

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA PARA EL DISEÑO DE CORREDORES ECOLÓGICOS EN ARAGÓN

Eduardo Vicente Bartolí

Director: Juan de la Riva Fernández

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Diciembre de 2015



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



***Agradecimientos:** A Juan de la Riva, por su dirección y paciencia; a Víctor Andrés Visús, por su supervisión y ayuda; a María Zúñiga por sus consejos; y a Ana, por animarme a embarcarme en este proyecto y arrojar la luz necesaria en mis momentos de mayor frustración.*

Resumen

Los espacios naturales protegidos por sí mismos se consideran insuficientes para la conservación de la biodiversidad, en el sentido de que actúan como entidades aisladas en el territorio que no tienen en cuenta el flujo de genes e individuos entre las distintas poblaciones para asegurar su supervivencia. Por lo tanto, existe la necesidad de fomentar la conectividad ecológica entre dichos espacios a través de corredores ecológicos. Este asunto es una asignatura pendiente en Aragón aunque es algo que está contemplado por diversos textos legales, como la última actualización de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, además de ser un objetivo específico en la política territorial de esta Comunidad Autónoma. El presente trabajo constituye una aproximación al diseño de corredores ecológicos entre espacios de la Red Natura 2000 en Aragón, para ello se utiliza una metodología basada en el método Least Cost Path o LCP y en el diseño de capas de fricción. Además, se introducirán dos variaciones en el cálculo para analizar su papel en los cambios de los resultados. Estos ponen de manifiesto las ventajas y limitaciones del método empleado, así como la importancia de una asignación adecuada de valores de resistencia durante la construcción de la capa de fricción.

Palabras Clave: Conectividad, corredores ecológicos, fricción, Least Cost Path.

Abstract

Protected areas aren't considered to be capable by itself for ensure the conservation of biodiversity, because of they "play the role" of islands in the landscape without the essential connexions between them for keeping the health of species's populations. Thus, there's a need of design links and greenways between these areas. This is an unresolved issue in Aragon but it's considered in several legal texts, like the Law 42/2007, 13th December, of Natural Heritage and Biodiversity, as well as it's a specific goal of Aragon's territorial policy. This paper is a methodological approach for the designing of greenways between the Red Natura 2000 Protected Areas in Aragon, based in Least Cost Path methodology and cost surfaces. In addition, two changes are introduced in the model to assess their role in results. They show the advantages an limitations of the methodology Least Cost Path, as well as the importance of a correct assignation of cost values for obtaining the cost surfaces.

Key Words: Connectivity, greenways, cost surface, Least Cost Path.

Índice

1.	Introducción	pág. 1
1.1.	Marco teórico.....	pág. 1
1.2.	Estado de la cuestión	pág. 3
1.3.	Objetivos	pág. 5
2.	Material y métodos	pág. 6
2.1.	Área de estudio.....	pág. 6
2.2.	Pasos necesarios para diseñar redes de corredores ecológicos ...	pág. 6
2.2.1.	Definir los núcleos a conectar.....	pág. 6
2.2.2.	Identificar los factores que afectan a la conectividad en el área de estudio	pág. 6
2.2.3.	Elección y utilización de la herramienta SIG adecuada para el diseño de la conectividad ecológica	pág. 7
2.2.4.	Revisión y análisis de los resultados.....	pág. 7
2.2.5.	Interpretación de los resultados e incorporarlos en la to- ma de decisiones	pág. 7
2.3.	Selección de áreas y especies objetivo a conectar	pág. 7
2.4.	Elección de un método SIG apropiado para el diseño de la co- nectividad ecológica	pág. 9

2.4.1. Funcionamiento de <i>Linkage Mapper</i>	pág. 10
2.5. Preparación de los datos de entrada del modelo	pág. 10
2.5.1. Obtención de la capa de núcleos a conectar	pág. 11
2.5.2. Obtención de la capa de fricción	pág. 11
2.6. Ejecución de la herramienta y análisis de los resultados	pág. 18
3. Resultados	pág. 18
3.1. Capas de fricción	pág. 18
3.2. Itinerarios de menor coste (LCP)	pág. 20
3.3. Corredores ecológicos	pág. 20
4. Discusión	pág. 21
4.1. Diferencias entre las tres configuraciones	pág. 21
4.2. Utilidad e implementación del modelo en análisis y trabajos posteriores	pág. 22
4.3. Ventajas y limitaciones del modelo	pág. 22
5. Conclusiones	pág. 23
6. Bibliografía	pág. 24
Anexo I	pág. 26
Mapa de usos del suelo	pág. 27
Mapa de LICs, ZEPAs y LIGs	pág. 28
Mapa de infraestructuras lineales artificiales	pág. 29
Mapa de Montes de Utilidad Pública y vías pecuarias	pág. 30
Anexo II	pág. 31
Mapa de fricción en el área de estudio obtenido con los valores de resistencia asignados originalmente	pág. 32
Mapa de fricción en el área de estudio obtenido con la primera va- riación de los valores de resistencia	pág. 33
Mapa de fricción en el área de estudio obtenido con la segunda va- riación de los valores de resistencia	pág. 34
Anexo III	pág. 35
Itinerarios de menor coste (LCP) obtenidos con los valores de fric- ción asignados originalmente	pág. 36
Itinerarios de menor coste (LCP) obtenidos con la variación 1 de los valores de fricción	pág. 37
Itinerarios de menor coste (LCP) obtenidos con la variación 2 de los valores de fricción	pág. 38
Anexo IV	pág. 39
Mapa de corredores ecológicos obtenido con los valores de fricción asignados originalmente	pág. 40
Mapa de corredores ecológicos obtenido con la variación 1 de los valores de fricción	pág. 41
Mapa de corredores ecológicos obtenido con la variación 2 de los valores de fricción	pág. 42

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco teórico

La pérdida y fragmentación de hábitats ha sido reconocida en numerosas publicaciones y artículos como una de las principales causas del descenso de la biodiversidad y extinción de especies a nivel global (Bennet, 2003; EUROPAC, 2009; Herrera Calvo & Díaz Varela, 2013). Este hecho, por lo tanto, debe ser uno de los principales objetos de estudio que tengan como finalidad u objetivo contribuir a la conservación de especies y ecosistemas.

Pero, como indica Bennet (2003), es necesaria una revisión previa de determinados conceptos teóricos sobre fragmentación. Habitualmente se entiende que la fragmentación está directamente vinculada al aumento y expansión de determinadas actividades antrópicas, generalmente ligadas a cambios de uso e intensificación de actividades en el territorio. Este es un proceso mucho más patente en regiones donde la industrialización ha tenido más incidencia, como en países del centro de Europa, aunque también es perfectamente aplicable a zonas de España que han experimentado este tipo de cambios (Herrera Calvo & Díaz Varela, 2013).

Dichas actividades, que conllevan cambios en el uso del territorio, son sintetizadas en el trabajo de Gurrutxaga *et al.* (2010), separando las mismas en tres grupos:

- Las primeras se refieren a procesos de urbanización y ocupación del suelo a través de la construcción de equipamientos residenciales e industriales diseminados de los principales núcleos de población.
- Las segundas actividades en esta clasificación comprenden el desarrollo de infraestructuras para cubrir las necesidades y demandas de las áreas urbanizadas.
- El tercer grupo de actividades en la clasificación recoge aquellos procesos de industrialización e intensificación de la producción primaria, como en el caso de la agricultura y la ganadería, pero incluyendo otro tipo de actividades como la minería y la explotación de cotos para la práctica de actividades cinegéticas.

Esta clasificación, como tantas otras, podría variar en función de los criterios que se hayan empleado para elaborarla, ya que los procesos descritos en el tercer punto bien pueden incluirse en el segundo grupo, entendiendo que son actividades destinadas a cubrir las demandas de la población y las necesidades de los núcleos urbanos. Sin embargo, es muy válida para ilustrar cómo funciona el proceso de fragmentación, ya que de ella se deduce fácilmente que a medida que se incrementa la población y la demanda de las zonas urbanas mayor será la incidencia de este tipo de actividades que contribuyen a degradar los espacios naturales.

Además de las causas mencionadas, hay que tener en cuenta que existen otros procesos que pueden contribuir a la fragmentación de hábitats y que, en mayor o menor medida, pueden ser indirectamente inducidos por la actividad antrópica, como los incendios forestales o la desaparición de humedales por sobreexplotación de acuíferos (Herrera Calvo & Díaz Varela, 2013).

Aunque en la actualidad se cuenta con políticas de ordenación y planificación territorial que promueven la conservación de la biodiversidad a través de diversas figuras de protección de espacios naturales, se ha puesto de manifiesto que la declaración, protección y gestión de este tipo de áreas es, en muchos casos, insuficiente para combatir adecuadamente la pérdida de biodiversidad (Jongman, 2004; Gurrutxaga *et al.*, 2011). Esto es debido a que los espacios naturales protegidos, sean de la extensión que sean, se conciben como entidades discretas y cerradas en el territorio, sin interacción entre unas y otras. Sin embargo, es bien sabido que las especies en la naturaleza se encuentran distribuidas en forma de metapoblaciones, es decir, repartidas en subpoblaciones interconectadas entre sí; del mismo modo que entre los ecosistemas propiamente dichos se producen intercambios de materia y energía. Por todo ello, se pone de manifiesto que la conexión entre poblaciones y ecosistemas puede no quedar totalmente cubierta por las figuras de protección ligadas a los espacios naturales protegidos.

De este modo, se entiende que los procesos que se encuentren más amenazados serán aquellos que dependan de vectores de dispersión, como el desplazamiento de especies de fauna, dispersión de semillas, relaciones depredador-presa, etc. (Bennet, 2003). Entonces se puede deducir que al incrementar el efecto de la fragmentación, tanto los espacios naturales protegidos como los hábitats claves para la conservación de determinadas especies se ven irremediamente aislados, con las consecuencias que ello puede acarrear para el mantenimiento de dichas áreas y sus funciones, por mucho que la gestión de estas áreas sea óptima.

Una visión interesante, que puede servir para explicar el efecto de aislamiento de los espacios naturales protegidos o hábitats de determinadas especies, es la planteada por la teoría de la biogeografía de islas (MacArthur & Wilson, 1967), que fue desarrollada en respuesta a las observaciones de que las islas contienen menos especies que las zonas continentales. Esta teoría propone que el número de especies observado en la isla es producto de un equilibrio entre la tasa de colonización de la misma por parte de nuevas especies que llegan y la tasa de extinción de los taxones preexistentes en la misma. Según esta teoría, la tasa de colonización depende principalmente del grado de aislamiento que tiene la isla en relación con el continente, que es la fuente de especies que llegan a la misma; mientras que la tasa de extinción está relacionada con el tamaño de la isla.

La relación de esta teoría con el problema de la fragmentación está clara, de modo que los espacios naturales protegidos actuarían como islas, deduciéndose así que cuanto más patente sea la fragmentación y, por lo tanto, el aislamiento existente entre ellos, la tasa de colonización se reducirá, priorizando la extinción y poniendo en riesgo la conservación de especies en estas áreas.

Sin embargo esta teoría ha venido perdiendo algo de interés desde el punto de vista de la biología de conservación encarada a resolver el problema de la fragmentación de hábitats. Si bien es un modelo que constituye una buena base de partida, se trata de una visión de la realidad demasiado simple, dado que los espacios naturales protegidos no son islas propiamente dichas rodeadas de un medio inhabitable para las especies que contienen, sino que se encuentran incluidos en un mosaico territorial rodeados por una matriz que puede ser más o menos hostil para permitir el desplazamiento y la supervivencia de las especies en función del grado de fragmentación, pero, aún con todo ello, en cierta medida puede permitir el paso de las mismas (Bennet, 2003).

