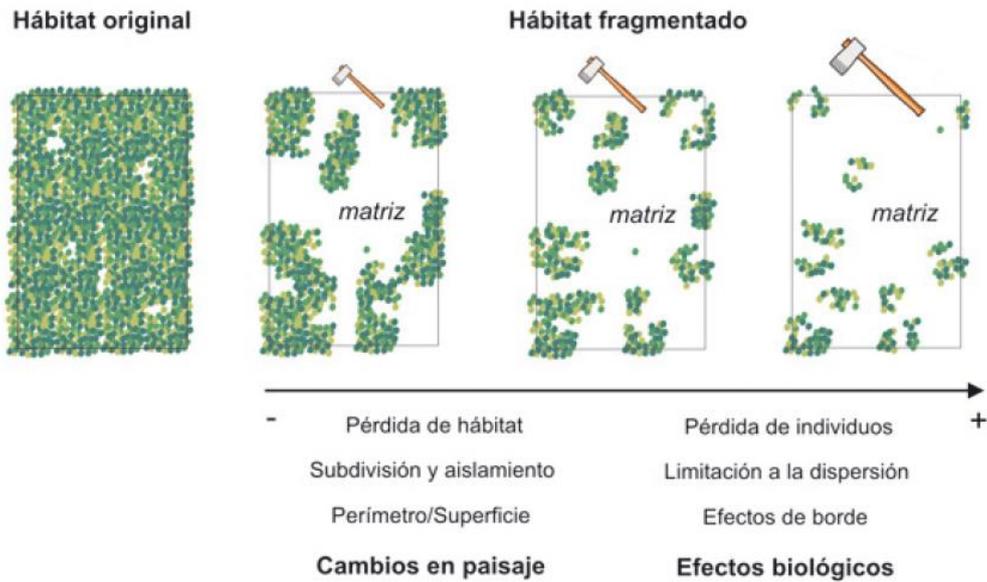


Fig 1. Representación temporal de la evolución en la composición y configuración del paisaje atribuible a la fragmentación de hábitats. Según García (2011).

Durante los últimos veinte años, la comunidad científica ha mostrado interés en el estudio de los efectos (biológicos) de la fragmentación de hábitats. Muestra de ello, según García (2011) existían en 2010 alrededor de 10.000 publicaciones sobre fragmentación², de las cuales, 1.900 se publicaron en el período comprendido entre 2009 y 2010. Se describen dos causas que explican la relativa abundancia de literatura sobre el tema: por una parte, tal y como se ha mencionado antes, la fragmentación de hábitats se considera causa directa de la crisis de biodiversidad global, hecho que incita a los científicos a la búsqueda de soluciones a dicha crisis; por otra parte, el concepto *fragmentación* resulta ser un potente integrador de teorías ecológicas (García, 2011).

La reciente proliferación bibliográfica sobre los efectos de la fragmentación de hábitats ha obligado a una revisión de los conceptos. El Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010) detalla 7 tipos de efectos que las infraestructuras lineales de transporte ejercen sobre los hábitats en términos de fragmentación:

- I. **Destrucción de hábitats:** corresponde a la pérdida física de hábitats, no solo por el trazado de las infraestructuras sino también por la afectación colindante de las mismas.
- II. **Disminución del tamaño de los hábitats:** la implantación de infraestructuras lineales de transporte provoca una división de los hábitats en fragmentos más pequeños que, inevitablemente, supone una menor capacidad de albergar individuos tal y como postula la Teoría de la Biogeografía de Islas de MacArthur y Wilson (1967). Además, la fragmentación de hábitats favorece el descenso de especies especialistas a favor del incremento de las especies generalistas³ (Gascon *et al.*, 1999) citado en (Gurrutxaga y Lozano, 2006, p.37) provocando un incremento de las especies invasoras (Rivard *et al.* 2000; With *et al.* 2002; Bakker y Wilson 2000), citados en (Gurrutxaga y Lozano, 2006, p.37). Por otra parte, el aislamiento provocado por la insularidad del área de estudio (Mallorca) favorece la aparición de endemismos que representan taxones únicos, propios y exclusivos de una región concreta.

² Según García (2011), realizó una búsqueda bibliográfica de artículos publicados en revistas internacionales a través de palabras claves como "hábitat fragmentation" y "forest fragmentation".

³ Una **especie generalista** es aquella capaz de prosperar en una gran variedad de condiciones ambientales haciendo uso de diversos recursos. Por el contrario, una **especie especialista** necesita de unos recursos y condiciones ambientales determinadas.

- III. **Efecto borde:** la disminución del tamaño de los fragmentos se asocia con el aumento de la relación perímetro/superficie (Santos y Tellería, 2006). Alrededor de estos fragmentos se establece una banda perimetral con gradiente de condiciones ambientales desde el interior hacia el borde, produciendo una zonificación (véase en Fig.2). El efecto borde en infraestructuras lineales de transporte produce perturbaciones diversas como: difusión de contaminante tanto atmosféricos como sólidos; ruido generado por el tráfico rodado; contaminación lumínica procedentes de las fuentes de luz fija y de los mismos vehículos; y frecuentación antrópica como consecuencia del aumento de accesibilidad implícita que aporta la infraestructura. Así mismo, la fragmentación también puede ocasionar consecuencias ecológicas manifestadas en alteraciones microclimáticas dentro y alrededor de los fragmentos, modificando significativamente los flujos naturales de radiación, viento, agua y nutrientes (Szek, 2012).

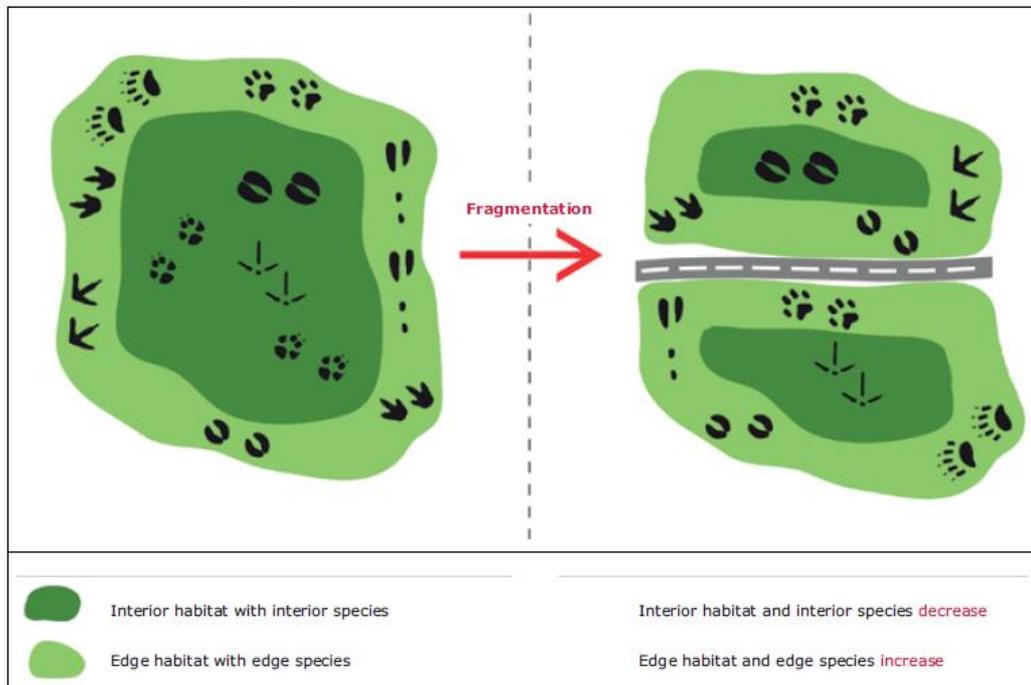


Fig 2. Efecto borde causado por la construcción de una carretera. Según Jaeger, et al. (2011).

- IV. **Procesos del margen de las infraestructuras:** los márgenes de las carreteras se caracterizan por elementos específicos que dan lugar a efectos biológicos específicos como: la creación de nuevos hábitats, la canalización de la dispersión de los organismos o la canalización de los flujos de agua y sedimentos.
- V. **Efectos de barrera y filtro:** las infraestructuras restringen la dispersión natural de las especies dependiendo de las características físicas de la vía y de las pautas de comportamiento de la especie (Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J., 2010). Según afirma Mader (1984), citado en (Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J., 2010, p.150), la existencia de la infraestructura –superficie con sustrato artificial, desprovista de vegetación y transitada por vehículos como fuente lumínica y sonora– puede tener un efecto etológico⁴ sobre algunas especies que evitan cruzarla y tienden así al aislamiento poblacional. El efecto barrera no solamente produce impactos en el medio biótico, en el medio abiótico puede afectar en los procesos hidrogeológicos de los acuíferos.
- VI. **Mortalidad por atropello:** las colisiones de vehículos con animales supone un problema de seguridad vial creciente que depende de las características de la vía, la intensidad de

⁴ Etológico entendido como el comportamiento animal en su medio natural.

tráfico, la abundancia de organismos y el espacio por donde transcurre la infraestructura.

- VII. **Desarrollo urbano inducido:** la mejora de accesibilidad implícita en una infraestructura puede inducir al desarrollo urbanístico en sus alrededores. La isla de Mallorca, así como las demás Islas Baleares, han sufrido un aumento exponencial de sus infraestructuras como demanda del sector turístico acuñado bajo el concepto de *balearización*.

La complejidad e interrelación de los elementos de los sistemas naturales provoca que cualquier alteración denote cambios drásticos y frecuentemente irreversibles en el medio (Szek, 2012). Según indica el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010), la fragmentación por infraestructuras de transporte, elementos lineales que ocupan una reducida superficie aunque presentan una elevada intensidad de uso, aporta efectos particulares sobre el medio ambiente, tanto en fase constructiva como en fase de explotación. Dichos efectos operan en diferentes escalas y pueden actuar de forma sinérgica. Normalmente, las vías de alta capacidad ofrecen mayor impacto ya que toleran una mayor cantidad de vehículos. Sin embargo, el resto de vías, si bien no soportan altas cantidades de tráfico, se extienden por una mayor proporción de territorio, implicando un efecto significativo.

El presente estudio se centra en la fragmentación causada por infraestructuras lineales de transporte por carretera. *La implantación de las infraestructuras induce cambios en el territorio, tanto estructurales (urbanización) como funcionales (incremento del volumen del tráfico)* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010), afectando, además, a la permeabilidad del paisaje, hecho que conlleva la creación de un efecto barrera⁵ (Forman *et al.*, 2003). Según afirma la Agencia Europea de Medio Ambiente (2004) *la mitad de las áreas protegidas del continente europeo se ven ya sometidas a presiones ambientales por infraestructuras de transporte*. Ante esta situación, se pone de manifiesto la necesidad de fomentar una infraestructura verde que permita el desplazamiento de las especies entre los diferentes espacios naturales protegidos, a través de la adopción de *un enfoque integrado de la gestión del suelo y una cuidadosa planificación estratégica del territorio* (Unión Europea, 2010); del mismo modo, la evaluación de la situación actual de fragmentación de hábitats y la posterior propuesta de alternativas y medidas de gestión resulta de gran importancia para la conservación de la biodiversidad en el ámbito local y regional.

El presente documento propone identificar dónde se produce la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte (descartando el transporte ferroviario y las sendas y pistas forestales) y evaluar su intensidad en los límites insulares de Mallorca. Además, se completará el estudio aportando medidas correctoras para mitigar o eliminar los efectos adversos de dicha fragmentación en las zonas más afectadas. La elaboración de este estudio pretende generar conocimiento sobre el estado de conservación de los hábitats mallorquines que pueda servir de herramienta de gestión para las administraciones, constituyendo un *mecanismo eficiente para mitigar los efectos de las transformaciones (ecológicas) en la conservación de los valores naturales del territorio* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

Los objetivos principales planteados en este trabajo son: (1) *evaluar la fragmentación de hábitats protegidos en Mallorca y estudiar su relación con la presencia de infraestructuras viarias de transporte* y (2) *proponer una serie de medidas de gestión para la mitigación o eliminación de los impactos detectados*. Para la consecución de estos objetivos principales, se han planteado los siguientes objetivos secundarios:

⁵ El **efecto barrera** consiste en *la dificultad que tienen los animales para cruzar la superficie de la vía, ya sea debido a la existencia de obstáculos [...] o bien a consecuencia del rechazo en muchos animales el cruce de una superficie asfaltada, sin refugios y altamente perturbada por el paso de vehículos, ruido y contaminación* (Ministerio de Medio Ambiente, 2006).

- Aplicar los indicadores propuestos por la metodología del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010).
- Estimar el grado de conectividad ecológica en Mallorca mediante la creación de matrices de fricción para vertebrados terrestres.
- Valorar los resultados obtenidos e identificar las áreas más afectadas por la fragmentación.
- Proponer la creación de corredores ecológicos de acuerdo con las necesidades ecológicas detectadas.
- Favorecer la permeabilidad de las vías de transporte que atraviesan espacios protegidos mediante la ubicación óptima de pasos de fauna.

2. Área de estudio

La isla de Mallorca (3.640 km²), situada en el mar Mediterráneo occidental y ubicada entre las coordenadas 39°16' - 39°58' N y 2°21' - 3° 29' E, es la mayor del archipiélago Balear (73% de la extensión total). Su configuración fisiográfica responde básicamente a tres unidades definidas (Moragues, 1993; Robledo, 2005; Giménez *et al.*, 2014): (1) la Sierra de Tramuntana, que corresponde al *horst* noroccidental de Mallorca, donde se encuentran las mayores elevaciones orográficas (1.445 m., Puig Major). (2) Las sierras de Levante, que corresponden al *horst* oriental de Mallorca, y están caracterizadas por altitudes menores. Ambos sistemas montañosos mantienen una disposición NE-SW que limitan un llano central o *graben* denominado "es Pla" (3). Esta configuración fisiográfica determina la organización territorial de la isla (infraestructuras, asentamientos urbanos, etc.) y los aspectos bióticos de flora y fauna. Geológicamente, en zonas de relieve predominan las rocas calizas y dolomíticas del Jurásico inferior (lías) y Triásico, mientras que en la llanura aluvial del Pla predominan arcillas del Mioceno y depósitos aluviales del Cuaternario. El sistema hidrográfico de Mallorca presenta la ausencia de cursos fluviales permanentes, aunque en episodios lluviosos el agua es canalizada a través de torrentes que recorren prácticamente toda la isla. Asimismo, las aguas subterráneas suponen el 95% de los recursos hídricos de las Baleares (Giménez *et al.*, 2014). Climatológicamente, la existencia de un marcado período de déficit hídrico estival, la irregularidad y el régimen torrencial de las precipitaciones, y unas temperaturas suaves en invierno y muy cálidas en verano, caracterizan el clima mediterráneo propio de la isla de Mallorca.

Recogiendo la definición aportada en el artículo 1 de la Directiva de hábitats 92/43/CEE (22 de julio de 1992), se entiende como hábitat aquellas *zonas terrestres o acuáticas diferenciadas por sus características geográficas, abióticas y bióticas, tanto si son enteramente naturales o seminaturales*. Así pues, el presente estudio analiza los hábitats naturales afectados por fragmentación de carreteras que se encuentren dentro de áreas focales, entendiendo a las mismas como zonas que dispongan de una protección ambiental. Mallorca dispone de diversas figuras de protección ambiental organizadas, básicamente, en cuatro escalas competenciales: internacionales, europeas, estatales y autonómicas. El presente estudio de la fragmentación de hábitats, centra el análisis en la escala europea, la cual aporta dos figuras de protección ambiental: Lugares de Interés Comunitario (LIC) y Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA), ambas figuras jurídicas son autónomas aunque comparten la misma filosofía. Los LIC son propuestos por las distintas administraciones competentes, posteriormente deben ser designados como Zonas de Especial Conservación (ZEC)⁶, estas junto con las ZEPAs componen la Red Natura 2000.

⁶ Para la declaración de ZEC es necesaria la aprobación de un Plan de Gestión. En Baleares, no existe ningún ZEC.

Según el artículo 2 de la Directiva hábitats 92/43/CEE (22 de julio de 1992): *La presente Directiva tiene por objeto contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora en el territorio europeo de los Estados miembros al que se aplica el Tratado.*

Según el artículo 1 de la Directiva aves 2009/147/CE (26 de enero de 2010):

(1) *La presente Directiva se refiere a la conservación de todas las especies de aves que viven normalmente en estado salvaje en el territorio europeo de los Estados miembros en los que es aplicable el Tratado. Tendrá como objetivo la protección, la administración y la regulación de dichas especies y de su explotación.* (2) *La presente Directiva se aplicará a las aves, así como a sus huevos, nidos y hábitats.*

A nivel biótico, en Baleares la flora autóctona asciende a 1.729 taxones agrupándose en sólo 8 familias. Los terófitos son la forma vital más numerosa y la tasa de endemidad es del 10% de la flora autóctona (173 taxones) (Rita y Payeras, 2006). Concretamente en Mallorca, según apunta Rita, J. y Payeras, T. (2006), existen un total de 1445 taxones de flora y 1348 especies. En cuanto a endemismos, Mallorca cuenta con 125 especies endémicas⁷. Las series de vegetación que coexisten en Mallorca se organizan de acuerdo con las variaciones en la distribución de los factores ecológicos tales como: temperatura, humedad, salinidad, topografía, etc. (Llorens *et al.*, 2007).

La vegetación del litoral de Mallorca está caracterizada por sus adaptaciones a factores ecológicos como el viento, la salinidad o incluso la falta de suelo desarrollado. Especies como *Pancreatium maritimum*, *Eryngium maritimum*, *Ammophila arenaria* (en zonas arenosas o dunares) *Crithmum maritimum*, *Launaea cervicornis* (en zonas rocosas y acantilados) predominan en estos hábitats litorales. En ambientes halófilos como las albuferas y salobres la vegetación presenta una notable tolerancia a la salinidad dotando a sus especies de una presión osmótica alta que les permite contrarrestar la presencia de sal en sus tejidos. Así pues, *Phragmites australis*, *Juncus acutus* o *Tamarix spp.* son especies características de dichos ambientes. Estos hábitats litorales en ocasiones se combinan con zonas de chaparrales, pinares y sabinas en aquellas zonas donde la presión urbanística es menor. A medida que aumenta la distancia respecto de la costa los factores ecológicos litorales disminuyen y aparecen zonas dedicadas al cultivo, chaparrales y en ocasiones proliferan pinares de acebuche fuertemente condicionadas por presiones urbanísticas. En campos abiertos predominan especies como *Chrysanthemum coronarium*, *Galactitis tomentosa* y *Cynara cardunculus*, además de dos especies de gramíneas como *Avena sterilis* y *Hordeum murinum*. Otras especies características de este hábitat son *Asphodelus aestivus*, *Ceratonia siliqua* y *Prunus dulcis*, estos dos últimos forman parte de especies arbóreas históricamente introducidas. En zonas donde aumenta la topografía y, consecuentemente disminuye la presión urbanística, irrumpen los encinares y pinares de *Pinus halepensis*. El sotobosque del pinar no es tan rico en nutrientes como el del encinar, lo que condiciona la variedad vegetal de un sotobosque y otro. En pinares crecen arbustos como *Arbutus unedo*, *Pistacia lentiscus* y *Erica multiflora*. En encinares crecen arbustos como *Arbutus unedo* y *Juniperus oxycedrus*, plantas trepadoras como *Smilax aspera* y especies endémicas como *Cyclamen balearicum*. A mayor altura aparece *Euphorbia dendroides*, *Phillyrea latifolia* y *Rhamnus ludovici-salvatoris*. Finalmente, en zonas culminares (a partir de 1.000 m. aproximadamente) las condiciones ambientales determinan el crecimiento de especies. Dichas condiciones ambientales y las dificultades de accesibilidad han perpetuado la preservación de estas zonas. Así pues, la mayoría de especies que proliferan estos espacios son endémicas. En zonas culminares aparecen chaparrales de montaña con especies arbóreas aisladas como *Taxus baccata*, *Acer granatense* y *Buxus balearica*. También coexisten especies como *Hypericum balearicum*, *Pastinaca lucida*, *Santolina chamaeyparissus* y *Paeonia cambessedesii*. Predominan

⁷ Incluyendo los taxones descritos del género *Limonium*.

especies vegetales con estructuras espinescentes y acojinadas resistentes al viento como por ejemplo *Astragalus balearicus*.

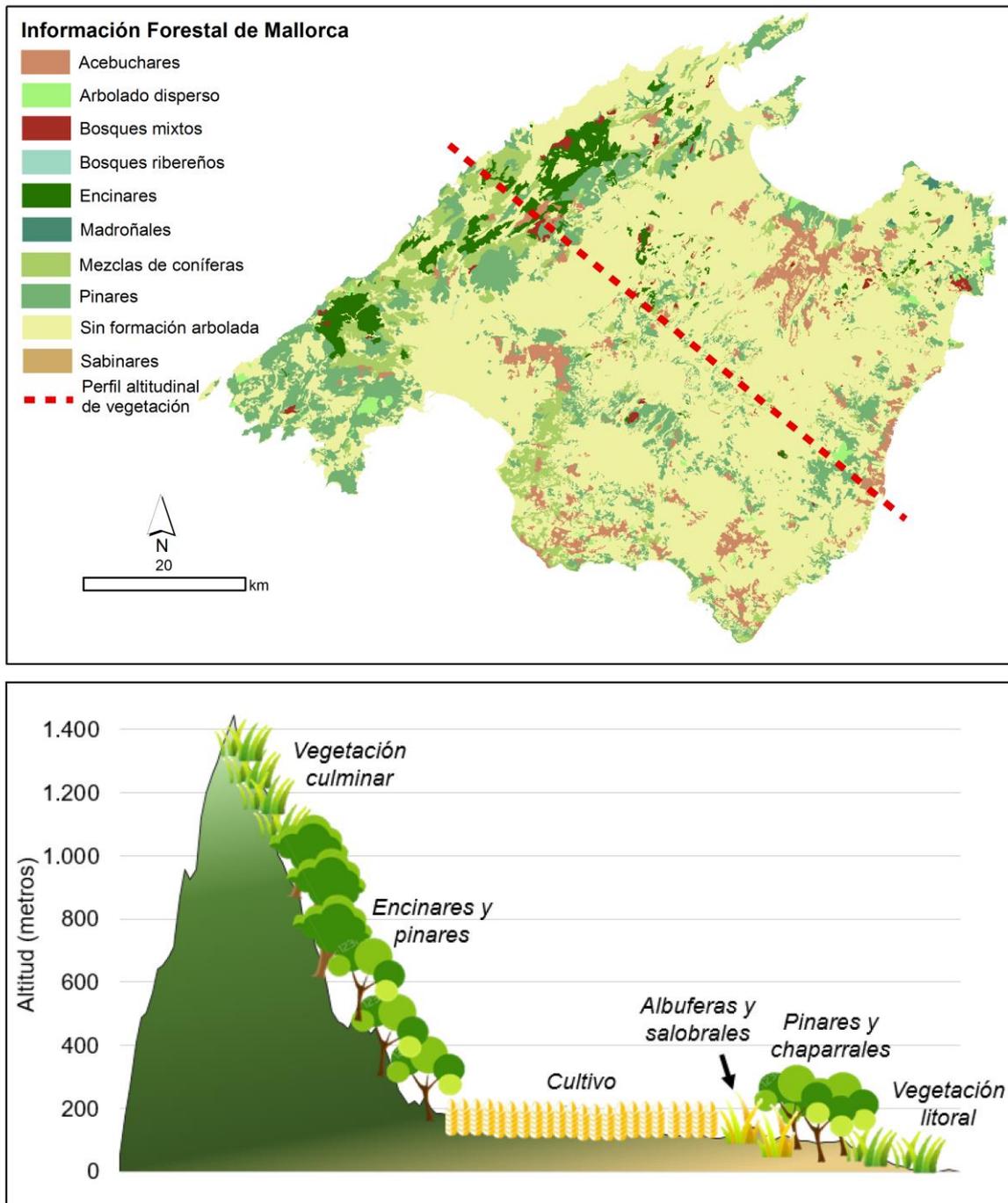


Fig 3. (Arriba) *Vegetación forestal de Mallorca*. Elaboración propia a partir del Banco de Datos de la Naturaleza, 2006. (Abajo) *Perfil altitudinal de vegetación*. Elaboración propia.

A nivel faunístico, aunque la fragmentación de hábitats influye a todas las especies, el análisis se ha centrado en los vertebrados. Según la aportación de Viada (2006) en el Libro Rojo de los Vertebrados de las Baleares, los anfibios son sensibles a los cambios ambientales debido a su dificultad de dispersión y recolonización, sus restricciones fisiológicas, su baja movilidad y su doble ciclo de vida. Las condiciones ambientales de las islas no favorecen la supervivencia de los anfibios. Así pues, de las tres especies de anfibios presentes en Mallorca, tan sólo una es autóctona y endémica: el ferreret (*Alytes muletensis*), siendo las demás especies introducidas

como consecuencia de la actividad humana. La relevancia de reptiles en Baleares se centra en dos lagartijas endémicas (*Podarcis lifordi* y *Podarcis pityusensis*), las únicas especies, al igual que el ferreret, supervivientes de la fauna plio-pleistocénica de Baleares (Viada, 2006). El resto de reptiles son alóctonos. Probablemente, *el factor de amenaza más grave es la pérdida, fragmentación y degradación del hábitat, difícil de controlar en islas turísticas como Baleares* (Viada, 2006), así como también la introducción de especies. Según el resultado de la evaluación del riesgo de extinción de los reptiles de Baleares, un 23% se encuentra amenazado. En Mallorca existen dos especies: la culebra viperina (*Natrix maura*) y la culebra de cogulla (*Macroprotodon cucullatus*).

La fauna silvestre de mamíferos de Baleares (solamente los mamíferos terrestres) está formada por 32 especies, 20 de las cuales son murciélagos (Serra, *et al.*, 2011). El resto de especies han sido introducidas por el hombre, dando lugar incluso a procesos de subespeciación. Finalmente, en cuanto a las aves, son el grupo de vertebrados con más especies de las Baleares, con un total de 355 especies citadas según el GOB (Grup Balear de Ornitologia) y varios autores. Existen dos especies endémicas: la pardela balear (*Puffinus mauretanicus*) y la curruca balear (*Sylvia balearica*). Las principales causas de extinción de la avifauna consideradas son la presencia de especies alóctonas invasivas y pérdida y degradación de hábitat. Cabe destacar que la conservación de aves ha motivado a la Unión Europea la creación de una norma exclusiva a su protección: Directiva 79/409/CEE.

En cuanto a la infraestructura de carreteras de la isla de Mallorca, la cual será objeto de estudio, dispone de 5.959,08 kilómetros (2012) de longitud. La red de carreteras sigue una estructura radial, de manera que la mayoría de vías de la isla –particularmente las vías de alta capacidad– convergen en el área metropolitana de Palma, siendo ésta el área central funcional, administrativa y poblacional de Mallorca (Rodríguez y Gutiérrez, 2012). Las vías de alta capacidad que unen Palma con Peguera (Ma-1), sa Pobla a través del eje del *Raiguer* (Ma-13), Lluçmajor (Ma-19) y, aunque no esté catalogada como autopista/autovía, debido a las características de la vía, se considera vía de alta capacidad la carretera (Ma-15) hasta Manacor. Estos cuatro ejes jerarquizan la red de carreteras de Mallorca, agregándose a éstos el resto de carreteras convencionales.

La densidad de la red de carreteras de Mallorca es de 0,58 kilómetros de infraestructura por km². La red de carreteras presenta mayor densidad por kilómetro cuadrado en las inmediaciones de la ciudad de Palma, debido a su carácter neurálgico, y en el centro de la isla coincidiendo con una fisiografía suave y relieve poco pronunciado. Por el contrario, las zonas con relieve abrupto como el centro y norte de la sierra de Tramuntana, la densidad de la red es menor, al igual que la zona de la marisma de Lluçmajor. Curiosamente, la zona de la península de Artà, aunque dispone de un relieve pronunciado, presenta una densidad de red notoria justificada por el desarrollo de Cala Ratjada como centro turístico y por las antiguas instalaciones portuarias.

En cuanto a la distribución del tráfico rodado a través de la red, los aforamientos de IMD (Intensidad Media Diaria), según los registros cedidos por el departamento de carreteras del Consell de Mallorca (2014), muestran una clara confluencia de las mayores densidades alrededor de la capital, canalizados a través de vías de alta capacidad que se extienden jerarquizando las carreteras de la isla, con valores que oscilan entre 40.000 y 90.000 vehículos/día. Las demás carreteras convencionales presentan intensidades que no suelen rebasar los 30.000 vehículos/día. En zonas abruptas donde transcurren carreteras sinuosas y/o estrechas las densidades son menores, como por ejemplo en la Sierra de Tramuntana, o en carreteras secundarias del interior de Mallorca.