Otro marco teórico desde el que resulta útil estudiar este tema es el de la ecología del paisaje. Disciplina relativamente reciente, concibe el territorio como una serie de teselas o ambientes que forman un mosaico e interactúan entre sí. Engloba los estudios encargados de analizar los patrones de manchas en el paisaje y su variación espacio-temporal, así como la funcionalidad de los elementos que lo integran, centrándose para ello en los procesos ecológicos que se dan entre las distintas unidades que forman el mosaico, como los flujos de movimiento de especies y el efecto de ecotonos y fronteras entre las unidades paisajísticas. En estos estudios también es importante la consideración del papel del ser humano en el moldeado del territorio y sus efectos sobre las funciones que se dan en él (Herrera Calvo & Díaz Varela, 2013).

Así pues, en este marco teórico se puede introducir el concepto de conectividad. La conectividad es, entonces, la propiedad del paisaje que permite las interacciones entre los elementos que lo integran, y, por lo tanto, el flujo de especies, materia y energía. Ello resulta interesante desde una visión conservacionista, porque se trata de la capacidad del territorio para mantener la cohesión entre subpoblaciones de determinadas especies, siendo por lo tanto el concepto contrario a la fragmentación de hábitats. La conectividad es una propiedad que depende del estado de conservación del paisaje y las teselas que lo componen, pero también de su distribución espacial y de las características de la matriz en la que están incluidas.

Así pues, podríamos entender los hábitats o zonas de campeo de las distintas especies como manchas integradas en la matriz que forma el paisaje, de modo que dichas especies se moverán entre ellas en función de la idoneidad que presente la matriz para su desplazamiento. Suponiendo esto, en el territorio existirán zonas de paso preferente para determinadas especies en función de la conectividad que presente la matriz, constituyéndose así el concepto de corredor ecológico.

Desde el punto de vista del paisaje, pueden existir distintas configuraciones de corredores para fomentar la conectividad entre determinadas áreas (Bennet, 2003), como se ilustra en la figura 1.

Así, según un primer enfoque, se puede distinguir entre corredores que se componen de diversas unidades del paisaje, denominados corredores de paisaje, y que para su gestión requieren de la consideración de todo el territorio en su conjunto.

Aunque también existe otro punto de vista en el que los corredores conectarían teselas similares en el mosaico del paisaje: en este caso podríamos hablar de corredores continuos o, por otro lado, de unidades discretas separadas que favorecen la conectividad entre sí, concepto también llamado en numerosas ocasiones como *stepping stones*.

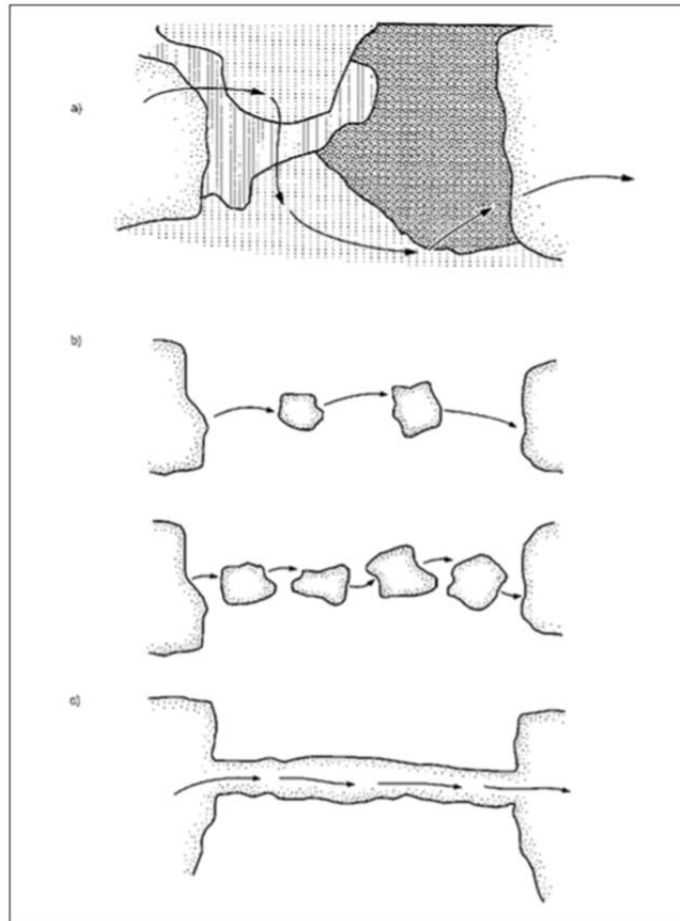


Figura 1. Distintas configuraciones de conectividad del paisaje. La opción a) corresponde a un corredor de paisaje, la b) al modelo de corredores en *stepping stones* y la c) a corredores lineales. Tomado de Bennet (2003).

1.2. Estado de la cuestión

Ya se ha visto entonces cómo el fomento de la conectividad ecológica y la gestión del paisaje a través de los corredores ecológicos es una pieza fundamental para la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad. Pero, ¿se ha traducido ese conocimiento en medidas concretas de las políticas conservacionistas?

A nivel europeo, las políticas que promueven la conectividad ecológica se pueden encontrar afianzadas en la Red Natura 2000, que emana de las Directivas de Aves (Directiva 2009/147/CE) y de Hábitats (Directiva 92/43/CEE); en esta última se ordena la creación de una red ecológica europea, en la que además se promueve la gestión de elementos lineales continuos para favorecer la coherencia de dicha red.

Del mismo modo, tanto los países europeos como algunos no pertenecientes a la Unión (como Túnez, Marruecos y Senegal), están llamados a desarrollar la denominada Red Esmeralda, que tiene su origen en el convenio de Berna (1996) y que, del mismo modo que la Red Natura 2000, pretende conservar zonas de especial interés. En el caso de los países pertenecientes a la Unión, la Red Esmeralda estará formada por los espacios de la Red Natura 2000.

En España, el imperativo legal de fomentar la conectividad ecológica parte de la propia Directiva Hábitats, cuyos principios han sido recogidos en la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. Resulta significativo que en la última actualización de esta Ley, publicada el 22 de septiembre de 2015 y en vigor desde el 7 de octubre de este mismo año, se haya incluido un nuevo capítulo –Capítulo III– con un único e igualmente nuevo artículo 15 que establece el “Marco estratégico de la Infraestructura Verde y de la conectividad y restauración ecológicas”.

La Ley 42/2007 establece que las Administraciones “fomentarán la conservación de corredores ecológicos y la gestión de aquellos elementos del paisaje y áreas terrestres y marinas que resultan esenciales o revistan primordial importancia para la migración, la distribución geográfica y el intercambio genético entre poblaciones de especies de fauna y flora silvestres, teniendo en cuenta los impactos futuros del cambio climático” (artículo 47, Ley 42/2007). Más aún, en el nuevo artículo insertado en la Ley se establece lo siguiente:

1. “Para garantizar la conectividad ecológica y la restauración del territorio español, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, con la colaboración de las comunidades autónomas a través de la Comisión Estatal para el Patrimonio Natural y la Biodiversidad, y de otros ministerios implicados, elaborará, en un plazo máximo de tres años a contar desde la entrada en vigor de la presente ley, una Estrategia estatal de infraestructura verde, y de la conectividad y restauración ecológicas, que incorporará una cartografía adecuada que permita visualizar gráficamente la misma. (...)”
2. La Estrategia estatal de infraestructura verde y de la conectividad y restauración ecológicas tendrá por objetivo marcar las directrices para la identificación y conservación de los elementos del territorio que componen la infraestructura verde del territorio español, terrestre y marino, y para que la planificación territorial y sectorial que realicen las Administraciones públicas permita y asegure la conectividad ecológica y la funcionalidad de los ecosistemas, la mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático, la desfragmentación de áreas estratégicas para la conectividad y la restauración de ecosistemas degradados.
3. La Estrategia estatal de infraestructura verde tendrá en especial consideración, entre otros, los espacios protegidos, hábitats en peligro de desaparición y de especies en peligro de extinción, áreas de montaña, cursos fluviales, humedales, vías pecuarias, corrientes oceánicas, cañones submarinos, las rutas migratorias que faciliten la conectividad, y los sistemas de alto valor natural originados como consecuencia de las buenas prácticas aplicadas por los diferentes sectores económicos, así como los hábitats prioritarios a restaurar, los terrenos afectados por los bancos de conservación de la naturaleza y los instrumentos utilizados por las administraciones competentes en la aplicación del Convenio Europeo del Paisaje, hecho en Florencia el 20 de octubre del año 2000.
4. Basándose en las directrices de la Estrategia estatal, las comunidades autónomas desarrollarán, en un plazo máximo de tres años a contar desde la aprobación de dicha Estrategia estatal, sus propias estrategias, que incluirán, al menos, los objetivos contenidos en la estrategia estatal”.

(Artículo 15, Capítulo III, Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, última actualización de 22 de septiembre de 2015; el subrayado es nuestro).

Ya con antelación a esa regulación normativa y, más aún, a raíz de la primera versión de la Ley 42/2007, que, aunque incluía la referencia explícita a la conectividad ecológica, lo hacía de forma menos detallada y normativa, se comenzaron a poner en marcha distintas iniciativas a para fomentar la conectividad ecológica entre espacios protegidos. Así, se han desarrollado estudios con el objetivo de diseñar corredores ecológicos en el País Vasco (Gurrutxaga, 2005) y en Asturias (García, 2008), para estudiar y mejorar la conectividad ecológica en Murcia y Madrid e incluso se ha llegado a declarar la figura legal de corredor ecológico en Extremadura (EUROPARC, 2009).

A parte de estas iniciativas, merece la pena destacar otros casos en los que se ha trabajado la conectividad ecológica a otras escalas más allá de la regional o autonómica, como es la experiencia del proyecto LIFE+ promovido por la Fundación Oso Pardo para favorecer la conectividad entre las poblaciones de oso en la Cordillera Cantábrica, así como estudios sobre la conectividad ecológica en las áreas metropolitanas de Barcelona (Marull & Mallarach, 2005), Vitoria (Mallarach, 2004) o Valladolid (Herrera Calvo, 2013).

Sin embargo, en la comunidad autónoma de Aragón no se han desarrollado estudios con el objetivo de diseñar un entramado de corredores ecológicos para la Red Natura 2000. Aun así, en la Estrategia de Ordenación Territorial de Aragón (EOTA, accesible en <http://www.aragon.es/eota>, Decreto 202/2014, de 2 de diciembre, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba la Estrategia de Ordenación Territorial de Aragón) viene recogido el fomento de la conectividad ecológica dentro del objetivo específico 6.4. “Corredores ecológicos y recuperación del hábitat”, que, en la enumeración de objetivos, estrategias y normas detalla en función de los siguientes ítems: E1. Permeabilidad y conectividad de los corredores ecológicos. E2. Otros corredores ecológicos. E3. Mantenimiento de la función de conexión de los corredores ecológicos con el tejido urbano. E4. Prioridad de usos en los conectores ecológicos. E5. Excepcionalidad del desarrollo urbanístico en los conectores ecológicos. E6. Corredores fluviales. E7. Instalaciones deportivas de carácter extensivo. E8. Conectividad ecológica entre las distintas áreas protegidas. E9. Conectividad biológica y territorial de los espacios de mayor valor ambiental y cultural. E10. Análisis del contexto territorial de la conectividad. E11. Vías pecuarias. E12. Recuperación de hábitats. N1. Directriz especial de corredores ecológicos

Además, ya en las Directrices Parciales de Ordenación Territorial del Pirineo (Decreto 291/2005, de 13 de diciembre, del Gobierno de Aragón) se preveía su creación, ya que en su artículo 19 se indica que se adoptarán las medidas necesarias para favorecer la conectividad ecológica entre los espacios de la Red Natural de Aragón y los pertenecientes a la Red Natura 2000, además de que se establece que los corredores ecológicos que discurren por suelo no urbanizable deberán ser clasificados como suelo no urbanizable especial por medio de los distintos planes urbanísticos.

1.3. Objetivos

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Master es realizar una aproximación metodológica a través de los SIG para el diseño de corredores ecológicos entre espacios de la Red Natura 2000 de la margen izquierda del Ebro en la Comunidad Autónoma de Aragón, que pueda ser extrapolable al resto de la Comunidad.

Se centrará más, por tanto, en el módulo de integrar y combinar variables que en la propia obtención final de una red definitiva de corredores ecológicos que ya pudiera tomarse en consideración por las distintas administraciones; esto último precisaría mucho más tiempo y, sobre todo, la participación de diversos agentes y grupos de interés, singularmente los gestores. No obstante, nuestro trabajo sí pretende ser un punto de partida a tener en cuenta en el futuro diseño de dicha red, así como nuestros resultados podrán ser utilizados para su validación y evaluación; no en vano se ha trabajado en contacto directo con la Administración para la definición de ciertos criterios.

Como objetivos concretos se proponen los siguientes:

- Obtener una primera cartografía básica de corredores e itinerarios preferentes de desplazamiento entre espacios de la Red Natura 2000 de Aragón en la margen izquierda del Ebro.
- Estudiar cómo pueden influir determinadas variaciones en el tratamiento de los datos de entrada, que se integrarán dentro del método SIG a seguir, sobre los resultados finales de la red de corredores ecológicos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El área de estudio considerada en este trabajo se corresponde con la Comunidad Autónoma de Aragón, aunque en el presente trabajo se han restringido los análisis y los resultados a la zona delimitada en la margen izquierda del Ebro en dicha Comunidad.

2.2. Pasos necesarios para diseñar redes de corredores ecológicos

Si bien no existe una serie de pasos predeterminados a la hora de diseñar redes de corredores ecológicos, sí que se puede identificar un patrón relativamente común en los trabajos y estudios que tienen esta finalidad, al igual que existen publicaciones que tratan de resumir o, bien, explicar las bases de este procedimiento de cara a hacerlo más sencillo y aplicable para los gestores que deban afrontar esta tarea (Beier *et al.*, 2006).

2.2.1. Definir los núcleos a conectar

En primer lugar, evidentemente, se debe definir claramente cuál es el objeto de conexión. Se pueden encontrar situaciones en las que la meta sea fomentar la conectividad de una especie en concreto, de cara a mejorar su estado de conservación, o bien se suelen dar casos en los que se pretende conectar áreas determinadas, como en el presente trabajo.

Existen diversas experiencias respecto al primer supuesto mencionado en el párrafo anterior, como la ya mencionada del oso pardo en la Cordillera Cantábrica. En este tipo de estudios en los que el objetivo sea mejorar la conectividad de una especie en concreto, el primer paso para diseñar los corredores ecológicos de la misma es identificar cuáles son sus áreas de distribución y campeo.

Aunque, como se ha indicado, por otro lado abundan los trabajos en los que la red de corredores ecológicos se diseña a partir de una serie de espacios determinados entre los cuales se quiere fomentar la conectividad. En estos supuestos, después de delimitar cuáles serán los espacios a conectar, se suelen seleccionar grupos de especies suficientemente representativas de dichos lugares para modelar los corredores ecológicos en función de sus necesidades.

La utilización de especies de fauna como punto de partida es algo fundamental en el diseño de redes ecológicas, ya que una de las principales funciones de los corredores es fomentar el desplazamiento de seres vivos entre los núcleos que conectan. Aún así existen algunos estudios que, dada la complejidad de la obtención y manejo de datos de fauna concreta, proponen metodologías que no hacen necesario recurrir a información concreta relativa a la fauna para la modelización de la red, como es el caso de los trabajos de Mallarach (2004), Marull y Mallarach (2005) o Beier y Brost (2010), aunque los resultados de estos trabajos podrían considerarse en cierto modo generalistas, por lo que sus autores suelen recomendar sus métodos como un elemento complementario de trabajos más exhaustivos para fomentar la conectividad ecológica.

Cabe destacar, además, que el uso de grupos determinados de especies, como grandes mamíferos, o especies generalistas para diseñar redes de corredores ecológicos ha sido en varias ocasiones objeto de crítica por parte de algunos autores (Beier *et al.*, 2006), ya que las necesidades ecológicas de dichos grupos pueden no llegar a coincidir con la totalidad de especies presentes en el área de estudio, lo que derivaría en que la red ecológica diseñada no sería totalmente efectiva al excluir determinados taxones.

2.2.2. Identificar los factores que afectan a la conectividad en el área de estudio

Una vez se han definido las áreas y las especies a conectar, el siguiente paso consiste en caracterizar el hábitat de las mismas en función de la cobertura y usos del suelo en el área de estudio, poniendo énfasis en la identificación de las distintas barreras a la conectividad que se hallen presentes en la misma.

Este es un paso muy importante, ya que en él se definen las principales variables que se integrarán en el análisis para el diseño de la red de corredores ecológicos, y los resultados del mismo variarán en función de cómo se escojan y se traten dichos datos

2.2.3. Elección y utilización de la herramienta SIG adecuada para el diseño de la red ecológica

Una vez se conocen las variables que afectan a la conectividad ecológica en el área de estudio, se procede al análisis de las mismas, resultado de lo cual se obtendrá la red de corredores ecológicos. Este análisis se realiza a través de sistemas de información geográfica (SIG), ya que constituyen la herramienta idónea para resolver problemas que implican el uso de datos espaciales georreferenciados y, por lo tanto, para integrar las variables consideradas.

Actualmente se pueden encontrar diversas herramientas de software que son útiles para el diseño y evaluación de redes ecológicas, por ejemplo, un método muy utilizado es el *Least Cost Path* (LCP), que puede ejecutarse fácilmente con las herramientas por defecto de ArcInfo® (Adriaensen *et al.*, 2003; García; 2008; Gurrutxaga *et al.*, 2010); así como otras que han sido creadas específicamente para este fin, como *Circuitscape* (Shah & McRae, 2008), *Linkage Mapper* (WHCWG, 2010), *Corridor Designer* (Majka *et al.*, 2007) o *Conefor Sensinode* (Saura & Torné, 2009). El tipo de datos requeridos para poder utilizar dichas herramientas suele variar entre ellas, por lo que es conveniente estudiar cuál se adapta mejor al tipo de trabajo que se esté realizando y a los datos de los que se parte.

2.2.4. Revisión y análisis de los resultados

Por lo general, tras la ejecución de la herramienta SIG escogida, se suele obtener una serie de capas que potencialmente constituyen la red de corredores ecológicos que se pretende diseñar; sin embargo, conviene revisar estos resultados antes de incorporarlos en algún tipo de toma de decisiones. No hay que olvidar que son el fruto de un proceso relativamente automático y, por lo tanto, el usuario debe comprobar que los resultados guardan coherencia con la realidad ecológica del área de estudio.

Además de esto, también es conveniente validar los resultados obtenidos, una buena forma de ello es la utilización de más de una herramienta para la ejecución del modelo, de modo que pueda compararse la similitud de distintos métodos.

En este paso resulta interesante realizar, además, otros análisis adicionales, como estudiar el tipo de territorio que atraviesan los corredores obtenidos y su estado ecológico, de modo que pueda evaluarse la dificultad de creación de dichos corredores, así como las zonas en las que sea necesario una restauración de la conectividad o la priorización de la creación de unos frente a otros.

2.2.5 Interpretación de resultados e incorporarlos en la toma de decisiones.

El último paso consistiría en integrar los resultados de este tipo de trabajos en los procesos de toma de decisiones y planificación que estén relacionados con cualquier tipo de proyecto o procedimiento que pueda afectar directa o indirectamente en la conectividad ecológica del área de estudio.

2.3. Selección de áreas y especies objetivo a conectar

Como ya se ha señalado anteriormente, las distintas normas aplicables en la Comunidad Autónoma de Aragón que demandan el fomento de la conectividad entre espacios naturales protegidos, lo hacen refiriéndose a los espacios que conforman la Red Natura 2000. Por este motivo, aunque pueden existir configuraciones distintas, se han escogido los espacios de la Red Natura 2000 de Aragón como núcleos principales a conectar.

En Aragón existe un total de 201 espacios de la Red Natura 2000, de los cuales 156 son LIC y 45 ZEPA, abarcando entre ambas figuras una superficie total de 13.612 km², lo que supone un 28,5% de la superficie de la Comunidad Autónoma.

Ahora bien, dado que estas zonas son las que se hallan indicadas en los textos legales, los espacios de la Red Natura 2000 constituyen el conjunto mínimo de áreas entre las que se debe priorizar la conectividad ecológica. Pero el espacio cubierto por los núcleos a conectar puede estar sujeto a varia-

ciones, ya que se podrían tener en cuenta otro tipo de configuraciones, como incluir en la selección de núcleos los espacios de la Red Natural de Aragón, los ámbitos de los Planes de Ordenación de Recursos Naturales o incluso posibles delimitaciones futuras de dichos espacios protegidos, motivado esto último por una necesidad de diseñar la red de corredores ecológicos con proyección en el tiempo.

También hay que tener en cuenta que diversos autores suelen emplear métodos adicionales para escoger la red de áreas a conectar, además de considerar los espacios ya protegidos; de modo que en función de las características ecológicas, estado de conservación o interés de cada unidad del territorio, identifican zonas que pueden actuar como núcleos (García, 2008, Hctor *et al.* 2000, Marull & Mallarach, 2005).

Aun así, los núcleos a conectar en este trabajo han debido ajustarse a las condiciones marcadas por el tiempo disponible y a los objetivos del mismo; por lo tanto, se han limitado a los espacios de la Red Natura 2000 que se encuentran dentro del área concreta de estudio.

Hay que tener en cuenta que en la Comunidad Autónoma de Aragón podemos encontrar una gran variedad de ambientes, por lo que es probable que haya espacios que no tenga sentido ecológico conectar entre sí. Es necesario, por lo tanto, establecer una serie de núcleos con características comunes que sean objeto de ser enlazados a través de corredores ecológicos. Como ejemplo de esto último podemos prestar atención al caso de trabajos similares realizados en Asturias (García, 2008) o en Florida (Hctor *et al.*, 2000), en los que previamente se establecen distintos tipos de corredores y espacios a conectar en función del hábitat predominante en el espacio que ocupan.

Para la situación planteada en este trabajo, en la que se va a trabajar con espacios de la Red Natura 2000 de la margen izquierda del Ebro en Aragón, se ha contado con la ayuda de expertos pertenecientes al Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón (CPNA). Conjuntamente con ellos se han establecido una serie de 5 subgrupos en este sector, entre los que, por sus características, es interesante fomentar la conectividad ecológica. Estos aparecen representados en la figura 2.