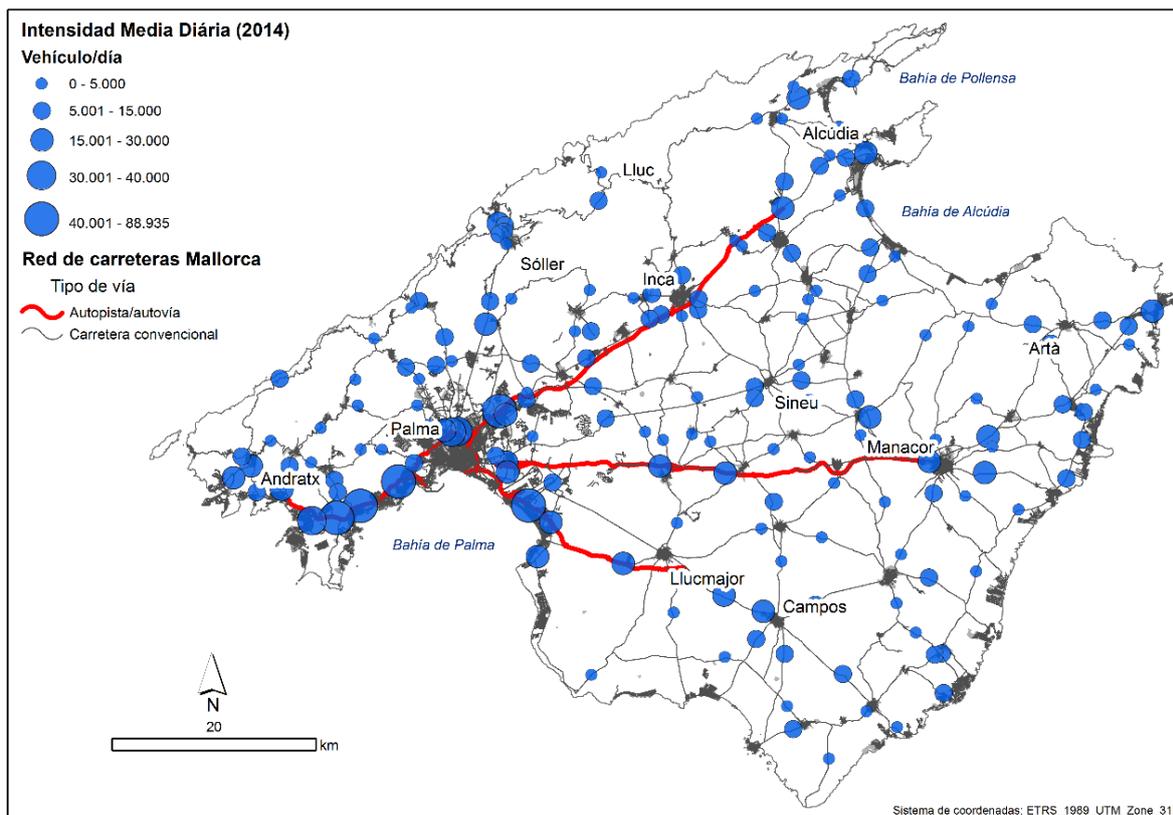


Fig 4. Red de carreteras de Mallorca y tráfico rodado (Intensidad Media Diaria registrada en el año 2014). Elaboración propia a partir de datos cedidos por el Consell de Mallorca.

3. Materiales y métodos

La fragmentación de hábitats comprende procesos complejos que tienen afectación sobre aspectos diversos del paisaje. El concepto paisaje considerado en el presente estudio es el de “un territorio espacialmente continuo y de escala kilométrica que contiene uno o varios ecosistemas formando un mosaico” (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). Para la realización del presente trabajo se ha seguido la metodología propuesta por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010), consistente en la aplicación de una serie de indicadores⁸ basados en parámetros fisiográficos y morfológicos, relacionados con la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de carreteras, a través de su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Partiendo de la cartografía básica descrita a continuación, los distintos análisis realizados han permitido la modelización y generación de nuevas capas de información espacial y la obtención de numerosos resultados orientados a la consecución de los objetivos descritos en la sección anterior.

⁸ Se entiende por **indicador** a una medida, categórica o numérica, que permite resumir una o más variables complejas de forma simple y seguir su evolución a lo largo del tiempo.

Nombre	Fuente	Características
LIC	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información vectorial poligonal que muestra la localización de las zonas declaras LIC de Baleares.</i>
ZEPA	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información vectorial poligonal que muestra la localización las zonas declaras ZEPA de Baleares.</i>
Red de Carreteras (2012)	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información vectorial lineal que representa las carreteras convencionales, autopistas y autovías de Baleares.</i>
Intensidad Media Diaria (2014)	Consell de Mallorca	<i>Capa de información vectorial de multipuntos que contiene el número medio de vehículos que pasan por las 170 estaciones de aforo localizadas en las carreteras de Mallorca.</i>
Mapa Forestal de España (2006)	Banco de Datos de la Naturaleza	<i>Capa de información vectorial poligonal cuya base de datos se compone de una serie de campos descriptores de la ecología y estructura de las masas. Contiene información referida a los usos del suelo vegetal.</i>
Modelo Digital de Elevaciones 100m.	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información raster que contiene las elevaciones de Mallorca con una resolución de 100 metros.</i>
Pistas forestales	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información vectorial lineal referente a pistas forestales.</i>
Cursos fluviales	CartoSSIGT UIB	<i>Capa de información vectorial lineal que contiene los cursos fluviales (permanentes y no permanentes) de Mallorca.</i>

Tabla 1. Información geográfica utilizada en el estudio: procedencia y descripción.

La información cartográfica sobre LIC, ZEPA y Red de Carreteras ha sido proporcionada por el repositorio de datos geográficos CARTOSSIGT de la Universidad de las Islas Baleares. No obstante, para la obtención de la información de aforamientos de IMD, ha sido necesaria la solicitud de transferencia de datos al departamento de carreteras del Consell de Mallorca.

Posteriormente se realizó una selección de los indicadores más representativos sobre el estado de fragmentación actual de la isla de Mallorca, propuestos por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en el informe técnico “Indicadores de fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte” (2010). Los indicadores presentados en el análisis están incluidos en tres grupos jerarquizados según su complejidad creciente:

3.1. Medidas sobre las infraestructuras: aportan información indirecta sobre la afectación ecológica de las infraestructuras de transporte en la fragmentación de los hábitats.

3.1.1. Superficie ocupada por infraestructuras de transporte:

Este indicador resulta del cálculo de la superficie (en hectáreas) ocupada por infraestructuras, diferenciando autopistas/autovías de las carreteras convencionales, considerando una anchura media de 35 y 14 metros respectivamente.

3.1.2. *Intensidad media de uso:*

Se determina la cantidad de vehículos que transitan diariamente por las vías, quedando registrados en las estaciones de aforamiento de vehículos que se encuentren dentro o a 300 metros de un área focal LIC o ZEPA.

3.1.3. *Intersección con las infraestructuras:*

Este indicador muestra la longitud (en metros) de infraestructura de carreteras que penetran dentro de áreas focales o de especial interés.

3.2. Medidas sobre las propiedades topológicas de los hábitats: aportan información sobre las características morfométricas de los hábitats, su cohesión y la intensidad del efecto borde que les afecta.

3.2.1. *Tamaño de las teselas:*

Este indicador topológico surge directamente del concepto más puro de fragmentación (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010) y consiste en la medición de las superficies (en hectáreas) de los LIC y ZEPA considerados en el presente análisis como área focales.

3.2.2. *Forma de las teselas:*

Algunos indicadores de fragmentación miden aspectos de forma como la relación área/perímetro a través de medidas diversas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). En este trabajo se ha utilizado el perímetro normalizado (Pn), que a diferencia del tradicional ratio área/perímetro, resume de forma más ajustada las características morfológicas de las teselas y es resultado de:

$$Pn = \frac{P}{P'}$$

Donde P corresponde al perímetro de la tesela, mientras que P' corresponde al perímetro circular del mismo área que la tesela de estudio, ya que el círculo es la forma geométrica con una menor relación área/perímetro. Los valores inferiores a 1 representan aquellas áreas focales donde el perímetro real (P) es inferior al perímetro circular para la misma área (P'), mientras que un valor superior a 1 representa lo contrario. Por lo tanto, se considera que los valores alejados a 1 tienden a formas más sinuosas y menos compactas o cohesionadas.

3.2.3. *Superficie con efecto borde:*

El efecto borde aumenta debido a la implantación de infraestructuras de transporte que atraviesan áreas focales, reduciendo así la relación área/perímetro y aumentando la incidencia de las perturbaciones externas (contaminación lumínica y acústica). Precisamente, el siguiente indicador mide la superficie de borde teniendo en cuenta la irrupción de infraestructuras de transporte. Aunque el efecto borde varía dependiendo de las condiciones de cada hábitat y de las características de cada carretera, según la bibliografía consultada (Rosell *et al.*, 2003), citado en Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010, p.102), se recomienda establecer un efecto borde entre 200 y 500 metros para el borde del área focal y un efecto borde de hasta 400 metros para las carreteras. De esta manera, y para unificar criterios, se estableció un borde alrededor del área focal de 300 metros y otro borde para cada lado de la carretera de 200 metros.

3.3. Medidas basadas en la conectividad ecológica: aportan información sobre las condiciones que presenta el territorio para la movilidad de las distintas especies.

3.3.1. Modelos basados en superficies distancia-coste ponderado:

La utilización de modelos distancia-coste ponderado proporciona información sobre el esfuerzo o dificultad que supone para una determinada especie o grupo de especies alcanzar un punto del territorio desde su origen (Sastre *et al.*, 2002). Esta dificultad o esfuerzo depende tanto de las características del medio biótico como de las capacidades de dispersión de los organismos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

En este caso, se ha considerado la elaboración de dos índices de conectividad ecológica debido a las distintas capacidades de dispersión de los vertebrados de Mallorca: un índice para los vertebrados pequeños (altura no superior a los 10 cm.) y otro para los vertebrados medianos o grandes (altura superior a los 10 cm.). La capacidad para desplazarse en entornos con vegetación densa, las necesidades bióticas de cada especie o la simple capacidad de pasar desapercibidos para los humanos son algunos de los rasgos diferenciales entre ambos vertebrados, lo que ha incitado a su diferenciación.

Valores de fricción		
Categoría	Vertebrados pequeños	Vertebrados grandes
Usos del suelo		
<i>Agua</i>	1	10
<i>Humedal</i>	1	8
<i>Cultivo</i>	1	1
<i>Artificial</i>	5	10
<i>Monte arbolado</i>	1	1
<i>Monte arbolado disperso</i>	1	1
<i>Monte arbolado ralo</i>	1	5
<i>Monte desarbolado</i>	1	1
Cursos fluviales		
<i>Permanente</i>	1	3
<i>No permanente</i>	1	1
Infraestructuras de transporte según IMD		
<i>Más de 40.000</i>	10	10
<i>40.000-30.000</i>	8	8
<i>30.000-15.000</i>	7	7
<i>15.000-5.000</i>	5	5
<i>5.000-0</i>	3	3
Curvatura del terreno		
<i>Convexo</i>	5	5
<i>Cóncavo</i>	1	1
Pistas forestales	2	2
Pendientes		
<i>0-5%</i>	1	1
<i>5-10%</i>	1	3
<i>10-20%</i>	5	5
<i>Más del 20%</i>	8	8

Tabla 2. Coeficientes introducidos en el cálculo de las *matrices de fricción de vertebrados pequeños y medianos o grandes*.

De esta forma, se calculó una matriz de fricción considerando los distintos usos del suelo, cursos fluviales, infraestructuras de transporte, la curvatura del terreno, la presencia de pistas

forestales y las pendientes (véase en **Tabla 2**). Cada categoría presenta un valor de fricción tanto para pequeños vertebrados como para medianos y grandes.

La suma de cada capa de información raster reclasificada con su valor de fricción correspondiente resulta en el mapa de conectividad ecológica (véase en **Fig. 5**). A partir de dichos mapas de conectividad pueden calcularse rutas de mínimo coste, las cuales tienen aplicación directa para el diseño de redes y corredores ecológicos (Brown y Veitch, 1995; Bielsa, 1996; Pearson *et al.*, 1996 y Barrio *et al.*, 1998) citados en Sastre *et al.* (2002, p.2).

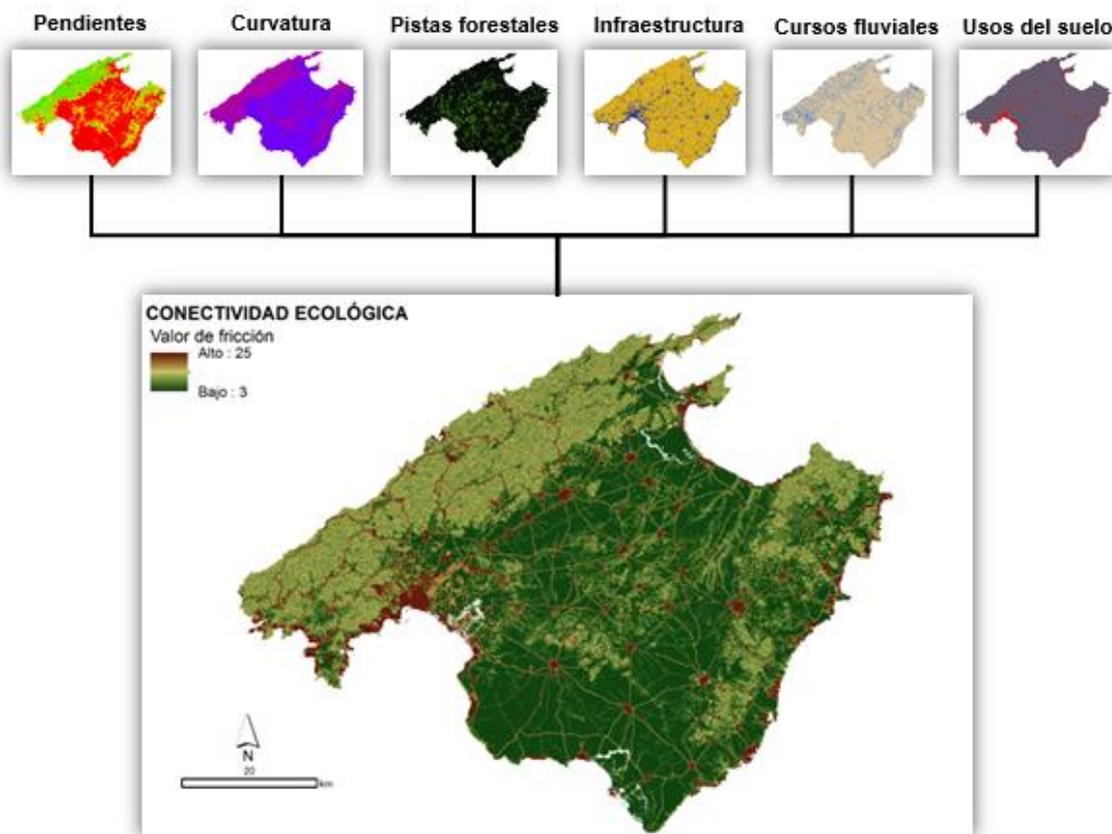


Fig 5. Esquema metodológico para la elaboración del mapa de conectividad ecológica.

3.4. Medidas de gestión propuestas:

Una vez que los procesos de reducción y fragmentación son identificados, se plantean medidas que solucionen o mitiguen los impactos descritos a través de los indicadores. Para dar solución a los problemas detectados a través de los indicadores calculados anteriormente, se proponen algunas medidas de gestión bajo la premisa de conservar la conectividad ecológica territorial mediante el establecimiento de corredores ecológicos y pasos de fauna entre las áreas protegidas. Las medidas de gestión se aplican a LICs, puesto que los ZEPAs son zonas destinadas a aves, cuyas capacidades de dispersión y movilidad no se ven tan afectadas por la fragmentación de hábitats ni por la presencia de vías de transporte.

La localización de corredores ecológicos y pasos de fauna se resuelve a partir de la cartografía de la conectividad ecológica, cuyas fricciones determinan la movilidad óptima de los vertebrados analizados. Así pues, a través de la superficie de fricción se calcula la distancia ponderada, es decir, el coste de viaje acumulado y ponderado según la matriz de fricción correspondiente. Estos cálculos se realizaron mediante el software ArcGIS Desktop®, utilizando las herramientas *Cost distance* y *Cost back link*. La combinación de la distancia-coste ponderada y

el sentido del desplazamiento ponderado permite determinar la ruta óptima de un origen a un destino concretos usando la herramienta *Cost Path* (véase en **Fig. 6**).

A través de la combinación de diversos factores de fragmentación, resultado de los análisis realizados a partir de los indicadores propuestos en el presente trabajo (tamaño, forma y presión antrópica), se han podido determinar aquellos LICs más perjudicados por la fragmentación. Una vez identificada la zona de actuación, se sugiere la creación de un corredor ecológico declarando el espacio afectado como Zona de Interés para la Conectividad (ZEIC). Por otra parte, se propone la creación de pasos de fauna en aquellas zonas donde la ruta óptima modelada se puede ver interrumpida por una carretera.

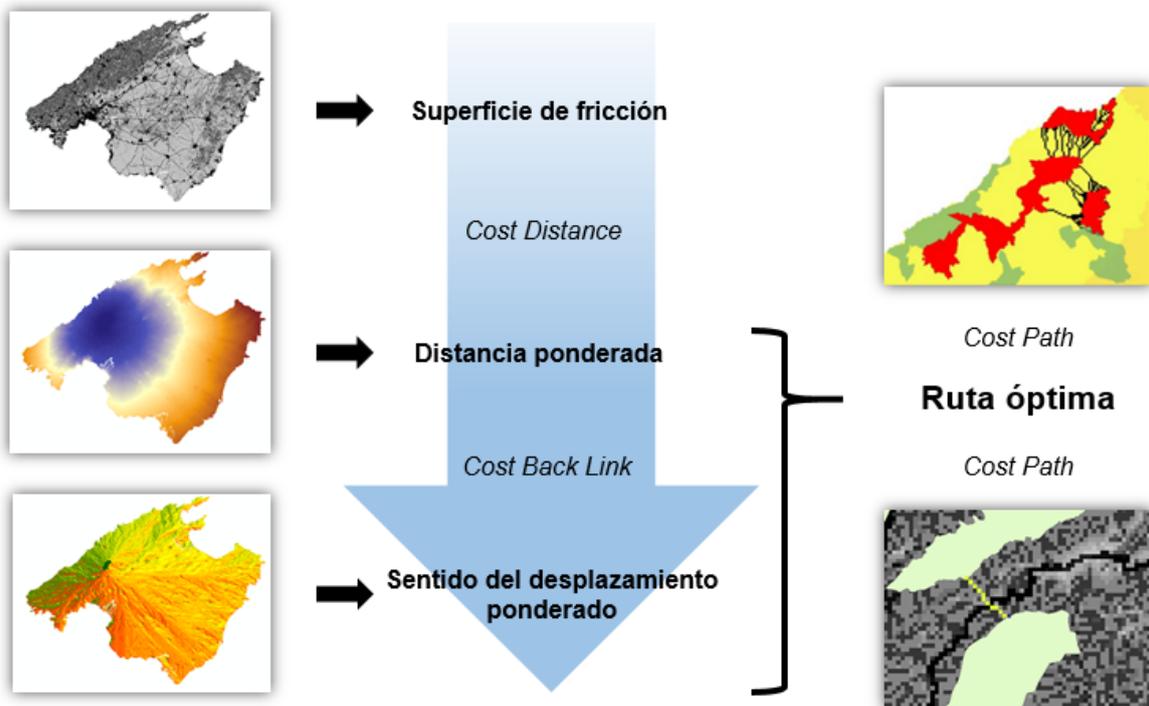


Fig 6. Esquema metodológico para la localización corredores ecológicos y pasos de fauna.

4. Resultados

La fragmentación de hábitats es un proceso complejo que engloba un gran número de patrones y efectos muy diversos sobre el medio ambiente, difícilmente medibles (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). No obstante, los indicadores permiten realizar una aproximación relativamente certera a la realidad. A continuación se exponen los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los indicadores propuestos y los análisis de conectividad ecológica.

4.1. Medidas sobre las infraestructuras:

4.1.1. Superficie ocupada por las infraestructuras:

Superficie ocupada por las infraestructuras						
	Sup.	% Sup.	LIC	% LIC	ZEPA	% ZEPA
Autopista/Autovía	876,84 ha.	0,24%	0	0%	0	0%
C. convencional	7.030,12 ha.	1,93%	176,52 ha.	0,29%	130,57 ha.	0,24%
Mallorca	363.570,	100%	60.351 ha.	100%	53.579 ha.	100%

Tabla 3. Superficie de hábitat ocupada por las infraestructuras de transporte en Mallorca.

Mallorca cuenta con 7.906,96 ha. ocupadas por infraestructuras de transporte por carretera (2,17% de la superficie de la isla), de las cuales, 876,84 ha. corresponden a vías de alta capacidad, mientras que 7.030,12 ha. corresponden a carreteras convencionales. El 31% de la superficie total de Mallorca presenta algún tipo de protección medioambiental, ya sea LIC o ZEPA. De esta superficie, 176,52 ha. LIC se destinan a vías convencionales, mientras que los espacios ZEPA son atravesados por 130,57 ha. de carreteras convencionales. No existe ningún espacio declarado como LIC o ZEPA atravesado por vías de alta capacidad.

4.1.2. Intensidad media de uso de las infraestructuras:

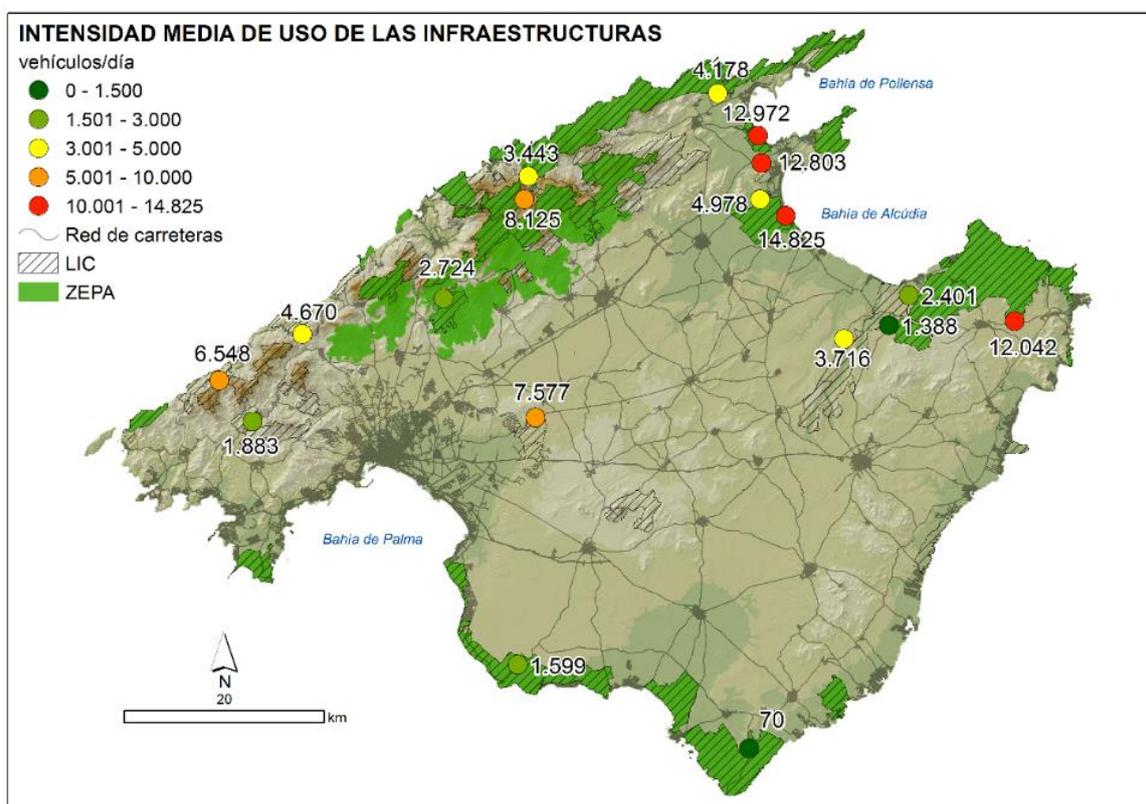


Fig 7. Intensidad media de uso de las infraestructuras de Mallorca según datos del departamento de carreteras del Consell de Mallorca (2014).

En cuanto a la intensidad de tráfico registrada en las carreteras que transcurren por espacios declarados LIC o ZEPA, o a menos de 300 metros, la media de presión es de 5.500 vehículos/día. Se pueden observar registros superiores a los 10.000 vehículos/día en 4 de los 18 puntos (**Fig. 7**), localizados en torno a la costa nororiental de Mallorca (Ma-12 y Ma-2220) y en la península de Artà (Ma-15). A su vez se observan intensidades de tráfico de magnitud media y alta en los espacios protegidos de Tramuntana. Por el contrario, en espacios situados al sur de

Mallorca, la intensidad media de uso de las infraestructuras disminuye por debajo de los 1.000 vehículos/día. La *Albufera de Alcudia* es el espacio natural protegido que recibe una mayor intensidad de uso, con 14.825 vehículos/día, mientras que el espacio natural protegido de *Ses Salines* presenta una presión de 70 vehículos/día.

4.1.3. Intersección con las infraestructuras:

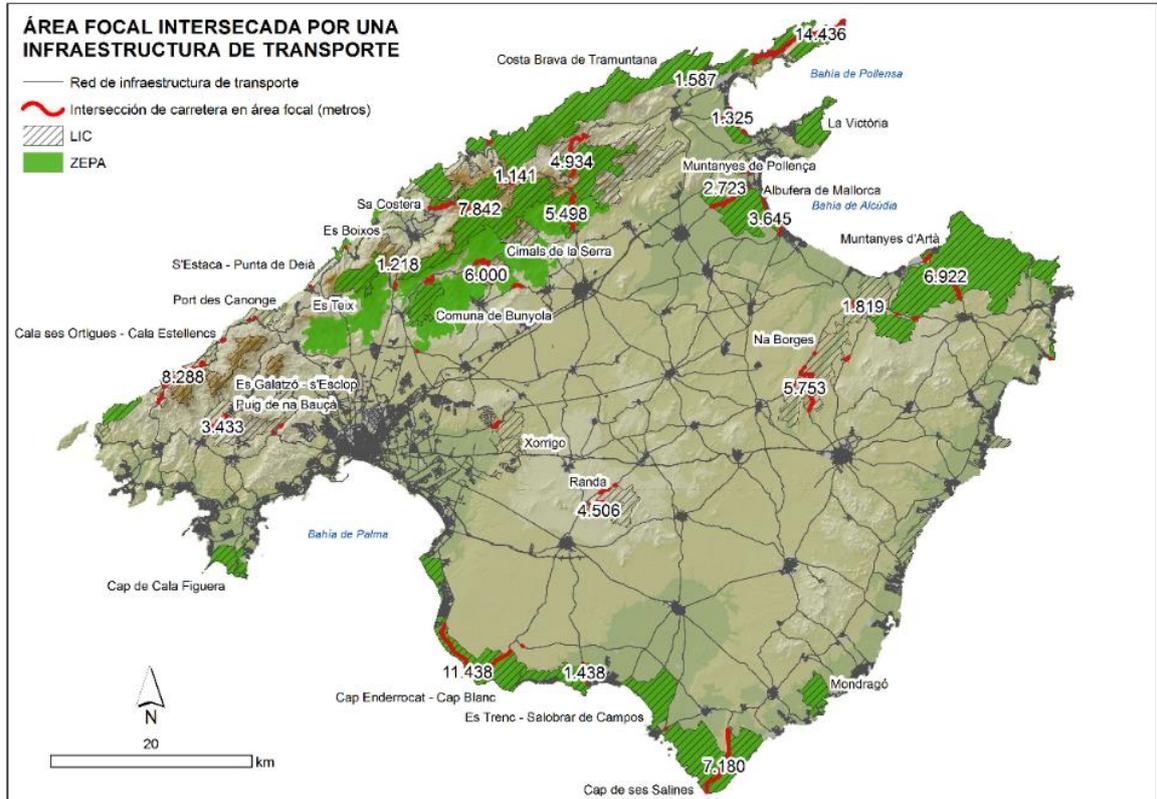


Fig 8. Área focal intersecada por una infraestructura de transporte.

La figura 8 muestra la longitud de los tramos de carretera que intersectan con algún hábitat protegido. Un total de 112.369 metros de carreteras intersectan un área focal LIC (102.658 m.) o ZEPA (75.882 m.), teniendo en cuenta que 66.171 metros transcurren en ambos espacios. Esto supone que un 5,3% del total de la red de carreteras, intersectan con un área focal. Al noroeste de Mallorca, coincidiendo con la sierra de Tramuntana, se observa una mayor intersección de áreas focales, puesto que se trata de un espacio altamente protegido por diversas figuras de protección. De media, los espacios protegidos se encuentran intersecados por 1.887 metros de infraestructura viaria. En cuanto a los valores extremos, el área focal intersecada con más metros de infraestructura es *Formentor*, con un total de 14.436 metros de infraestructura de carretera, seguido de *Cap Enderrocat-Cap Blanc*, con 11.438 metros de carretera. En la parte central de la sierra de Tramuntana es observable una desigual intersección longitudinal de las infraestructuras, con valores comprendidos entre los 1.000 y 8.000 metros.