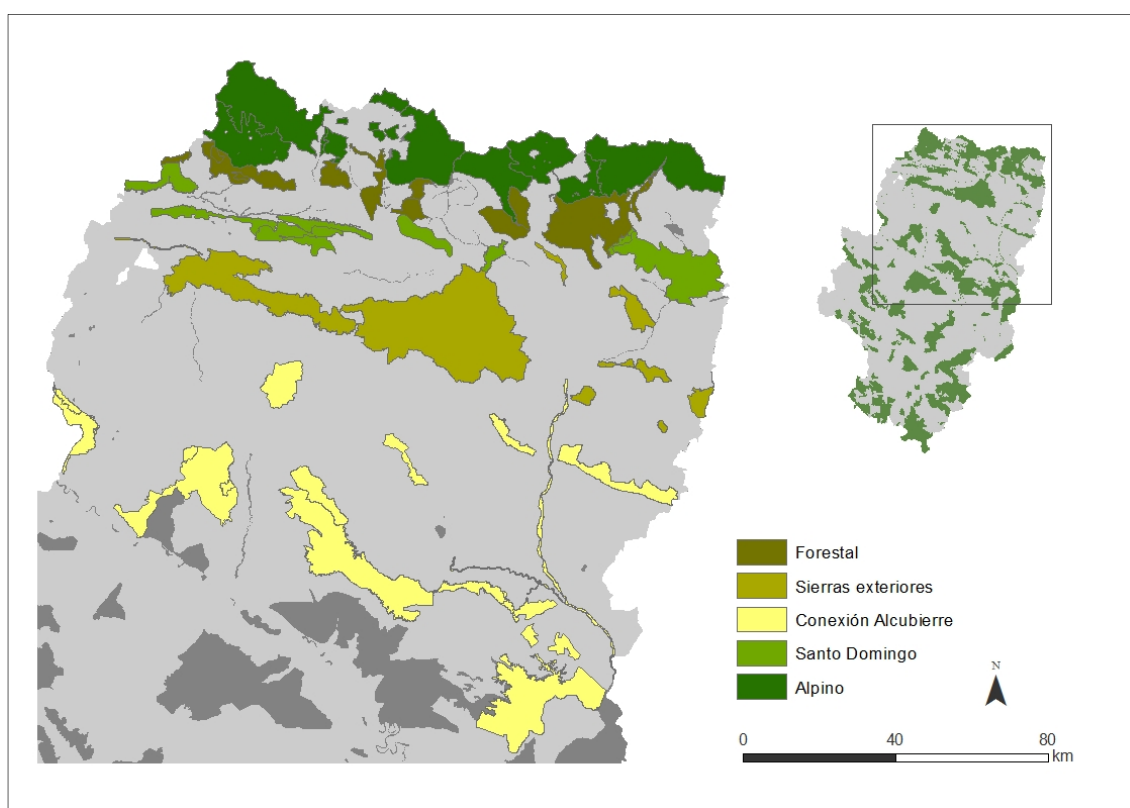


Figura 2. Grupos de espacios de la Red Natura 2000 de Aragón en los que se centra este trabajo. Su denominación parte de algún elemento natural relevante presente en dichos espacios. Elaboración propia.

Conviene destacar que se han suprimido para el análisis los espacios de la Red Natura 2000 que eran demasiado pequeños como para constituir núcleos viables en el diseño de corredores ecológicos,

como son los espacios fluviales, aunque estas zonas sí que pueden funcionar bien como corredores ecológicos (Bennet, 2003). A pesar de ello, se han mantenido los espacios fluviales del río Ésera y el de los ríos Cinca y Alcanadre, dado que las dimensiones de estas áreas son lo suficientemente grandes como para permitir que funcionen como núcleos a conectar. Una vez delimitados los espacios a conectar, se ha procedido a la selección de especies objetivo, para lo cual también se ha contado con la ayuda de miembros del CPNA.

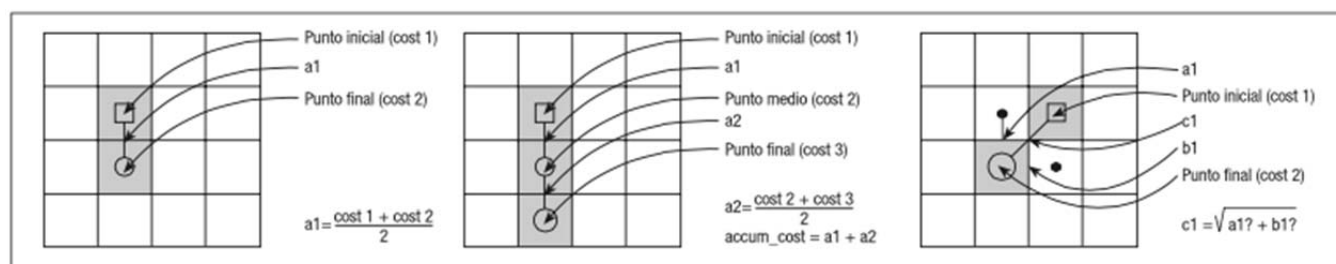
En un principio se estableció el criterio de que la lista de especies consideradas fuera una selección lo suficientemente representativa de las mencionadas en la Directiva Hábitats y que son objeto de protección en los espacios de la Red Natura 2000. Sin embargo, muchas de ellas son de porte pequeño y tienen distancias de dispersión muy limitadas o, por el contrario, sus datos conocidos son insuficientes para llevar a cabo este tipo de estudios, por lo que su utilización no es adecuada en el diseño de corredores ecológicos a escala regional.

Por este motivo se ha optado por realizar el estudio basándose en el grupo de especies de mamíferos forestales de talla grande o media que puedan recorrer distancias kilométricas en sus desplazamientos. Este grupo puede contener taxones como corzo, jabalí y ciervo, por lo que el modelado de la red se ha basado en requerimientos de estas especies. El grupo de los grandes mamíferos es frecuentemente utilizado ya que es muy sensible al efecto de barreras lineales asociadas a vías de comunicación y una red de corredores ecológicos diseñada a partir de datos de este grupo puede beneficiar a muchos otros taxones presentes en el territorio considerado (Gurrutxaga *et al.*, 2011).

2.4 Elección de un método SIG apropiado para el diseño de la conectividad ecológica

El diseño de corredores ecológicos es un asunto que ha sido abordado por numerosos trabajos y es algo que requiere el uso de los SIG para integrar todas las variables que intervienen en el proceso. A este efecto, existen determinados métodos y herramientas que son válidas para conseguir este objetivo, del mismo modo que hay algunas que han sido creadas específicamente para modelar corredores y analizar la conectividad ecológica.

Uno de los métodos más comúnmente utilizados (Adriaensen *et al.*, 2003; García; 2008; Gurrutxaga *et al.*, 2010), dada su relativa sencillez de aplicación, es el conocido como método *Least Cost Path* (LCP). Este método está basado en el algoritmo *Cost Distance* de Arcinfo®, que se resume en la figura 3. Dicho algoritmo calcula la mínima distancia de coste acumulado entre dos núcleos o nodos. Así, el coste de desplazamiento entre dos celdas será la media de la suma del coste de ambas, de modo que, en el raster de salida, a cada celda se le asigna el coste de desplazamiento acumulado desde la celda de origen más cercana. A partir de este raster de salida se calculan los caminos de mínimo coste



entre núcleos utilizando el algoritmo *Cost Path*.

Figura 3. Resumen del funcionamiento del algoritmo *Cost Distance*. Tomado de García (2008).

Por lo tanto, para ejecutar este método se necesita una capa con los núcleos o nodos a conectar, que en este caso sería la de los espacios naturales entre los que interesa diseñar corredores ecológicos; se precisa también una capa raster de fricción, en la que el valor de cada celda debe corresponder con el coste o fricción que presenta dicha celda al desplazamiento de la especie o grupo de especies objetivo para la cual se está diseñando el corredor.

El resultado entonces es una capa vectorial de líneas constituyendo los caminos óptimos que deberían seguir los corredores. Dada su sencillez, además del hecho de que los datos de entrada que se

disponen se adaptan bien a este modelo, para este trabajo se ha decidido trabajar con él.

El siguiente paso entonces es encontrar una herramienta adecuada para ejecutarlo. Todas las versiones actuales de ArcGis incluyen en su set de herramientas comandos básicos que permiten llevar a cabo este procedimiento. Sin embargo, los resultados que se obtienen de esta forma pueden ser demasiado groseros en comparación con otras herramientas que han sido diseñadas específicamente para modelar corredores ecológicos; además, con el método que ofrece ArcGis sólo se puede hacer el cálculo para un par de núcleos cada vez, por lo que el proceso puede acabar siendo muy costoso incluso si llega a automatizarse.

Principalmente por ello se ha escogido concretamente la herramienta *Linkage Mapper* (WHCWG, 2010). Esta herramienta tiene la particularidad de que ha sido programada específicamente para diseñar corredores ecológicos de nivel regional basándose en el método LCP, optimizada de modo que puede operar con toda la red de núcleos a la vez, lo que agiliza el proceso y cuyo análisis permite obtener resultados más refinados que los que resultarían aplicando el método LCP convencional. Aunque la herramienta fue en principio diseñada para modelar redes ecológicas en el estado de Washington, su método es perfectamente aplicable a otras regiones como la considerada en este trabajo. Además, proporciona otros resultados que permiten ampliar el análisis de la conectividad.

2.4.1. Funcionamiento de *Linkage Mapper*.

El flujo de trabajo de *Linkage mapper* consiste en 5 pasos:

- El primero y el segundo tienen como finalidad establecer los pares de núcleos a conectar de modo que solo se dibujen corredores entre aquellos que sean adyacentes.
- En primer lugar se identifica la vecindad entre los núcleos a conectar.
- Después, en función de la vecindad calculada, el programa identifica redes de espacios a conectar.
- El tercer paso consiste en obtener, para cada núcleo, una capa *Cost Distance* similar a la que se describió anteriormente cuando se explicó el método LCP. En este paso, además, el programa calcula los LCP entre las áreas a conectar.
- En el cuarto paso, opcionalmente, el usuario puede añadir restricciones para modificar la red de LCPs obtenida, de modo que se puedan conectar clústeres de espacios entre sí.
- En el quinto y último paso, se normalizan y combinan los rasters *Cost Distance* obtenidos en uno solo, al igual que se dibuja una única capa de corredores y se guardan los resultados en una geodatabase.

Esta herramienta sólo requiere dos datos de entrada que debe proporcionar el usuario, que son los mismos que en el método LCP explicado anteriormente: una capa de entidad es con los núcleos que interese conectar y otra capa raster de resistencia o fricción, en la que el valor de cada celda se corresponda con la dificultad que tiene la especie objetivo para atravesar dicho espacio, de modo que cuanto mayor sea el valor de la celda resulte más complicado para dicha especie circular por esa zona.

Los resultados más importantes que se obtienen del uso de la herramienta *Linkage Mapper* son los itinerarios de menor coste o *low cost paths* entre los núcleos a conectar, así como las capas *Cost Distance*. La utilidad de estos últimos raster radica en que el set de herramientas de *Linkage Mapper* permite establecer un umbral de coste en dichas capas, de modo que en función del umbral determinado se obtiene otro raster en el que se mostrarán únicamente las celdas cuyo valor en la capa *cost distance* no exceda el fijado, funcionando también esta última capa resultante como una capa de corredores.

2.5. Preparación de los datos de entrada del modelo

Como ya se ha dicho, la herramienta necesita dos datos de entrada fundamentales:

- Una capa vectorial con los núcleos a conectar.
- Una capa raster de fricción, cuyos valores de celda indiquen la dificultad del tránsito de especies por ellas.