4.2. Medidas sobre las propiedades topológicas de los hábitats:

4.2.1. Tamaño de las teselas:

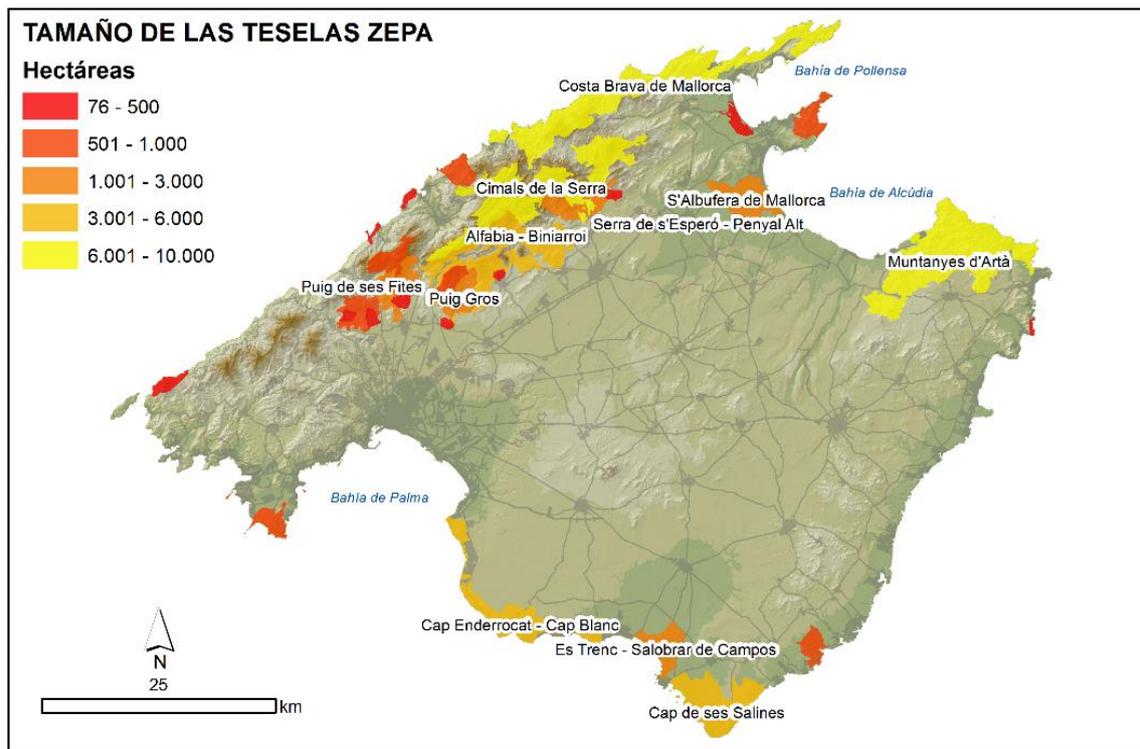
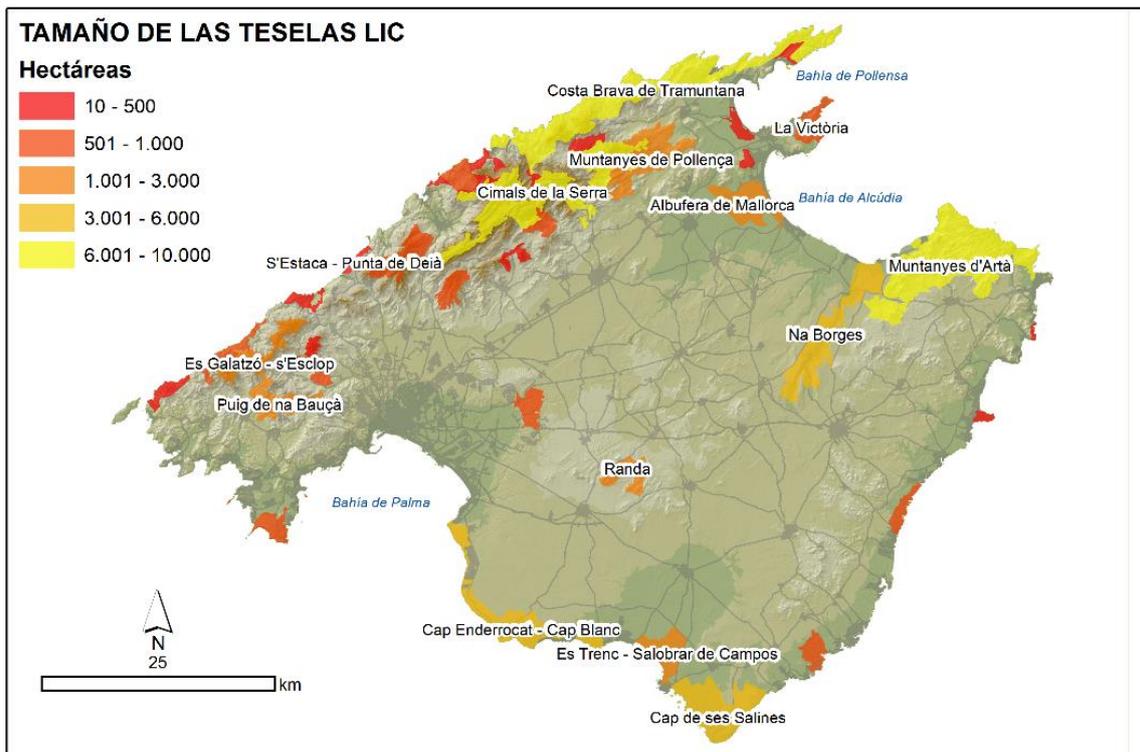


Fig 9. (Arriba) *Tamaño de las teselas LIC.* (Abajo) *Tamaño de las teselas ZEPA, ambas expresadas en hectáreas.*

La figura 9 (arriba) muestra el tamaño de las áreas bajo la figura de protección LIC. Siguiendo el mismo patrón general que el indicador anterior, la sierra de Tramuntana presenta cierta complejidad. Particularmente, se observa una mayor concentración de LICs de pequeñas dimensiones, algunos de ellos limítrofes entre sí, en la zona más occidental de la isla. Así pues,

destacan los LICs de *Monnàber* y *Es Binis* con una superficie inferior a 100 hectáreas. En cuanto a los ZEPAs (**Fig. 9**, abajo), solamente destaca el de *Cap Vermell*, situado en la vertiente litoral oriental, que cuenta con una superficie de 75 ha., siendo éste el único espacio ZEPA con una superficie inferior a 100 hectáreas. Las teselas con mayores superficies se localizan en la Costa brava de Mallorca (8.310 ha.) y en las Muntanyes d'Artà (9.085 ha.), coincidiendo tanto LICs como ZEPAs. En la sierra de Tramuntana, ambas tipologías de espacios naturales protegidos presentan superficies extensas al noreste, viéndose gradualmente disminuidas sus dimensiones a medida que se localizan más al suroeste.

4.2.2. Forma de las teselas:

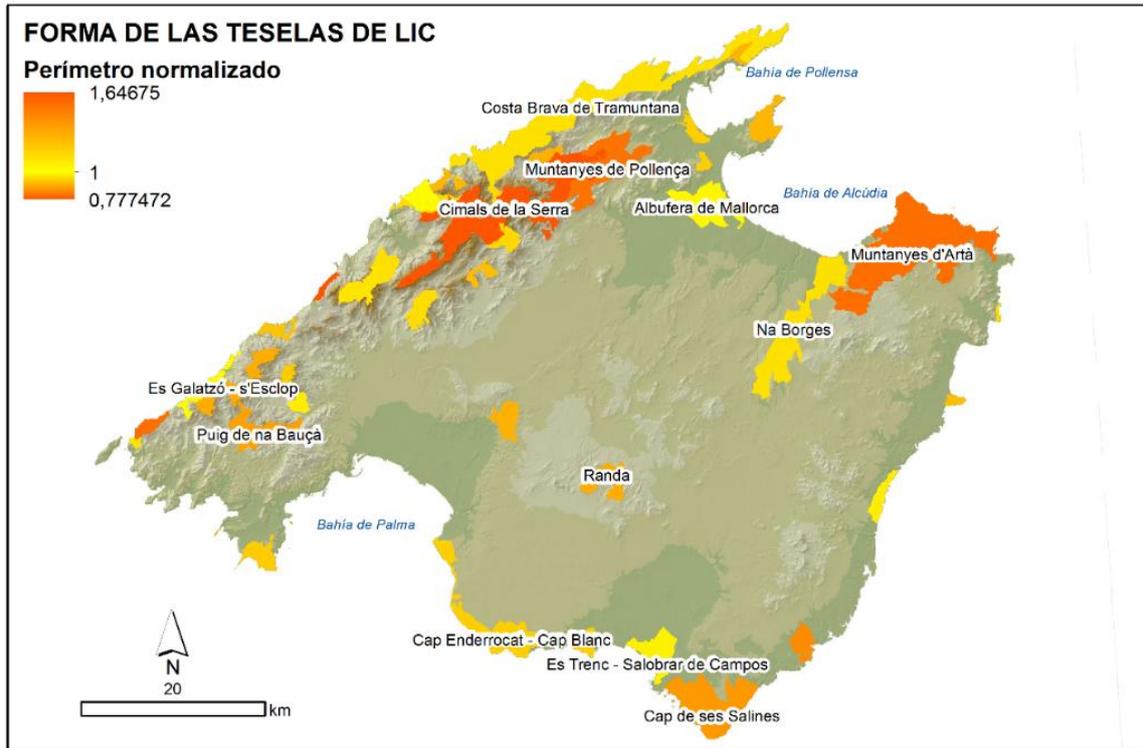


Fig 10. Forma de las teselas de LIC a partir del perímetro normalizado.

Las figuras 10 y 11 presentan una medida del grado de sinuosidad de los hábitats mallorquines catalogados como LIC y ZEPA respectivamente. El perímetro normalizado medio de los espacios naturales catalogados como LIC es de 1,13, presentando una amplitud entre el valor más bajo y el más alto de 0,87. Las teselas que presentan un perímetro normalizado próximo a 1 y por lo tanto tienen una forma poco sinuosa, más cohesionada, son los LICs *Serra d'en Salat* (0,97) y *Sa Costera* (1,02). Contrariamente, los LICs de *Cimals de la Serra* y *Muntanyes d'Artà* presentan los valores de perímetro normalizado más alejados a 1 y por consiguiente, tienden a formas más sinuosas. El perímetro normalizado con un valor más bajo corresponde al LIC *s'Estaca-Punta de Deià* (0,77).

En cuanto a los ZEPAs el perímetro normalizado medio se encuentra en 1,20 y la amplitud de sus valores es de 1,94, por tanto presentan unas formas más variadas y menos cohesionadas que los LICs. Las áreas focales que presentan valores próximos a 1 son *Cap Vermell* (0,95) y *Sa costera* (1,02). Por el contrario, destaca la sinuosidad de la ZEPA *Alfabia-Biniarroi* la cual presenta un perímetro normalizado de 2,75 que denota su significativa sinuosidad, seguido del *Puig de ses Fites* (1,77). El valor más bajo del perímetro normalizado es el correspondiente a *La Trapa* (0,81).

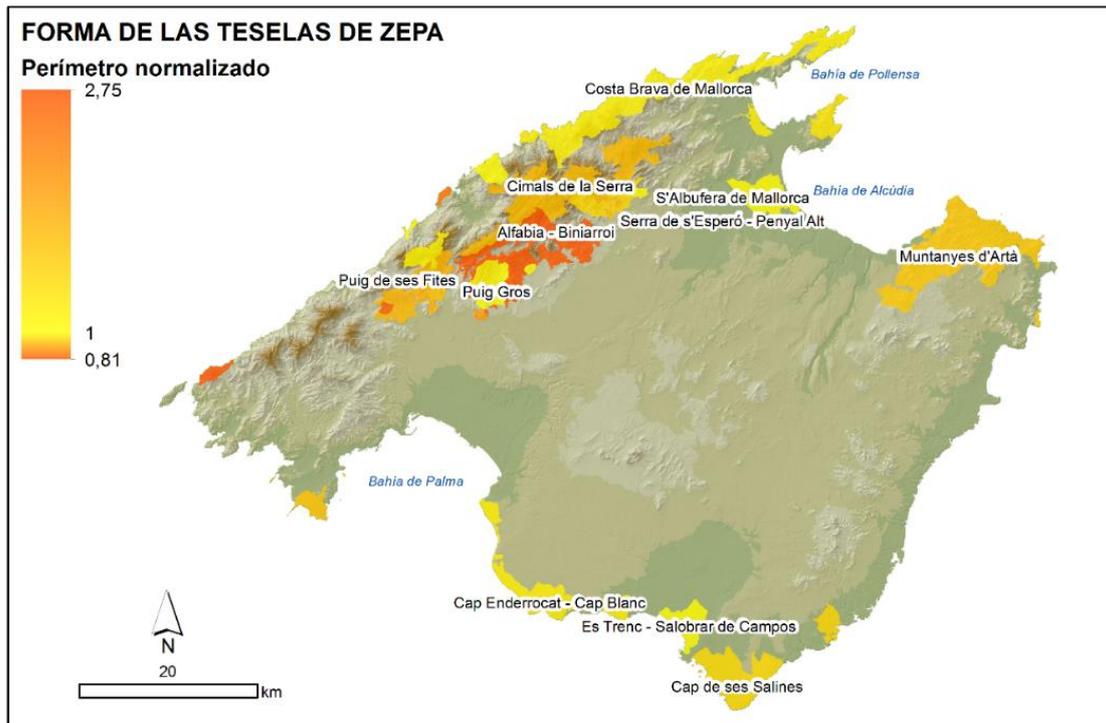


Fig 11. Forma de las teselas ZEPA a partir del perímetro normalizado.

4.2.3. Superficie con efecto borde:

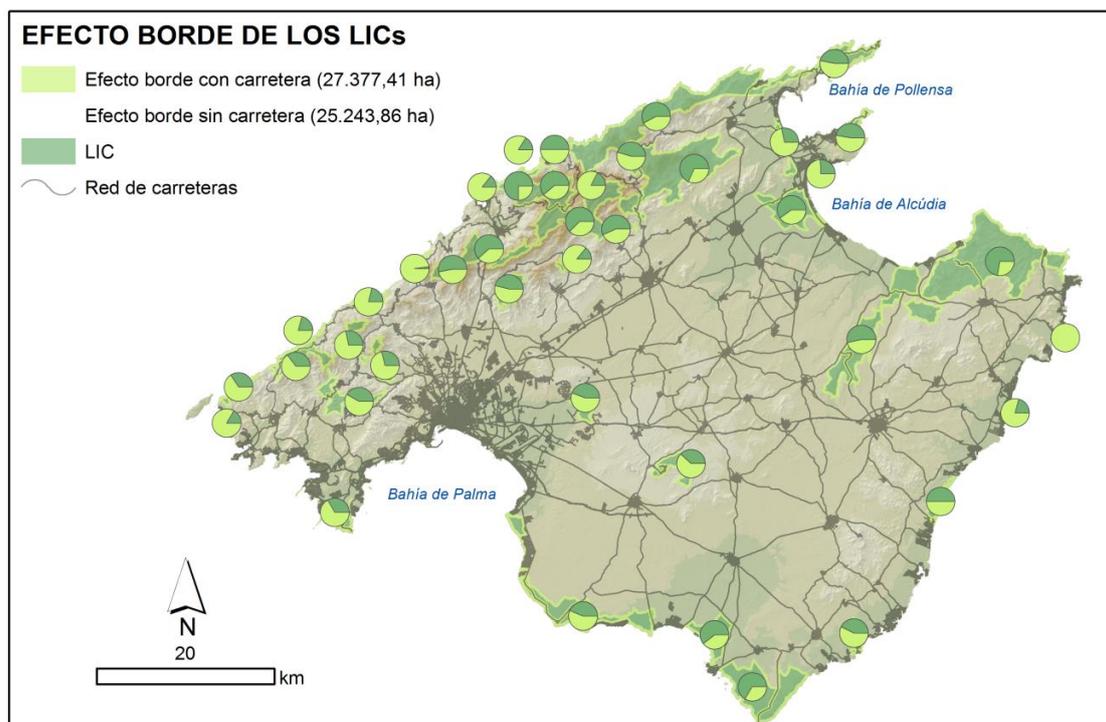


Fig 12. Proporción de hábitat de *borde* respecto al hábitat interior de las teselas LIC.

Las figuras 12 y 13 muestran una representación cartográfica de las zonas LIC y ZEPA afectadas por los procesos asociados a los bordes de hábitats. Los LICs presentan una superficie total de 60.351 hectáreas, con una superficie de borde sin infraestructuras de transporte de

25.243,86 hectáreas. Esto supone que el 42% de la superficie de los LICs son espacios borde. Con la implantación de infraestructuras de carretera, la superficie total del borde de hábitat aumenta un 3,5% (2.130 hectáreas). Tal y como se puede observar en el mapa (véase en Fig. 12), los LICs más afectados por el efecto borde, en valores relativos, son Es Binis y Cap Vermell (ambos 100%), mientras que el LIC menos afectado es Sa Costera, con 24,9% de efecto borde.