Sin embargo, aunque el número de inputs es pequeño, es necesario llevar a cabo una serie de pasos y operaciones para llegar a obtenerlos.

2.5.1. Obtención de la capa de núcleos a conectar

Ya se ha comentado que los espacios que interesa conectar en Aragón son los pertenecientes a la Red Natura 2000. Originalmente se ha partido de dos capas distintas:

- Capa de entidades de polígonos con los espacios correspondientes a Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPAs) de Aragón.
- Capa de entidades de polígonos con los espacios correspondientes a Lugares de Importancia Comunitaria (LICs) de Aragón.

Para el correcto funcionamiento de la herramienta, se requiere que los núcleos a conectar pertenezcan a una misma capa, por lo que debe conseguirse una sola capa con los polígonos de ambas figuras de protección. Para ello, dado que los polígonos solo se necesitan a efectos espaciales y que hay cierto número de ZEPAs y LICs que comparten espacio, se ha empleado la herramienta unión con ambas capas y luego se ha hecho un *merge* de los polígonos que se solapaban en ambas.

Además, para que la herramienta trabaje más rápido, los polígonos de LICs y ZEPAs se han dividido en distintas capas según los ejes de interés de conexión, los cuales se mostraron anteriormente.

En cada una de estas nuevas capas se ha introducido un nuevo campo numérico entero en la tabla de atributos, el objetivo de esto es posibilitar el funcionamiento de la herramienta utilizada, ya que para poder operar necesita discernir los distintos núcleos a conectar de modo que a cada uno de ellos se le asigne un número entero superior a 1 y diferente del resto. Este requerimiento se ha cumplido creando ese nuevo campo y asignando en el mismo el valor del FID del polígono correspondiente sumándole una unidad.

2.5.2. Obtención de la capa de fricción

La capa de fricción será la que determine la dificultad de desplazamiento entre los núcleos a conectar por parte de las especies objetivo. Esta dificultad se deriva de las distintas coberturas y usos del territorio; por lo tanto, su construcción debe basarse en la integración de las distintas unidades que componen el paisaje.

Aunque el área concreta en la que se realizarán los cálculos para obtener corredores ecológicos no es la Comunidad Autónoma de Aragón en su totalidad, sí se va a obtener la capa de fricción para la extensión completa de dicha división administrativa, ya que la herramienta seleccionada puede funcionar del mismo modo y así las capas de fricción obtenidas podrán volver a usarse en futuros estudios.

Dado que el resultado será una capa raster, antes de comenzar a realizar las operaciones para la obtención de la misma, se debe decidir el tamaño de celda que esta tendrá, que debido a la extensión territorial que se abarca en este estudio se ha preferido utilizar un tamaño de celda de 50x50 m.

A continuación, se han seleccionado las variables a partir de las cuales se construirá la capa de fricción, que son las siguientes:

- Cobertura de suelo en el área de estudio. Para el presente trabajo se ha escogido una capa adaptada para Aragón del *Mapa Forestal de España 1:50000* (MFE50, accesible en <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/>).
- Barreras al tránsito de especies no incluidas en la capa de cobertura de suelo. En este caso se han seleccionado dos capas, una de carreteras y otra de la red ferroviaria, descargadas de IDE Aragón (Instituto Geográfico de Aragón, accesible en <http://idearagon.aragon.es/>).
- Otro tipo de elementos que puedan influir de algún modo en la conectividad. En este conjunto de variables se han incluido, embalses, regadíos (accesibles en el Geoportal SITEbro de la Confederación Hidrográfica del Ebro, <http://iber.chebro.es/geoportal/>), las pistas de esquí (capa digitalizada por el autor expresamente para este trabajo), vías pecuarias, líneas eléctricas, Lugares de Interés Geológico o LIG (facilitadas por el CPNA) y Montes de Utilidad Pública (Facili-

tada por el Instituto Geográfico de Aragón a través de IDE Aragón). Como se puede deducir, algunas de estas variables no son directamente perceptibles por las especies de fauna, concretamente los Montes de Utilidad Pública y los LIG; sin embargo, expertos pertenecientes al CPNA han aconsejado su inclusión en el modelo, ya que son figuras de gestión del territorio por parte de la Administración Pública y, por lo tanto, es más fácil crear y gestionar un corredor ecológico en estas zonas.

Los mapas con los variables que han intervenido en la creación de las capas de fricción se adjuntan en el Anexo I.

Cada una de las variables mencionadas constituye una capa que debe ser tratada previamente antes de que sea incluida en el modelo para construir la capa de fricción.

La capa de cobertura de suelo debe reclasificarse, de modo que a las categorías preexistentes se les otorgue una serie de valores de fricción; así, cuanto más alto sea el valor otorgado a cada categoría, menor será la afinidad de la especie en cuestión por el elemento del paisaje que representa esa categoría. Estos valores se asignan en función del grupo de especies con el que se está trabajando y para ello se debe tener en cuenta la capacidad de las especies consideradas para desplazarse, obtener refugio, alimento en dichos lugares, así como la capacidad de estos de acoger poblaciones de dichas especies.

En definitiva, lo que se hace en este paso es representar la afinidad del hábitat de las especies en el territorio considerado. Se trata del paso más importante en el diseño de corredores ecológicos, ya que es donde se enlaza la ecología con los SIG; los resultados obtenidos dependerán fundamentalmente de esta asignación de valores.

Muchos autores prefieren trabajar con un rango de valores de fricción que se mueva entre un máximo y un mínimo, generalmente entre 1 y 100 ó 1000 (Gurrutxaga, 2005; Beier, 2006; García, 2008; Herrera Calvo, 2013). En este caso, tanto siguiendo el ejemplo de estos autores como las recomendaciones de funcionamiento de la herramienta *Linkage Mapper*, se ha optado por un rango que varía entre 1 y 1000, de modo que 1 sea el valor que indique mínima fricción y 1000 la máxima.

Como ejemplo de valores de resistencia asignados a distintas categorías de cobertura de suelo de un mapa forestal, al igual que en el caso de este trabajo, para un grupo de especies de mamíferos forestales, encontramos las otorgadas por Gurrutxaga (2005), cuyas asignaciones encontramos desglosadas en la figura 4.

Uso	Resistencia	Uso	Resistencia
Agua	100	<i>Arbutus unedo</i>	1
Urbano	1.000	<i>Buxus sempervirens</i>	5
Roquedos	40	Espinos	5
Canteras	90	Forestal arbolado	Mín. 1, Máx. 20
Vertederos	90	Labor	60
Marismas	80	Huerta	60
Prados	40	Invernaderos	100
Pastizales	30	Viveros	50
Matorrales	5	Frutales y viñedos	50
<i>Quercus coccifera</i>	5		

Figura 4. Valores de resistencia asignados a las categorías de cobertura de suelo por Gurrutxaga (2005).

Siguiendo este ejemplo y la consulta a expertos del CPNA, conocedores de las especies que se están manejando en este trabajo, se han asignado originalmente los siguientes valores a las categorías de la capa del MFE50 adaptado, los cuales se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Asignación de valores de resistencia a las categorías de cobertura del suelo del MFE50.

Uso del suelo	Resistencia
Agrícola	100
Agua	00
Artificial	1000
Monte arbolado ralo. Alineaciones estrechas	20
Monte arbolado ralo. Bosquetes pequeños.	15
Monte arbolado ralo. Ribera arbolada	10
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Cortafuegos	30
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Incendios	70
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Talas	70
Monte arbolado. Alineaciones estrechas	10
Monte arbolado. Bosque de plantaciones	20
Monte arbolado. Bosque	1
Monte arbolado. Bosquete pequeños	5
Monte arbolado. Ribera arbolada	1
Monte con arbolado ralo. Bosque de plantaciones	30
Monte con arbolado ralo. Bosque	10
Monte desarbolado con arbolado disperso. Arbolado disperso	35
Monte desarbolado. Herbazal o pastizal	40
Monte desarbolado. Humedal	50
Monte desarbolado. Matorral	30
Monte sin vegetación superior. Superficie con escasa o nula vegetación	60

Tabla 2. Variaciones introducidas en los valores de resistencia asignados originalmente a las categorías de cobertura del suelo del MFE50.

Uso del suelo	Variación 1	Variación 2
Agrícola	100	300
Agua	300	300
Artificial	1000	1000
Monte arbolado ralo. Alineaciones estrechas	20	20
Monte arbolado ralo. Bosquetes pequeños.	15	15
Monte arbolado ralo. Ribera arbolada	10	10
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Cortafuegos	30	30
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Incendios	70	70
Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Talas	70	70
Monte arbolado. Alineaciones estrechas	10	10
Monte arbolado. Bosque de plantaciones	20	20
Monte arbolado. Bosque	1	1
Monte arbolado. Bosquete pequeños	5	5
Monte arbolado. Ribera arbolada	1	1
Monte con arbolado ralo. Bosque de plantaciones	30	30
Monte con arbolado ralo. Bosque	10	10
Monte desarbolado con arbolado disperso. Arbolado disperso	5	35
Monte desarbolado. Herbazal o pastizal	40	40
Monte desarbolado. Humedal	50	50
Monte desarbolado. Matorral	5	30
Monte sin vegetación superior. Superficie con escasa o nula vegetación	60	60

Como se puede observar, estos valores han sido asignados en función del porcentaje de cobertura forestal que se deduce según el tipo de categoría. Sin embargo, se ha observado que gran parte del área considerada está cubierta por elementos de la categoría agrícola y matorral. Por lo que una variación en estos valores podría tener efectos significativos en los resultados obtenidos. Por consiguiente, dado que uno de los objetivos del trabajo es observar posibles diferencias en los resultados obtenidos al añadir variaciones en el modelo, se han configurado dos nuevas reclasificaciones de las categorías introduciendo variaciones en los valores de las mismas, las cuales pueden corresponder, al igual que la configuración original, con valores otorgados para mamíferos forestales. Dichas variaciones se pueden observar en la tabla 2.

Como se puede observar en la tabla 2, las variaciones introducidas han sido, por un lado, disminuir el valor de resistencia de los matorrales hasta 5, ya que, aunque el grado de cobertura forestal de esta categoría es menor, se puede comprobar que en el trabajo de Gurrutxaga (2005) la categoría de matorrales tiene valores bajos, además de que los expertos consultados sugirieron que era otro tipo de configuración válida para el grupo de especies tratado. Por otro lado, la otra variación introducida ha sido la de incrementar el valor de resistencia asignado a las zonas agrícolas desde 100 hasta 300.

Respecto a las barreras lineales relativas a ejes de comunicación, como se ha indicado antes, se han identificado dos tipos de infraestructuras de este tipo para integrar en el modelo, las cuales suponen un impedimento importante para el tránsito de especies. Se cuenta, por lo tanto, con una capa de carreteras de Aragón y otra de la red ferroviaria de la misma comunidad. A estas barreras se les debe otorgar valores de fricción del mismo modo que a la capa de cobertura del suelo. Para ello se ha tomado de nuevo como ejemplo el trabajo de Gurrutxaga (2005), en el que los valores asignados a cada tipo de barrera fueron los indicados en la figura 5.

IMD (Intensidad media diaria de vehículos) de las carreteras	Resistencia
< 1.000	80
1.000-5.000	100
5.000-10.000	300
10.000-20.000	Sin vallado: 700
	Con vallado: 900
> 20.000	Sin vallado: 800
	Con vallado: 1000
Uso	Resistencia
Vía de tren	70

Figura 5. Valores de resistencia asignados por Gurrutxaga (2005) a las barreras asociadas a infraestructuras lineales.