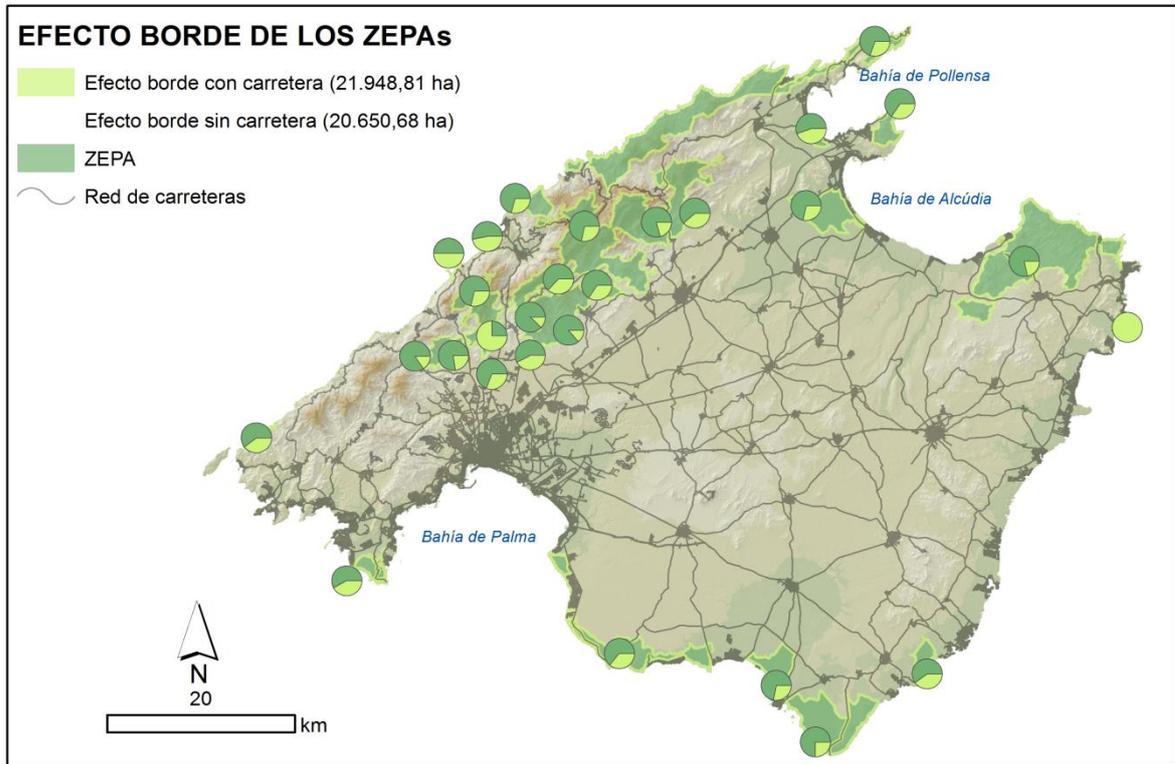


Fig 13. Proporción de hábitat de borde respecto al hábitat interior de las teselas ZEPA.

Los ZEPAs presentan una superficie total de 53.570 hectáreas y una superficie de borde sin infraestructuras de transporte de 20.650,68, suponiendo que el 38% de la superficie de ZEPA son espacios borde. Con la implantación de infraestructuras de carretera, el borde de hábitat aumenta un 2,4% (1.298 hectáreas). En este sentido, el espacio ZEPA más afectados por el efecto borde en valores relativos es *Cap Vermell*, con una afectación de borde del 100%, mientras que el ZEPA *Comuna de Bunyola* es el menos afectado, con un 13,8 % de efecto borde (véase en **Fig. 13**). Tanto en espacios LIC como en ZEPA, alrededor del 60% (de media) de la superficie de los espacios presentan efecto borde.

4.3. Medidas basadas en la conectividad ecológica:

4.3.1. Pequeños vertebrados:

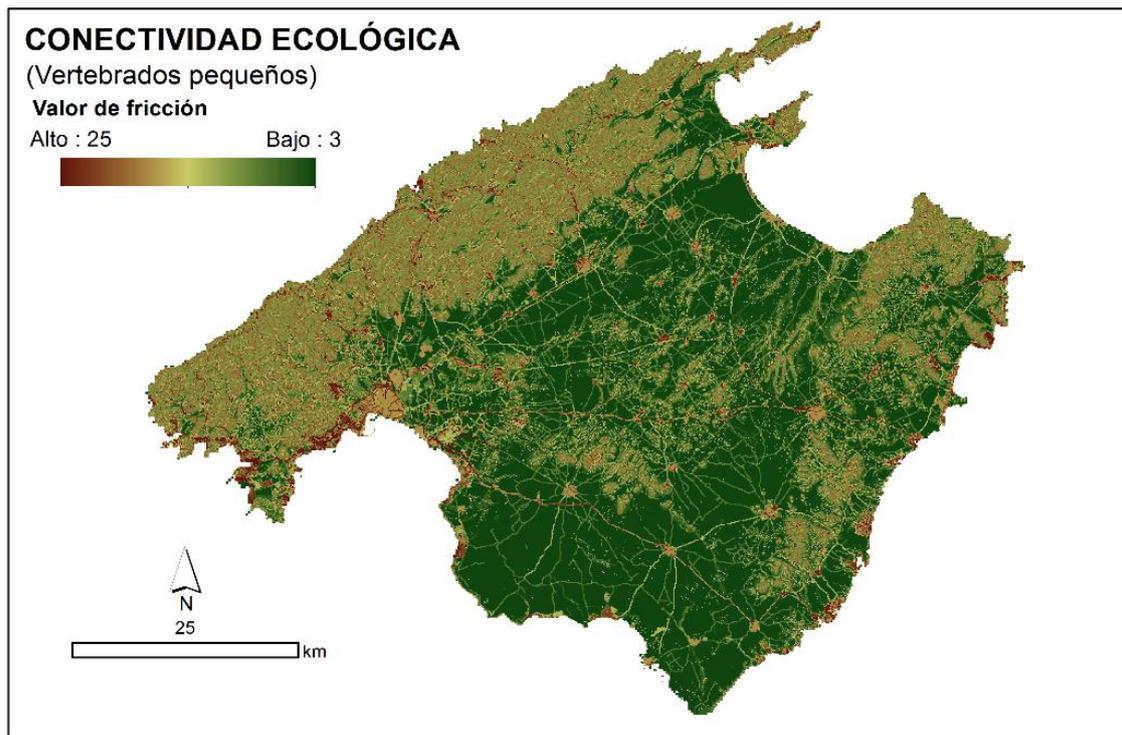


Fig 14. Conectividad ecológica de Mallorca para pequeños vertebrados.

4.3.2. Medianos y grandes vertebrados

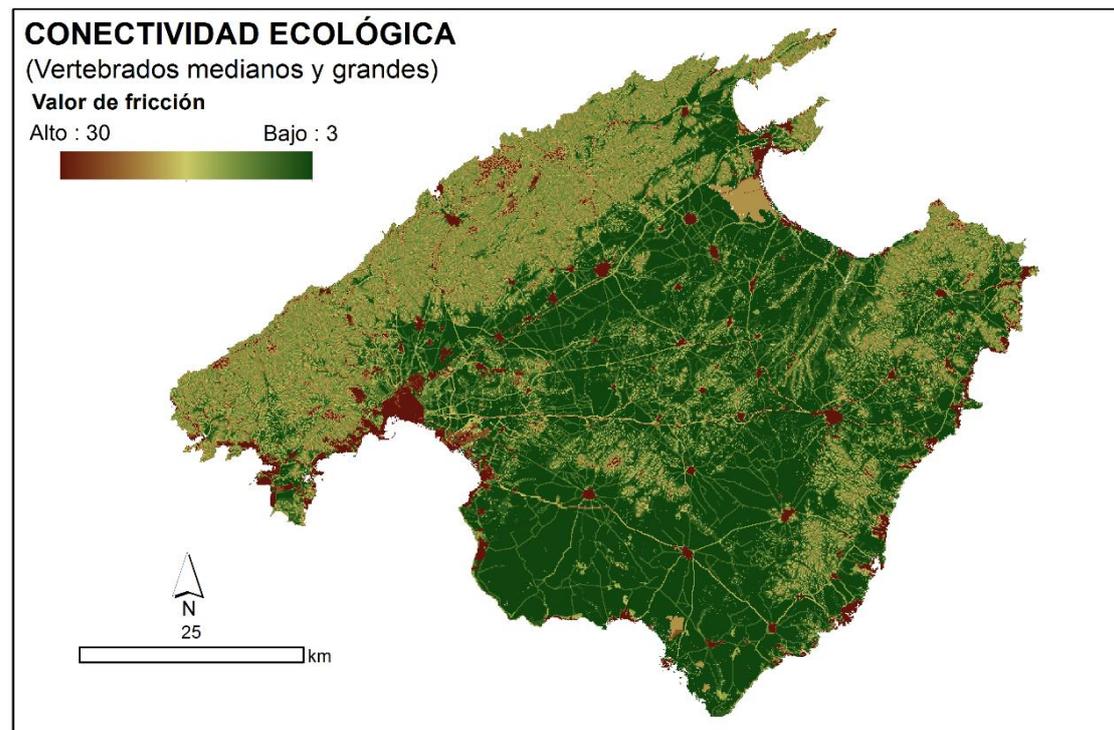


Fig 15. Conectividad ecológica de Mallorca para medianos y grandes vertebrados.

La conectividad ecológica que presenta el territorio mallorquín respecto a los pequeños vertebrados (véase en **Fig. 14**) presenta unos valores de fricción entre 3 y 25 (de menor a mayor fricción). Así pues, se identifica claramente el impacto de la mancha urbana de Palma y el área metropolitana adyacente en la movilidad de dichas especies. Contrariamente, las llanuras centrales de Mallorca presentan valores bajos de fricción (por la presencia de cultivos y su topografía llana) favoreciendo la conectividad ecológica en dichas áreas, alteradas únicamente por la irrupción de carreteras y pequeños núcleos urbanos. Además, las zonas con orografía pronunciada presentan valores de fricción medios derivados de los desniveles altitudinales dispuestos por el relieve.

La conectividad ecológica correspondiente a los grandes vertebrados (véase en **Fig. 15**) responde, a grandes rasgos, a valores de fricción similares a los de los pequeños vertebrados. Sin embargo, considerando una escala más detallada, aparecen diferencias sustanciales entre la conectividad relativa a un tipo de vertebrados y otros. Estas diferencias locales han de ser tenidas en cuenta en el posterior análisis de rutas óptimas, y corresponderá al gestor pertinente decidir a qué tipo de vertebrados se pretenda favorecer con la creación de corredores o pasos de fauna.

4.4. Medidas de gestión propuestas:

4.4.1. Creación de corredores ecológicos:

Realizados los análisis de evaluación de la fragmentación de la isla de Mallorca, se ha detectado al oeste de la Sierra de Tramuntana, concretamente en la zona de *Puig Galatzó* (véase en **Fig. 16**), una zona óptima para la implantación de un corredor ecológico: la presencia de tres espacios naturales LIC de pequeñas dimensiones, desconectados entre sí y que presentan un considerable efecto borde, recomiendan la creación de corredores o ampliaciones de la zona bajo protección, que favorezcan la dispersión y asentamiento de las especies entre los distintos hábitats protegidos.

Esta medida permitiría la conexión ecológica del LIC *Port des Canonge* con el *Fita del ram*, a través del LIC *Puig Galatzó*, beneficiando a especies vertebradas con una presencia potencial como tortuga griega o tortuga mora (*Testudo graeca* ssp. *graeca*), liebre (*Lepus granatensis*), sapo (*Bufo vividis* ssp. *balearica*), erizo moruno blanquecino o balear (*Atelerix algirus vagans*), marta (*Martes martes*), ferreret (*Alytes muletensis*) o jineta (*Genetta genetta*).

Para asegurar la efectividad de los corredores ecológicos se propone la creación de una nueva figura de protección: **ZEIC**⁹. Esta figura dispondría de una regulación de usos permitidos y restricciones urbanísticas a favor del mantenimiento ecológico de las especies presentes en dichos hábitats.

Se ha desestimado la implantación de otras ZEIC, en otras zonas diagnosticadas como problemáticas, por diversas razones que se exponen a continuación. En la zona del *Puig de Sant Martí* (Alcudia), debido a su alto grado de rururbanización y la ubicación de la central térmica de “Es Murterà” resultaría poco eficiente la instalación de un corredor ecológico, puesto que supondrían costes elevados de expropiación. Del mismo modo, se desestima la implantación de otro posible corredor en la zona de la Colonia de Sant Jordi, debido a la presión urbano-turística de los núcleos de Sa Rapita y de la Colonia de Sant Jordi.

⁹ Zona de Especial Interés para la Conectividad

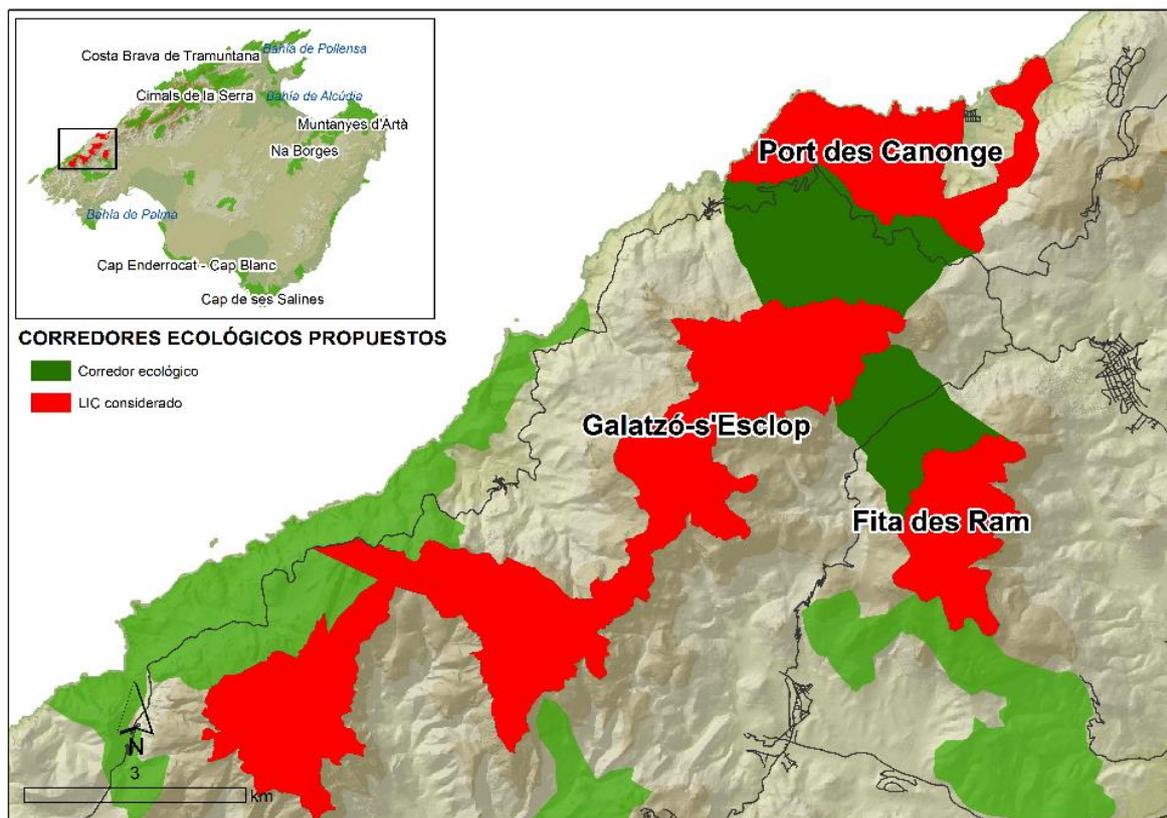


Fig 16. Localización del corredor ecológico.

4.4.2. Pasos de fauna:

La permeabilización ecológica de las carreteras es otra de las medidas propuestas en el presente estudio. De esta manera, se propone la construcción de estructuras transversales a la vía, en aquellos puntos modelados como zonas preferentes para el paso de animales, que permitan minimizar los impactos de la fragmentación causada por infraestructuras de transporte en la movilidad de las especies.

A través del análisis de rutas óptimas ponderadas con la fricción ecológica, se propone la localización de 9 pasos de fauna (véase en **Tabla 4** y **Fig.17**).

Vía	ENP	Altitud (m)	Pendiente (%)
Ma-1101	<i>Fita del Ram</i>	317 m.	9%
Ma-10	<i>Port des Canonge</i>	291 m.	30%
Ma-10	<i>S'Estaca-Punta Deià</i>	361 m.	23%
Ma-11	<i>Puig de ses Fites</i>	204 m.	7%
Ma-2100	<i>Alfabia-Biniarroi</i>	293 m.	38%
Ma-2100	<i>Alfabia-Biniarroi</i>	491 m.	5%
Ma-2200	<i>Muntanyes de Pollença</i>	50 m.	2%
Ma-13	<i>Albufera Alcúdia</i>	10 m.	3%
Ma-13	<i>Puig Sant Martí</i>	24 m.	3%

Tabla 4. Localización, espacio natural protegido (ENP) más cercano, altitud y pendiente media de los pasos de fauna propuestos.

A nivel municipal, los pasos de fauna se ubican (respectivamente al orden de la tabla anterior) en Puigpunyent, Banyalbufar, Deià, Bunyola (3), Pollença, Alcúdia (2). Solamente los

pasos de fauna de las carreteras Ma-2200 y Ma-13 presentan alturas inferiores a 100 metros correspondientes a zonas llanas. Los demás, se localizan en zonas montañosas con altitudes entre 200 y 500 metros, siendo el paso de fauna localizado en la vía Ma-2100 *Alfabia-Biniarroi* el de mayor altitud (491 m.). Seis de los nueve pasos de fauna propuestos en el presente análisis presentan pendientes inferiores al 10%. Los pasos de fauna de *Port des Canonge, s'Estaca-Punta Deià* y *Alfabia-Biniarroi* presentan pendientes entre 20 y 40%, siendo este último el de mayor pendiente (38%).

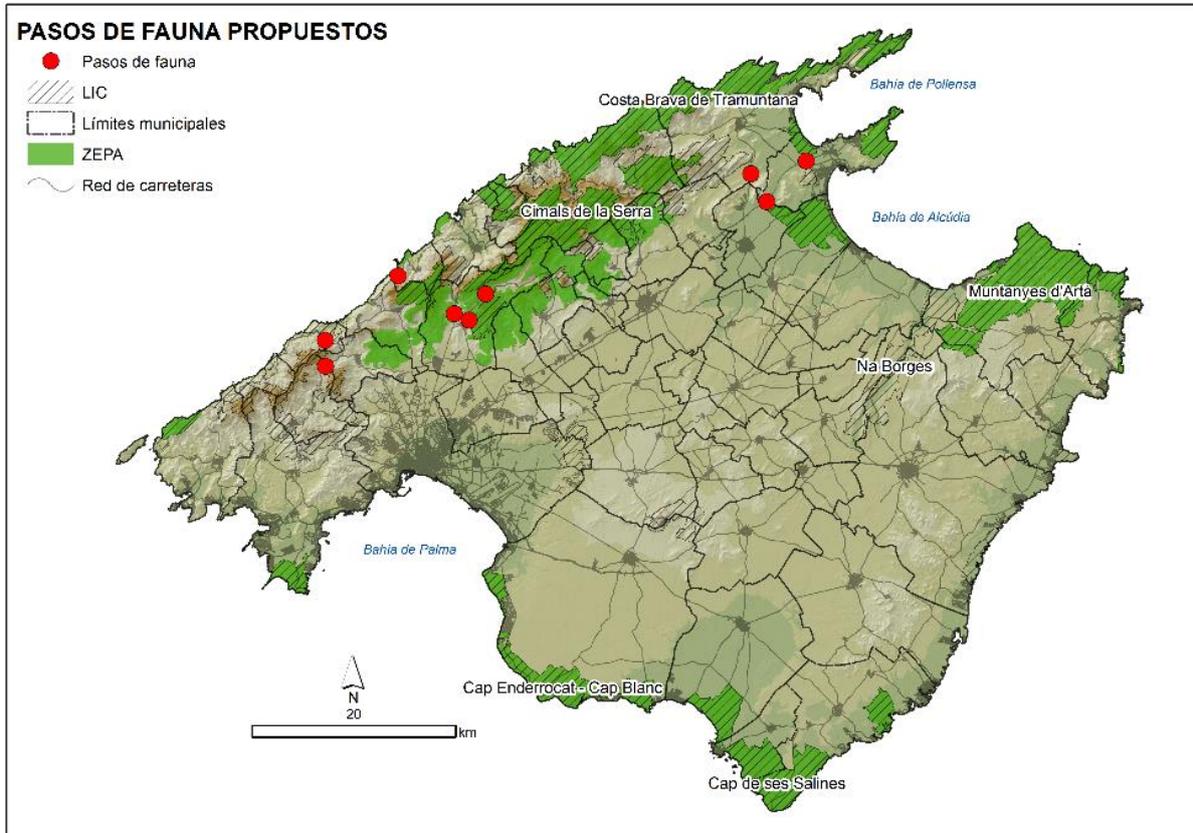


Fig.17. Localización de los pasos de fauna propuestos.

5. Discusión

Durante las últimas décadas, la dinámica de los paisajes europeos se ha traducido, en multitud de casos, en un aumento de la fragmentación y reducción de hábitats (Gurrutxaga y Lozano, 2006). La isla de Mallorca se encuentra entre esos espacios afectados, ya que como consecuencia de la presencia humana intensiva y ancestral, prácticamente todo el territorio presenta algún tipo de alteración, dando lugar a un complejo mosaico paisajístico (Llorens *et al.*, 2007). La fragmentación se manifiesta como un patrón dentro del espacio geográfico (Gurrutxaga y Lozano, 2006), y por este motivo, los procesos de fragmentación son cada vez más estudiados en diferentes disciplinas. Los conceptos mosaico y elementos del paisaje representan la base de la interpretación del paisaje, pudiendo aplicarse o inferir a cualquier escala (Vila *et al.*, 2006). En este sentido, la fragmentación, como proceso eminentemente espacial, tiene una escala específica de operatividad (García, 2011). En el presente análisis sobre el estado de fragmentación de los hábitats de Mallorca, la escala de trabajo elegida viene determinada por los

límites físicos impuestos por la propia isla, a diferencia de otros estudios donde los límites del análisis se determinan por otro tipo de factores fisiográficos u ecológicos.

En este estudio se aborda el problema de la fragmentación de hábitats desde la perspectiva de los impactos ocasionados por las infraestructuras viarias de transporte. En el caso de Mallorca, éstas ocupan una superficie relativa de poco menos del 2,2%. Incluso en espacios naturales protegidos (LIC y ZEPA), el porcentaje de superficie destinado a infraestructuras es inferior al 1%. A simple vista estos valores denotarían una baja afectación de las vías en procesos de fragmentación. No obstante, otros indicadores como la intensidad de uso o la intersección de vías penetrantes en estos espacios naturales, esclarecen unos impactos asociados mucho más notables. Por una parte, la intensidad media de uso de las vías está fuertemente condicionada por la estacionalidad turística. Los espacios naturales cercanos a núcleos turísticos de costa como *Alcudia-Ca'n Picafort* o *Cala Ratjada* y a monumentos naturales o culturales como el monasterio de Lluc, *Sa Calobra* o *Cap de Formentor*, presentan intensidades de uso que estarían asociadas al flujo extra de vehículos generado por el turismo durante los meses de temporada alta. Además, las características de la vía podrían condicionar estos flujos de vehículos. En general, las vías que cuentan con amplios carriles de circulación, poca sinuosidad (lo que favorece el flujo de vehículos) y transcurren por zonas poco desniveladas, tienden a la acumulación de mayores flujos que las vías que cuentan con pocas prestaciones o son más sinuosas.

La reducción del área neta y funcional del ecosistema, así como el aumento del aislamiento y la proliferación de zonas marginales, son factores de riesgo importantes de la fragmentación de hábitats (Delgado *et al.*, 2004). La superficie de los fragmentos muestra una clara correlación con la diversidad de especies que puede albergar. En este sentido, la teoría de la isla biogeográfica desarrollada por Mc Arthur y Wilson (1963 y 1967) determina una reducción progresiva de la diversidad biológica, así como de la dimensión de las poblaciones de las diferentes especies presentes, fruto de la reducción de la extensión de los fragmentos (Vila *et al.*, 2006). Así pues, según los resultados obtenidos en el análisis realizado, la zona oeste de Mallorca concentra los fragmentos de hábitat con menor superficie si se compara con la zona nordeste. Este patrón podría estar relacionado con el rápido crecimiento urbanístico (Marulli y Mallarach, 2006), y podría estar reduciendo o limitando la diversidad potencial de especies en estas zonas.

La forma de los fragmentos es un indicador fundamental, considerado en algunas ocasiones más relevante que los indicadores de superficie (Vila *et al.*, 2006). La forma está condicionada tanto por la actividad humana, lo que supone una mayor presencia de formas rectilíneas, como por las condiciones naturales (topografía, litología, etc.), éstas asociadas a formas curvilíneas e irregulares (Vila *et al.*, 2006). Asimismo, la forma de las teselas está también relacionada con cambios en el efecto borde asociado frecuentemente a ésta (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). Según Sánchez y Calvo (1999), quienes realizaron un estudio sobre la distribución de aves en relación con la composición del paisaje en hábitats mediterráneos semiáridos de la región de Murcia, el efecto borde puede afectar negativamente a las zonas de nidificación de distintas especies de aves. Asimismo, la forma de las teselas influye en procesos que tienen lugar entre las mismas, como: la migración de pequeños mamíferos terrestres, la colonización de algunas plantas o las estrategias alimentarias de algunas especies (Martín *et al.*, 2006). Por tanto, las teselas que presentan formas más cohesionadas son menos sensibles a perturbaciones externas. En este caso, las formas de los espacios considerados LIC y ZEPA podrían estar determinadas por la complejidad del propio paisaje, puesto que las zonas centrales de la Sierra de Tramuntana se caracterizaran por perímetros normalizados sinuosos y poco cohesionados. Para el análisis morfológico se ha considerado pertinente utilizar el *perímetro normalizado*, ya que facilita la comprensión de la relación área/perímetro a nivel morfológico y funcional (Vila *et al.*, 2006). Otros análisis como el de Martín *et al.*, (2006) utilizan la metodología tradicional de relación perímetro y área. De todos modos, ambas metodologías concluyen que cuanto mayor sea esta relación, mayor es la

complejidad de las teselas y consecuentemente mayor es la fragmentación y sus impactos (Martín *et al.*, 2006).

La superficie bajo efecto borde permite aproximar el estado del hábitat interior, que es fundamental para *la presencia y mantenimiento de flora y fauna especialista, es decir, más exigente en sus requerimientos ecológicos* (Forman y Gordon, 1986 y Forman, 1995) citados en Vila *et al.* (2006, p.161). Contrariamente, en hábitats de borde se favorece la presencia de especies generalistas o incluso invasoras, muchas de las cuales son depredadoras oportunistas que podrían dañar severamente el hábitat remanente (Bennet, 1991) citado en Delgado *et al.*, (2004, p.210).

Asimismo, otro de los aspectos considerados en el presente estudio es la conectividad ecológica de Mallorca para pequeños vertebrados por una parte, y medianos y grandes por otra. Sastre *et al.*, (2002) realizaron un modelo de conectividad ecológica del paisaje de la Comunidad de Madrid a partir del cual se ha inspirado el presente modelo. Sin embargo, el modelo de conectividad ecológica del presente trabajo incluye seis factores geográficos en el cálculo de las matrices de fricción, a diferencia de Sastre *et al.*, (2002), que solamente consideran dos (tipos de vegetación y usos del suelo y distancia máxima a núcleos urbanos). Asimismo, Marulli y Mallarach (2006) realizaron un análisis metodológico para evaluar la conectividad ecológica del área metropolitana de Barcelona, que se asemeja al utilizado en el presente trabajo. Tanto la metodología planteada en este trabajo como la propuesta por Sastre *et al.*, (2002) y Marulli y Mallarch (2006), determinan la conectividad a partir de un análisis raster basado en matrices de fricción aplicada a organismos vertebrados a través de la distancia-coste ponderada.

En este sentido, los mapas de conectividad ecológica pueden ser un método muy efectivo para la planificación regional y metropolitana, para el desarrollo de estrategias de evaluación de impactos y para la planificación sectorial (Sastre *et al.*, 2002; Marulli y Mallarch, 2006 y Ministerio Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010), y añaden Sastre *et al.*, (2002): *la conservación de la conectividad y la integridad ecológica de la red de espacios naturales Natura 2000 (LIC y ZEPA) es, además, un requisito legal impuesto por la Directiva europea de Hábitats (1992)*. Siguiendo estas premisas, se propone la creación de medidas de gestión destinadas a paliar o mitigar los impactos de las infraestructuras de transporte sobre los hábitats, priorizando acciones de desfragmentación. Indicadores de tamaño, forma, densidad de borde son, entre otros, factores determinantes en la localización de estas medidas de gestión (Baudry y Burel, 2002) citado en Morera *et al.*, (2007). El diagnóstico realizado en este trabajo reveló que a zona de *Puigpunyent* podría reunir las condiciones necesarias para la creación de un corredor ecológico que asegure la permeabilización de los desplazamientos de los vertebrados considerados en el análisis, y la dispersión y reasentamiento de las especies entre los distintos espacios protegidos. En esta misma línea, Terrones y Bonet (2014) plantearon el diseño de una red de corredores para carnívoros forestales en la Comunidad Valenciana utilizando, al igual que en el presente análisis, modelos de conectividad ecológica, basados en el cálculo de rutas de mínimo coste a través de mapas de fricción, utilizando como factores de ponderación los usos del suelo, la hidrografía y las distancias a zonas urbanizadas.. El diseño del corredor ecológico propuesto en este estudio sigue los principios sugeridos por el marco EECNET (European Ecological Network) para su implantación: (1) debe abarcar los lugares de mayor importancia para la conservación del medio biológico y el paisaje relacionadas con la diversidad, (2) debe garantizar el mantenimiento de los procesos ecológicos y la conectividad del territorio, (3) deben poder ser incorporados en la planificación territorial y (4) debe promover el desarrollo sostenible.