En la capa de carreteras de Aragón que se ha utilizado para este trabajo se ha hecho la reclasificación de valores expuesta en la tabla 3, mientras que para el caso de la red ferroviaria la indicada en la tabla 4.

Tabla 3. Valores de resistencia asignados a las barreras asociadas a carreteras.

Tipo de vía	Resistencia
Autopista / autovía	1000
Carretera nacional	600
Carretera secundaria	300

Tabla 4. Valores de resistencia asignados a las barreras asociadas a la red ferroviaria

Tipo de vía	Resistencia
AVE	1000
Resto de red ferroviaria	700

Como se ha indicado previamente, se ha tenido en cuenta otra serie de factores que influyen en la conectividad ecológica: embalses, zonas de regadío, vías pecuarias, Montes de Utilidad Pública, LIG, líneas eléctricas y pistas de esquí. El papel de estas capas en el modelo será el de incrementar o disminuir la fricción de los píxeles que sean atravesados por su cobertura, por lo que no se les ha asignado directamente un valor de coste. Esto se ha hecho principalmente porque, por un lado, algunas de estas variables representan usos del suelo que no se traducen en una realidad física tangible, como en el caso de los Montes de Utilidad Pública, sino más bien con figuras de gestión del territorio que abarcan distintas categorías y elementos del paisaje.

Esta última condición no la cumplirían los embalses y las zonas de regadíos, ya que estas capas están ligadas a un solo elemento del paisaje respectivamente. Aun así, su uso viene justificado por la imposibilidad de distinguir entre cultivos de secano y regadío en la capa del MFE50, así como de la dificultad para la modificación simultánea de los valores de fricción de los polígonos de agua de gran superficie. En este sentido, la capa de embalses originalmente obtenida se ha modificado, de modo que se han excluido de la misma todos aquellos con un área inferior a 1 km^2 , considerando entonces que una masa de agua superficial con un área inferior puede ser atravesada con menos dificultad por una especie animal del grupo considerado. De este modo, todas las masas de agua con un área inferior a 1 km^2 conservarán el valor de fricción asignado en la capa de cobertura de suelo, mientras que las del resto se verá incrementado.

Por otro lado, capas como las vías pecuarias y las líneas eléctricas sí constituyen realidades físicas, aunque su efecto en la conectividad ecológica para especies forestales podría no resultar tan determinante como la propia cobertura del suelo; por ello, también se ha considerado oportuno que ponderen los valores de fricción asignados a la misma en lugar de tomarlos como teselas concretas que integran el paisaje y a las cuales se les debiera asignar un determinado valor de coste.

El modo en el que estas variables modificarán los valores originales de la capa de fricción ha sido también consultado y acordado con expertos del CPN, aunque bien es cierto que el modo concreto en el que lo hacen tiene cierta carga subjetiva, ya que no se han hallado otros trabajos que hayan tratado de este modo tales factores, además de que con ello simplemente se pretende enfatizar en el efecto positivo o negativo que estos elementos pueden tener en la conectividad ecológica. Por todo ello, se ha elegido que estas otras variables que influyen en la conectividad ecológica participen en el modelo para construir la capa de fricción como se indica en la tabla 5

Tabla 5. Papel asignado al resto de variables en la configuración de la capa de resistencia.

Variable	Modo en que influye en la resistencia
Vías pecuarias	Reduce la resistencia en un 50%
Montes de Utilidad Pública	Reduce la resistencia en un 50%
LIG	Reduce la resistencia en un 20%
Embalses de área > 1 km^2	Duplica el valor de resistencia del agua
Regadíos	Duplica el valor de resistencia de las zonas agrícolas
Red eléctrica	Aumenta la resistencia en un 30%
Pistas de esquí	Maximiza el valor de resistencia

A modo de recapitulación, la tabla 6 muestra las capas que intervienen en el modelo para crear la superficie de fricción, el tipo de operación que requieren y el modo en el que se integrarán en dicho modelo.

Tabla 6. Integración de todas las variables que intervienen en la construcción de la capa de fricción.

Variable	Formato de datos original	Operación	Integración en el modelo
Mapa forestal	Vectorial polígonos	Rasterizar	Capa base
Carreteras	Vectorial líneas	Rasterizar y reclasificar	Suma
Red ferroviaria	Vectorial líneas	Rasterizar y reclasificar	Suma
Vías pecuarias	Vectorial líneas	Rasterizar y reclasificar	Multiplica x 0,5
Montes de Utilidad Pública	Vectorial polígonos	Rasterizar y reclasificar	Multiplica x 0,5
LIG	Vectorial polígonos	Rasterizar y reclasificar	Multiplica x 0,8
Líneas eléctricas	Vectorial líneas	Rasterizar y reclasificar	Multiplica x 1,3
Embalses	Vectorial polígonos	Rasterizar y reclasificar	Condicional
Regadíos	Vectorial polígonos	Rasterizar y reclasificar	Condicional
Pistas de esquí	Vectorial polígonos	Rasterizar y reclasificar	Suma

Por lo tanto, se cuenta con dos capas que modificarán los valores originales de dos categorías concretas del MFE50, que son las correspondientes a los embalses y los regadíos; las capas de Montes de Utilidad Pública, vías pecuarias, LIG y red eléctrica actuarán ponderando los valores del MFE50 en general; mientras que las carreteras, la red ferroviaria y las pistas de esquí constituirán las principales barreras al tránsito. Con las capas citadas se ha ejecutado el modelo conceptual sintetizado en la figura 6 para obtener la capa de fricción final.

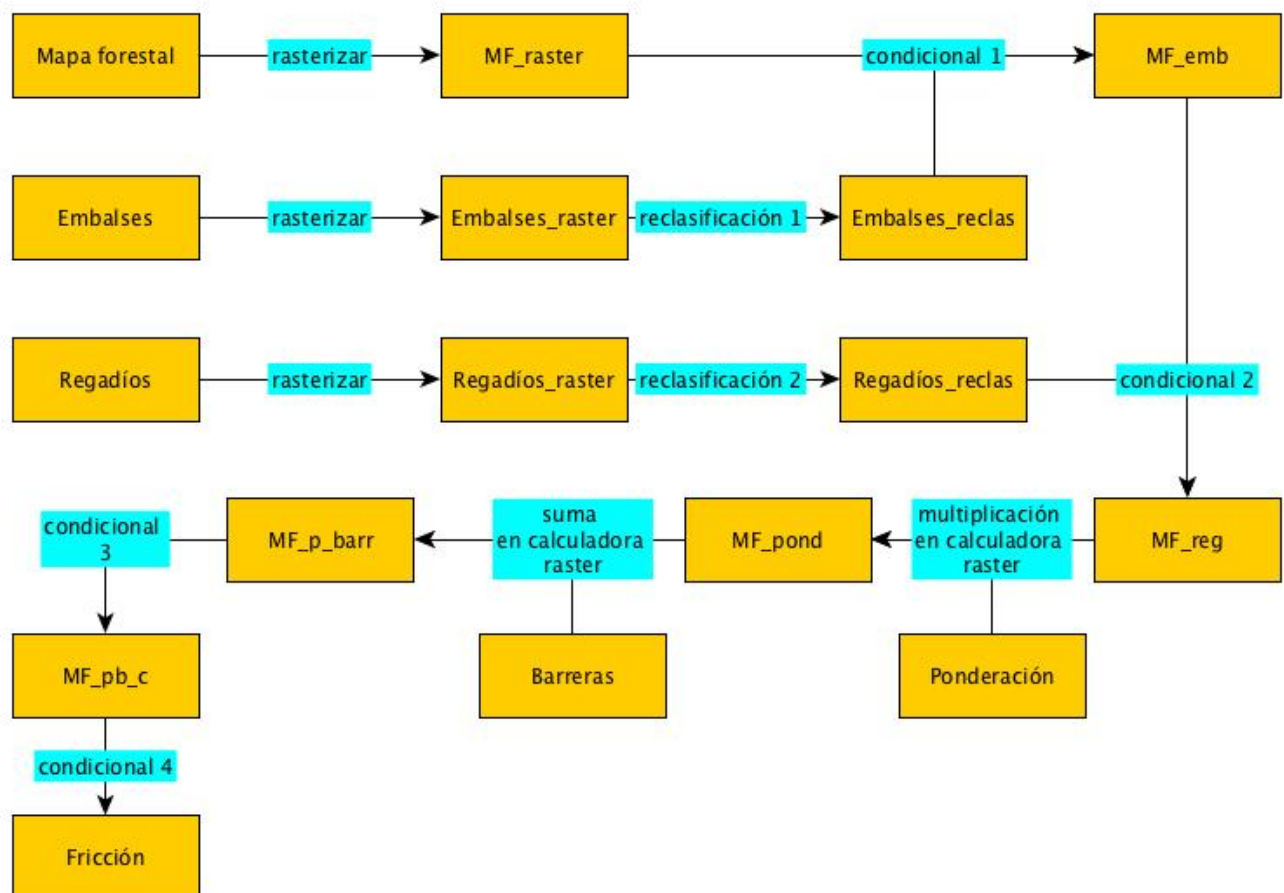


Figura 6. Modelo conceptual del geoproceso para obtener las capas de fricción (elaboración propia).

Como se puede observar en dicho modelo, se parte de la capa de l MFE50, en la que previamente se han ligado los valores de resistencia a cada categoría de su tabla de atributos. Esta capa vectorial se

convierte en formato raster utilizando ese campo de impedancia. Del mismo modo, se han convertido a raster las capas de embales y regadíos, que posteriormente se han reclasificado para que todos sus polígonos tuviesen el mismo valor. A continuación se procede ejecutando la herramienta de condicional utilizando como input la capa de embalses y como valor verdadero el asignado a los polígonos de embalses; a las celdas que cumplan la condición se les asignará el valor de resistencia correspondiente con el doble del valor original de fricción del agua, es decir, 600; en caso de que no la cumplan se les asignará el valor correspondiente de dicha cobertura. Se procede entonces de la misma forma con los regadíos, se aplica un condicional a esa capa, de modo que a aquellas celdas cuyo valor sea el del polígono de la capa de regadíos se les asigne el doble del valor de las zonas agrícolas en la cobertura del MFE50; mientras que las que no cumplan la condición adquirirán el valor de la capa resultante de la ejecución del primer condicional. La capa que se obtiene tras este último paso se combina con la capa de ponderación en primer lugar, mediante una multiplicación de ambas en la calculadora raster, y posteriormente con la capa de barreras mediante una suma. Ambas capas citadas se obtienen según se indica en las figuras 7 y 8. A la capa resultante de la combinación con los elementos de ponderación y las barreras se le aplican dos condicionales, de modo que todas las celdas que sobrepasen el valor de 1000 adquieran el máximo valor de impedancia considerado, es decir, 1000; mientras que por otro lado, a todas aquellas con un valor inferior a 1 se les asignará el mínimo valor de resistencia fijado o, lo que es lo mismo, se les otorgará el valor de 1.

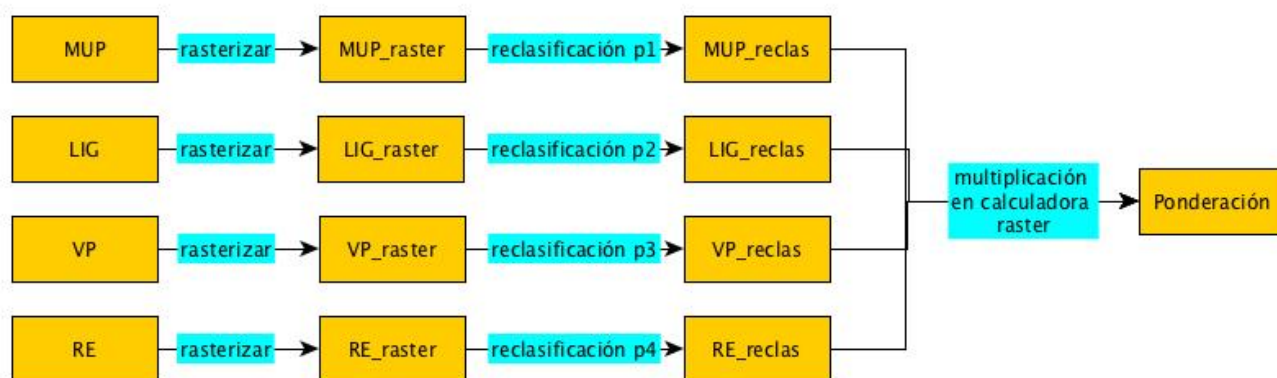


Figura 7. Modelo conceptual del geoproceso para obtener la capa de ponderación (elaboración propia).

Para obtener la capa de ponderación, se han rasterizado todas las capas que variarán los valores de fricción de la cobertura forestal, en concreto los Montes de Utilidad Pública, los LIG, las vías pecuarias (VP) y red eléctrica (RE). Dichas capas se han reclasificado de modo que los píxeles pertenecientes a dichas entidades adquieran respectivamente los siguientes valores, 0,5, 0,8, 0,5 y 1,3, de modo acorde a lo indicado en la tabla 5; al resto de celdas de dichas capas se les ha asignará el valor de resistencia 1. A continuación, las capas resultantes de esa reclasificación se combinan mediante una multiplicación en la calculadora raster.



Figura 8. Modelo conceptual del geoproceso para obtener la capa de barreras (elaboración propia).

Para crear la capa de barreras se ha partido de las capas de carreteras, red ferroviaria y pistas de esquí. Dichas capas se han reclasificado según los valores indicados en las tablas 3 y 4, la capa de pistas de esquí no ha necesitado someterse a una reclasificación de este tipo, ya que se ha digitalizado a mano específicamente para este trabajo y, por lo tanto, desde un inicio se creó un campo en su tabla de atributos con el valor de resistencia correspondiente, que es el máximo considerado. A continuación se han combinado los tres tipos de barreras mediante una suma en la calculadora raster. Para obtener la capa de barreras final se ha reclasificado la capa resultante del último paso, ya que debido a la combinación se han superpuesto algunos valores de las barreras sobrepasando el máximo establecido; así, en los casos en que esto ha sucedido, los píxeles de la capa final adquirirán el valor de resistencia de la barrera que presente más impedancia de las que se hayan superpuesto en dicho píxel.

2.6 Ejecución de la herramienta y análisis de los resultados

Una vez obtenidas todas las capas de fricción se ha ejecutado la herramienta *Linkage Mapper*. Una vez acabado el geo proceso de esta herramienta, se ha fijado un umbral en las capas de distancia de coste que se habían generado, gracias a lo cual se han obtenido las capas raster de los corredores; el valor de umbral fijado de distancia de coste ha sido de 1 km.

Los caminos óptimos y los corredores obtenidos se analizarán mediante una comparación de sus representaciones cartográficas. Además, también se estudiarán las variaciones en los histogramas de las distintas capas de fricción obtenidas.

3. RESULTADOS

3.1 Capas de fricción

Tras la ejecución del modelo para obtener las capas de fricción se han obtenido tres distintas, una por cada configuración planteada. La variación del número de píxeles asignado a los valores de impedancia de cada una se muestra en las figuras 9, 10 y 11.

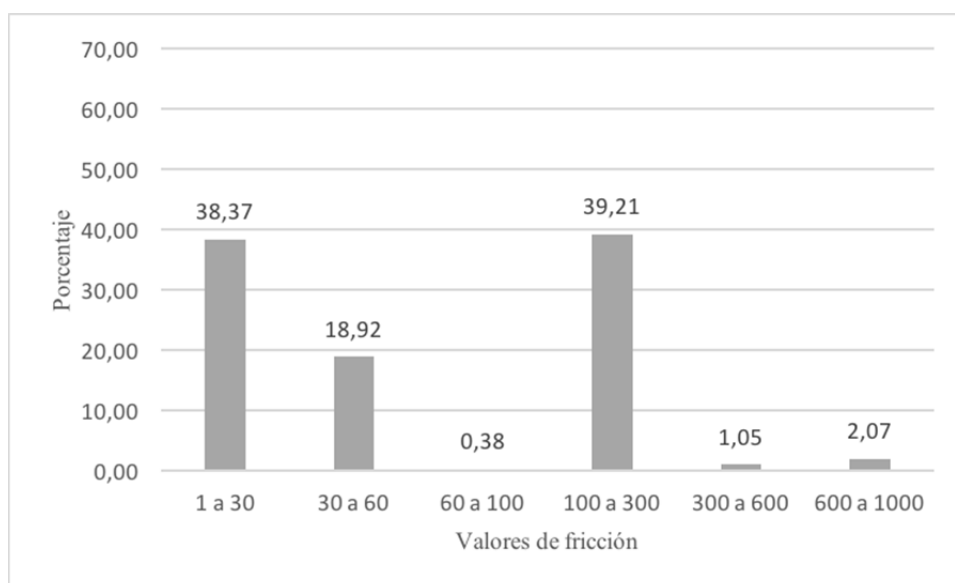


Figura 9. Distribución del porcentaje de píxeles asignados a los distintos valores de impedancia de la capa de fricción obtenida con la configuración original de valores de resistencia.

Como se puede observar en la figura 9, la mayoría de los valores de fricción de la capa obtenida con la configuración original son los que se encuentran comprendidos entre 100 y 300, entre los que se encuentran las zonas agrícolas y carreteras secundarias; seguido de las coberturas vegetales del mapa forestal, cuyos valores se distribuyen entre 1 y 30 para las que presentan mayor cobertura forestal,

mientras que las asignadas a las zonas gradualmente más desprovistas de vegetación corresponden al rango de 30 a 60. Las grandes barreras aparecen representadas en tan solo un 2% de la superficie.

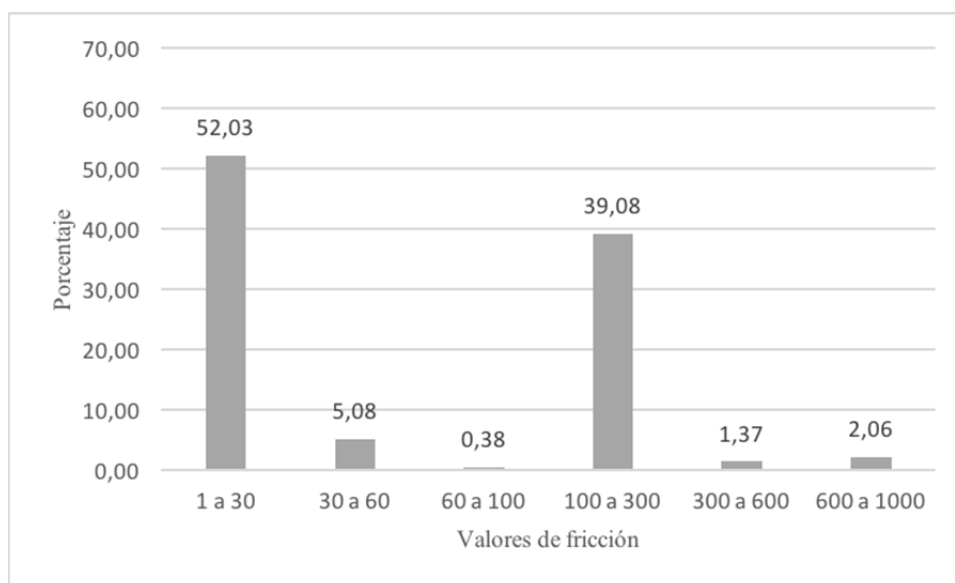


Figura 10. Distribución del porcentaje de píxeles asignados a los distintos valores de impedancia de la capa de fricción obtenida con la primera variación de valores de resistencia.

Respecto a la distribución de valores de fricción de la primera variante planteada, se puede observar en la figura 10 cómo ha habido un descenso significativo del número de píxeles situados en un rango de valores de resistencia entre 30 y 60, de un 19% a un 5% del total, mientras que ha aumentado el porcentaje de superficie perteneciente al rango situado entre 1 y 30. Esto es debido al cambio introducido en esta variación, en la que se pasó de asignar una resistencia de 30 a una de 5 en la categoría de matorral.

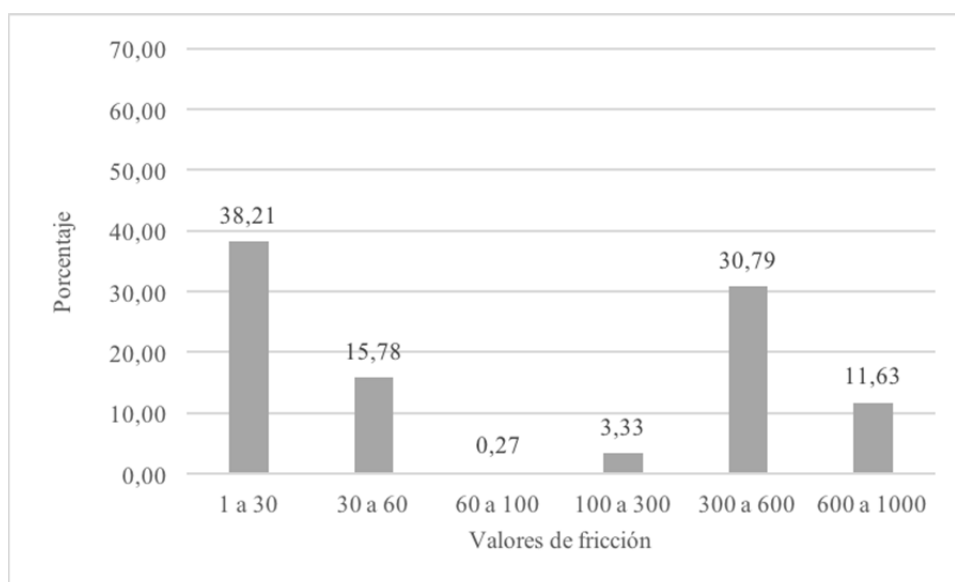


Figura 11. Distribución del porcentaje de píxeles asignados a los distintos valores de impedancia de la capa de fricción obtenida con la segunda variación de valores de resistencia.

Por otro lado, en la segunda variación introducida se aumentó el valor de impedancia de las zonas agrícolas de 100 a 300. El cambio, como se puede observar comparando las figuras 9 y 11, ha sido muy sensible puesto que se ha reducido el porcentaje de píxeles del rango de 100 a 300 desde un 39% de representación total a tan solo un 3%, mientras que se ha incrementado notablemente la superficie

de los rangos que abarcan las resistencias de 300 a 600 y de 600 a 100, desde un 1% a un 30% en el primer caso y desde un 2% a un 11% del total en el segundo.

La distribución del porcentaje de píxeles situados en valores de fricción de entre 1 y 60 es muy similar entre la capa de fricción original y la variante 2; mientras que las celdas de los valores de las barreras, situados entre 300 y 1000, son más parecidos entre la capa original y la variante 1.