Ahondando más en la relación entre la fragmentación de hábitats y la conectividad ecológica, el efecto barrera provocado por las carreteras es un factor fundamental que impide o condiciona la movilidad de los organismos, limitando el potencial de los mismos para su dispersión y colonización (Arroyave *et al.*, 2006). No obstante, la fragmentación y sus impactos negativos no afectan de igual manera a todas las especies (García, 2010). Considerando estos

efectos adversos, la mortalidad faunística por atropello es uno de los principales, y se considera una de las mayores amenazas de la biodiversidad animal (Forman, 1998; Forman y Alexander, 1998; Trombulak and Frissell, 2000; Sherwood *et al.*, 2002; Forman *et al.*, 2003; Coffin, 2007) citados en Carvalho y Mira (2010, p.157). Carvalho y Mira (2010) realizaron un muestreo comparativo entre 1996 y 2005 sobre la mortalidad de organismos vertebrados en las carreteras de Portoalegre (Portugal). Roig-Munar *et al.*, (2012) realizaron un análisis de la mortalidad de vertebrados en las carreteras de Menorca, estimando que anualmente mueren alrededor de 14.000 vertebrados. En el presente trabajo, se han determinado la localización óptima de pasos de fauna con el fin de asegurar la permeabilización de las vías de la sierra de Tramuntana y contribuir a la reducción de la tasa de atropellos de fauna salvaje.

Por otra parte, es importante destacar la existencia de un conjunto de limitaciones y consideraciones que han condicionado el desarrollo conceptual y metodológico del análisis. En primer lugar, es necesario señalar que los indicadores aportan información cuantitativa del estado de fragmentación de los hábitats, obviando situaciones de transición propias de la heterogeneidad que existe realmente, lo que obliga a la combinación de distintos tipos de índices para obtener resultados fiables (Vila *et al.*, 2006). En el mismo sentido, según indica García (2011) existen demoras en la manifestación de los efectos de fragmentación que pueden provocar la valoración errónea de algunos indicadores. En este estudio se ha tratado de paliar este déficit con la combinación de indicadores fisiográficos y morfológicos, con patrones de movilidad modelados a través de los análisis de conectividad ecológica. En segundo lugar, existe un significativo déficit de información espacial de índole biológica como distribución de especies, mortalidad de fauna por atropello, etc. El Consell de Mallorca puso a disposición de este estudio información sobre atropellos de animales domésticos, que no fue incluida en los análisis al no tratarse de fauna salvaje. Por esta razón, sería interesante la realización de campañas de muestreo para la recopilación y tratamiento de dichos datos. Igualmente, sería interesante realizar el análisis a diferentes escalas temporales a fin de considerar las fluctuaciones anuales como, por ejemplo, las de la intensidad del tráfico. De esta manera se podrían considerar aspectos relacionados con la estacionalidad característica de las Baleares y su impacto en los procesos de fragmentación, para así poder implementar medidas de gestión preventivas. Finalmente, debido a las limitaciones de tiempo y extensión del trabajo, no se han podido considerar, para el cálculo de las matrices de fricción, otros factores de ponderación que tuviesen en cuenta aspectos fundamentales para la movilidad de las especies como la humedad contenida en el suelo o la densidad y estado de la vegetación. El tratamiento y análisis de imágenes de satélite permitiría el cálculo del Normalized Difference Infrared Index (NDII) y del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), indicadores que resultarían de gran ayuda para localizar las zonas de acumulación de humedad y conocer el estado de la vegetación, respectivamente; de esta manera, las matrices de fricción del modelo de conectividad ecológica para la movilidad de especies serían más precisas. En este mismo sentido hay que señalar que, para conseguir modelar patrones de distribución y dispersión de fauna de manera más o menos exitosa, lo más recomendable sería utilizar matrices específicas para cada especie, y no matrices de tipo *generalista* como la utilizada en este estudio; de esta forma, la ponderación de los factores que intervienen en el cálculo de las matrices se ajustarían mucho más a los hábitos y costumbres de las distintas especies. Sin embargo, esto no ha sido posible debido a las limitaciones temporales. Asimismo, como futura línea de investigación, queda pendiente la aplicación de la metodología propuesta por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013), que plantea la elaboración de un índice de vulnerabilidad biológica a las infraestructuras lineales de transporte, que serviría como complemento de los indicadores calculados en el presente análisis.

El estudio de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras viarias en Mallorca resulta una contribución valiosa y original, ya que esta problemática nunca antes había sido tratada en las Baleares. El análisis del estado en que se encuentren los hábitats incluidos en Red Natura 2000, en un área de estudio sometida a una gran presión turística y urbanística, es fundamental para asegurar la conservación de la riqueza ecológica Balear, teniendo en cuenta

que ésta contiene elevadas tasa de endemismos. Asimismo, se han cumplido con los objetivos planteados al principio de la investigación. A nivel metodológico, a pesar de que las técnicas estaban inspiradas en estudios previos, se han planteado algunos métodos innovadores, como la creación de diversas matrices de fricción que, combinadas entre ellas aportan información más precisa y completa. Finalmente, los resultados obtenidos en el presente estudio tienen un valor gran potencial para la aplicación de políticas de conservación ambiental que minimicen los impactos de las actividades humanas en un paisaje caracterizado por la alta fragilidad propia de los sistemas insulares.

6. Conclusiones

La fragmentación de hábitats causada por infraestructuras viarias es una de las principales causas de la crisis actual de biodiversidad. En el caso de Mallorca, la proliferación de infraestructuras en espacios insulares limitados, puede promover la atomización de los componentes del medio biótico, hecho que justifica la elaboración del presente análisis sobre fragmentación.

En conclusión, los resultados obtenidos de la aplicación de los indicadores propuestos en el presente trabajo revelan un importante impacto de los procesos de fragmentación en espacios donde la intensidad media de uso y la proximidad de núcleos urbanos o turísticos son altas (especialmente al norte de la isla y en la Sierra de Tramuntana). La conectividad ecológica de la isla de Mallorca muestra unos patrones generales claros, siendo elevada en el interior de la isla y viéndose disminuida en los sistemas montañosos de Tramuntana y Llevant. Las zonas que soportan más presión antrópica presentan conectividades muy bajas, incluso nulas. Particularmente, la sierra de Tramuntana es una de las áreas más fragmentadas, por lo que las diversas medidas de gestión propuestas, creación de corredores y pasos de fauna, se concentran en esta zona.

Las aportaciones realizadas en el presente estudio están encaminadas hacia el desarrollo de una planificación sostenible a nivel local y regional en las Islas Baleares, que considere los impactos de la movilidad sobre el medio ambiente y favorezca el mantenimiento y preservación de sus hábitats y espacios singulares.

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Jorge Lorenzo Lacruz, quien ha sido el encargado de la supervisión del presente Trabajo de Fin de Grado, por su incansable dedicación e implicación y su apoyo durante el proceso de elaboración del mismo. Igualmente, agradezco enormemente la asistencia prestada tanto por el Dr. Guillem Xavier Pons Buades y el Dr. Miquel Mir Gual en cuestiones de índole biológica.

Al departamento de carreteras del Consell de Mallorca y al SSIIGT de la Universidad de las Islas Baleares por la cesión de datos cartográficos, especialmente al director del SSIIGT, el Dr. Maurici Ruíz, por facilitarme el acceso al laboratorio del centro.

Finalmente, agradezco el apoyo moral de familiares, amigos y expresamente a Natalia Vidal por su paciencia y consideración.

Referencias bibliográficas

- Alcover, J.A.; Llabrés, M. y Moragues, Ll. (2000). Les Balears abans dels humans. SA NOSTRA-SHNB: Palma. pp. 78.
- Arroyave, M.P.; Gómez, C.; Gutiérrez, M.A.; Múnera, D.P.; Zapata, P.A.; Vergara, I.C.; Andrade, L.M. y Ramos, K.C. (2006). Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo. *Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq.* 5:45-57. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372006000100004&script=sci_arttext&tlng=pt
- Brook, B.W.; Sodhi, N.S.; Ng, P.K.L. (2003). Catastrophic extinctions follow deforestation in Singapore. *Nature.* 424:420-423.
- Carvalho, F. y Mira, A. (2010). Comparing annual vertebrate road kills over two time periods, 9 years apart: a case study in Mediterranean farmland. *Eur J Wildl Res.* 57:157-174.
- Delgado, J.D; Arévalo, J.R y Fernández-Palacios, J.M. (2004). Consecuencias de la fragmentación viaria: Efectos de borde de las carreteras en la laurisilva y el pinar de Tenerife. A: Fernández-Palacios, J.M y Morici, C. (Eds.). *Ecología insular/Island ecology.* Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET). Cabildo Insular de la Palma. pp. 181-225.
- EUROPARC-España. (2009). *Conectividad ecológica y áreas protegidas. Herramientas y casos prácticos.* Madrid: Ed. FUNGOBE. 86 pp.
- Forman, R.T.T. (1995). *Land mosaic. The ecology of landscapes and regions.* London: Cambridge University Press.
- García, D. (2011). Efectos biológicos de la fragmentación de hábitats: nuevas aproximaciones para resolver un viejo problema. *Ecosistemas.* 20(2-3):1-10.
- Gascon, C.; Lovejoy, T.E.; Bierregaard, R.O.; Malcolm, J.R.; Stouffer, P.C., Vasconcelos, H.L.; Laurance, W.F.; Zimmerman, B.; Tocher, M. y Borges, S. (1999). Matrix habitat and species richness in tropical forest remnants. *Biological Conservation.* 91:223-229.
- Giménez, J.; Barón, A.; Comas, M.; González, C.; Garau, J.; Beidas, O.; Oliver, M. y Nadal, F.J. (2014). Hidrogeología de les Illes Balears: Masses d'aigua càrstiques. *ENDINS.* 36:9-26.
- Gobierno de las Islas Baleares. *Flora de Baleares en general.* <https://www.caib.es/sacmicrofront/contenido.do?mkey=M08092209023624284631&lang=CA&cont=34738> [Consulta: 30/04/2016]
- Gurrutxaga, M y Lozano, P.J. (2006). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos. Revista de Geografía.* 16: 35-54.
- Gurrutxaga, M. y Lozano, P.J. (2010). Causas de los procesos territoriales de fragmentación de hábitats. *Lurralde: inves. espac.* 33: 147-157.
- Hargis, C.D; Bissonette, J.A y Turnes, D.L. (1999). The influence of forest fragmentation and landscape pattern on American martens. *Ecological Application.* 36:157-172.
- Jaeger, J.; Madriñán, L.; Soukup, T.; Schwick, C. y Kienast, F. (2011). Landscape fragmentation in Europe. European Enviromental Agency-Swiss Federal Office for the Enviromental. Copenhagen. pp. 87.
- Jongman, R.H.G.; Kùlvik, M. y Kristiansen, I. (2004). European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban Planning.* 68:305-319.

- Lindenmayer, D.B. y Fischer, J. (2006). *Landscape change and habitat fragmentation*. Washington: Island Press.
- Llorens, L.; Gil, L. y Tébar, F.J. (2007). La vegetació de l'illa de Mallorca. Bases per a la interpretació i gestió d'hàbitats. Goven de les Illes Balears, Conselleria de Medi Ambient: Palma. pp.261.
- Mader, H.J. (1984). Animal habitat isolation by roads in agricultural fields. *Biological conservation*. 29:81-96
- Martín, B.; Mancebo, S.; Ortega, A. y López, E. (2006). "Evaluación de los efectos del PEIT sobre la fragmentación de hábitats" en: *III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. Zaragoza, España.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). Desfragmentación de hábitats. Orientaciones para reducir los efectos de las infraestructuras de transporte en funcionamiento. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transporte. Núm.5. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 159 pp. Madrid.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2013). Identificación de áreas a desfragmentar para reducir los impactos de las infraestructuras lineales de transporte en la biodiversidad. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transporte. núm.6. Ministerio de Alimentación y Medio Ambiente: Madrid. pp.260.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Mapa Forestal de España (MFE50). Banco de Datos de la Naturaleza. 2006. <http://www.magrama.gob.es/ca/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mfe50.aspx> [Consulta: 25/05/2016]
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). Indicadores de fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte. Documentos para la reducción de la fragmentación causada por infraestructuras de transporte, núm. 4. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 133 pp. Madrid.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2006). Prescripciones Técnicas para el diseño de pasos de fauna y vallados perimetrales. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras de transporte. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 108 pp. Madrid.
- Moragues, L. (1993). Estudio geológico del sector meridional de les serres de Llevant (Mallorca). *Boll.Soc.His.Nat.* 36:103-120.
- Morera, C.; Pintó, J. y Romero, M. (2007). Paisaje, procesos de fragmentación y redes ecológicas: aproximación conceptual. A: Chassot, O. y Morera, C. Corredores biológicos: acercamiento conceptual y experiencia en America. Imprenta Nacional. San José: Costa Rica. pp.11-47.
- Música de la Guerra, M.; de Lucio, J.V.; Martínez, C.; Sastre, P.; Atauri-Mezquida J. A.; Montes, C.; Castro, H.; Molina, F.; García, M.R. (2002). *Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos*. Sevilla: Dirección General de la RENP y Servicios Ambientales, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, España.
- Myers, N.; Mittermeier, R.A; Mittermeier, C.G; Fonseca, G.A.B; Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. 403:853-858.

- Rita, J. y Payeras, T. (2006). Biodiversidad de las plantas vasculares de las Islas Baleares. *Orsis*. 21: 41-58.
- Robledo, P.A. (2005). *Los Paleocolapsos kársticos en las plataformas carbonatadas del Mioceno superior de Mallorca: análisis geográfico, genético, geológico y evolutivo*. (Tesis Doctoral) Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de las Islas Baleares.
- Rodríguez, E. y Gutiérrez, J. (2012). Análisis de vulnerabilidad de redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos de la red de carreteras de Mallorca *Geofocus*. 12:374-394.
- Roig, F.; Pons, G.X. y Comas, E. (2012). Anàlisi de la mortalitat de vertebrats a les carreteres de Menorca. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*. 55:75-98.
- Sánchez, J.A. y Calvo, J.F. (1999). Raptor distribution in relation to landscape composition in semi-arid Mediterranean habitats. *Journal of Applied Ecology*. 36:254-262.
- Santos, T. y Tellería, J.L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas*. 15(2):3-12.
- 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*. 11 (2).
- Serra, J.; Bayer, X.; López, M. y Seguí, M. (2011). Les ratapinyades de les Illes Balears: Distribució, avaluació i estat sanitari de les poblacions. *Endins, 35. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears*. 17:269-282.
- Szek, M. (2012). *Fragmentación del paisaje en áreas protegidas*. (Tesis doctoral) Departamento de geografía física i análisis geográfica regional. Universidad de Barcelona.
- Terrones, B. y Bonet, A. (2014). "Diseño de una red de corredores ecológicos para carnívoros forestales en la Comunidad Valenciana" en: XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Alicante: España.
- Unión Europea. (2010). Una Infraestructura verde. *Comisión Europea*.
- Unión Europea. Directiva 2009/147/CE, de 30 de noviembre, relativa a la conservación de las aves silvestres. *Diario oficial de la Unión Europea*, 26 de enero de 2010, núm: 20/7
- Unión Europea. Directiva 92/43/CEE, de 21 de mayo, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 22 de julio de 1992, núm: 206/7.
- Viada, C. (2006). Libro rojo de los vertebrados de las Baleares (3ª edición). *Conselleria de Medi Ambient*. pp. 281.
- Vila, J.; Varga, D.; Llausàs, A. y Ribas, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (*landscape ecology*). Una interpretación desde la geografía. *Doc. Anàl. Geogr.* 48:151-166.