Para observar la distribución espacial de estas variaciones en el área de estudio es necesario hacer uso de los mapas de fricción que se adjuntan en el Anexo II. Aunque en dichos mapas apenas es perceptible la localización de las zonas de matorral, se observa muy bien cómo se distribuyen las zonas agrícolas, de las cuales su mayoría está situada entre los espacios de los grupos planteados en este trabajo de las Sierras Exteriores y de la Sierra de Alcubierre.

Teniendo en cuenta únicamente estos datos es posible deducir que el efecto de las barreras será más patente en los corredores obtenidos con la variación 2, de lo que cabría esperar en tonces que algunos de los obtenidos con la capa original no lleguen a dibujarse en este caso o que la anchura resultante sea menor, así como que los LCP tengan un itinerario distinto. Del mismo modo se pueden esperar configuraciones distintas en los itinerarios de los corredores resultantes de la ejecución de la herramienta con la primera variante de la capa de fricción original, aunque en este caso, al aumentar los píxeles situados entre valores de fricción de 1 y 30, es posible que la anchura de los corredores aumente en algunos casos.

3.2. Itinerarios de menor coste (LCP)

En el Anexo III se adjuntan los mapas correspondientes a los itinerarios de menor coste o LCPs obtenidos con las distintas capas de fricción modeladas. Estos itinerarios constituyen el esqueleto de las hipotéticas redes de corredores ecológicos, puesto que se trata de entidades de líneas discretas que no incluyen información relativa a la anchura necesaria de los mismos para cada caso, aunque sí indican el camino a seguir por dichos corredores en el área de estudio.

Se pueden observar diferencias entre los LCP resultantes de ejecutar la herramienta con la capa de fricción original y los derivados de sus variaciones. En el caso de los itinerarios de la primera variante se han registrado algunos cambios notables. La mayoría de ellos consisten en cambios de dirección de los mismos, siendo entonces más directos desde su origen hacia su destino. Esto puede deberse, como ya se ha visto, a que en esta alternativa se ha rebajado el valor de fricción de la categoría de matorrales hasta 5, reduciendo considerablemente la impedancia de la matriz del paisaje en las zonas donde se hallen las manchas de dicha categoría, lo que justificaría que los LCP tomen caminos más directos.

Respecto a los itinerarios de menor coste obtenidos con la segunda variante, si se comparan con los resultados derivados de la configuración original, se puede comprobar que apenas ha habido cambios, a excepción, evidentemente, de los caminos situados entre los espacios de los ejes de las Sierras Exteriores y de la conexión de la Sierra de Alcubierre, ya que es allí donde se encuentra una mayor concentración de zonas agrícolas y regadíos, de las cuales se ha aumentado sensiblemente el valor de resistencia en la capa de fricción para el cálculo de esta variante. En las citadas zonas se han producido algunos cambios de dirección de los caminos, además de que otros no han sido dibujados. La herramienta ha evitado de este modo atravesar zonas relativamente más anchas donde se hallaba este tipo de categorías, que en este caso constituyen barreras dentro de la matriz del paisaje debido a su mayor fricción respecto a las demás categorías, sobre todo en el caso de los regadíos, ya que en esta variación han alcanzado valores de fricción de 600.

3.3. Corredores ecológicos

Los tres mapas de los corredores ecológicos que han resultado de la ejecución de la herramienta con cada una de las capas de fricción modeladas se adjuntan en el Anexo IV. Estos corredores ecológicos se construyen en torno a los itinerarios de menor coste que se han mencionado en el anterior apartado, aunque en este caso los resultados consisten en capas raster de las que se puede extraer información acerca de la anchura de los propios corredores. Esta anchura viene determinada por el um-

bral que, como ya se ha explicado, se ha aplicado sobre las capas de distancia de coste obtenidas entre los *outputs* de la herramienta. De este modo, los corredores son la consecuencia de mostrar las celdas de dichas capas cuya distancia de coste asignada es inferior a 1 km. Por lo tanto, además de la relativa a la anchura de los corredores, de estos mapas se puede extraer información acerca de la distancia de coste o, lo que viene a ser lo mismo, de la conectividad dentro de los mismos. Así, cuanto menor sea la distancia de coste que presente una celda que forma un corredor, mayor será la conectividad de la misma, lo que en cierto modo incorpora a la vez el efecto borde que se produce entre la matriz y el propio corredor. Con estos resultados se puede deducir que cuanto menos hostil sea el paisaje que rodea a los corredores, mayor es su anchura. Este efecto se puede observar si se presta atención a la diferencia de anchura que presentan los corredores que atraviesan, de nuevo, el área comprendida entre los espacios de los ejes de las Sierras Exteriores y la conexión de la Sierra de Alcubierre, ya que es una zona que presenta una matriz con unos valores de fricción relativamente más altos en los tres casos planteados y cuyos corredores son notablemente más estrechos que el resto de los que se han modelado.

Si se comparan las diferencias entre los corredores modelados para cada una de las tres configuraciones planteadas, tan apenas se observan cambios más allá de los mencionados acerca de la dirección en el anterior apartado, aunque sí se ha comprobado que la anchura de los corredores de la primera variante en los que se registra un cambio de dirección es menor que la que generalmente presentan los de la alternativa original, lo cual resulta sorprendente, ya que al tratar en este caso con valores de fricción más bajos en la matriz del paisaje se podría esperar una anchura mayor. Este efecto puede ser consecuencia de que, dado que se ha rebajado el valor de resistencia de la categoría de los matorrales hasta niveles incluso inferiores a otras con mayor cobertura forestal, estas últimas manchas estén funcionando como barreras relativas respecto a los matorrales.

4. DISCUSIÓN

4.1. Diferencias entre las tres configuraciones

Como se ha puesto de manifiesto en los resultados, las tres configuraciones planteadas en la construcción de la capa de fricción se han traducido en tres tipos de resultados, aunque con algunas similitudes, pero al fin y al cabo distintos. ¿Cómo se explican entonces estas diferencias, cuál es su significado y sus implicaciones? Está claro que las variaciones registradas se deben a los cambios introducidos en los valores asignados a las categorías de las capas de fricción.

En la primera variante de la capa de fricción se han producido cambios en la dirección de los corredores, lo que resultaría lógico en cualquier tipo de alternativa a los valores originales de fricción, pero se ha observado que se ha reducido la anchura de determinados corredores a pesar de que, en general, la ha reducido la resistencia de gran parte de la matriz del paisaje. Esto se ha achacado a que la categoría a la cual se le ha modificado el valor original de resistencia, la correspondiente a los matorrales, se ha situado en una posición de impedancia menor incluso que otras categorías que tenían mayor cobertura forestal. La motivación de rebajar el valor de los matorrales tiene su origen en tratar de replicar los resultados conseguidos por Gurrutxaga (2005) en la Comunidad Autónoma del País Vasco, en cuyo trabajo los valores de fricción del matorral eran similares a los de esta variante y, del mismo modo, inferiores a una parte significativa del resto de coberturas de vegetación. Aún así, cabe preguntarse si esta configuración tiene sentido cuando se modelan corredores ecológicos para especies de mamíferos forestales, teniendo en cuenta que en estos casos se suele asignar la mínima fricción a las zonas boscosas, ya que se asume que en ellas las especies pueden encontrar mayor refugio.

Los resultados de la segunda configuración, aunque también ligeramente distintos, han sido más similares a los obtenidos con la capa de fricción original que lo que lo han llegado a ser los de la primera variante. En este caso se ha producido un aumento del efecto relativo que tienen las zonas agrícolas como barrera, pero apenas se han llegado a superar los valores de fricción de las barreras preexistentes del agua, las zonas artificiales y las carreteras.

A partir de lo expuesto se puede deducir entonces que una variación en los valores originales de una capa de fricción será más significativa cuando éstos lleguen a situarse por encima o por debajo de los asignados a otras categorías, lo que se hará más patente cuanto mayor sea el número de categorías y píxeles que se vean intercambiados y rebasados; mientras que una modificación de los valores de fricción que no conlleve un cambio de orden en de las categorías en función de su impedancia será menos notable en los resultados.

Esto es un aspecto importante a tener en cuenta para futuras configuraciones de capas de fricción para diseñar y obtener cartografía de redes de corredores ecológicos, en el sentido de que un aspecto clave a la hora de afrontar el proceso será no solo la asignación de valores de fricción a las distintas categorías del paisaje, sino el orden de dichas categorías en función de su impedancia relativa para el grupo de especies seleccionado.

4.2. Utilidad e implementación de los resultados en análisis y trabajos posteriores

Se han obtenido dos tipos de resultados principales, una capa de itinerarios de mínimo coste o LCPs y otra de corredores ecológicos. A priori, se podría decir que la información que aporta la primera es de escasa utilidad en comparación con la segunda, al no contar los caminos óptimos con atributos de anchura que permitan su consideración en posteriores trabajos relacionados con el paisaje y la ordenación territorial. Sin embargo, los trabajos citados que utilizaban el método *Least Cost Path* (García, 2008; & Gurrutxaga *et al.*, 2010) y que obtenían como datos de salida del SIG las líneas correspondientes a los itinerarios de los corredores, calculaban áreas de influencia desde los corredores basándose en los valores de impedancia de las categorías de la capa de fricción, de modo que dichas áreas estaban delimitadas por las manchas del paisaje con menor resistencia.

Resultaría interesante, por lo tanto, realizar ese tipo de operación espacial y comparar sus resultados con los de los corredores. Relacionado con esto, aunque sería más costoso, convendría ejecutar el modelo con distintas herramientas que se han mencionado para validar el proceso.

La obtención de resultados de este Trabajo de Fin de Master se ha detenido en el análisis de los caminos óptimos y los corredores que devuelve la herramienta utilizada; sin embargo, estos *outputs* se pueden introducir en otras herramientas citadas como *Circuitscape* (Shah & McRae, 2008) y *Conefor Sensinode* (Saura & Torné, 2009), que permiten hacer una evaluación de la conectividad del área de estudio junto con los corredores que se han modelado. Ello conlleva una jerarquización de los corredores en función de su importancia ecológica, lo que puede resultar de gran utilidad de cara a implementar estos resultados en procesos de toma de decisiones relativas a la ordenación territorial (Gurrutxaga, 2014).

4.3. Ventajas y limitaciones del modelo

Como se ha comprobado, la herramienta utilizada, basada en el método *Least Cost Path*, comparte las mismas ventajas y debilidades que este modelo, aunque se añade relativa ventaja de la automatización del proceso en la obtención de resultados, lo que agiliza enormemente el flujo de trabajo, además de la fácil interpretación de los mismos. Sin embargo esta ventaja trae de la mano algunos inconvenientes, ya que hay zonas de conexión evidente que no han sido dibujadas por la herramienta, por lo que es necesario un proceso posterior no menos costoso de supervisión manual y experta de los resultados.

Uno de los principales inconvenientes del clásico método *Least Cost Path* es que, como resultados, tan solo ofrece los itinerarios de menor coste de los corredores, además de que solo dibuja un camino entre dos posibles espacios a conectar, aunque en la realidad pueden existir más alternativas, ya que, como apuntan Adriaensen *et al.* (2003) y Beier *et al.* (2008), se está asumiendo que los animales eligen los caminos para desplazarse del mismo modo que escogen su hábitat, sin tener en cuenta que pueden existir otros factores estocásticos que determinen esta elección tanto a nivel de especie como de individuo, lo que puede llegar a generar múltiples caminos entre dos espacios distintos. A este efecto, existen otros métodos propuestos para tratar de solucionar las carencias del *Least Cost Path*; por

ejemplo, Adriaensen *et al.* (2003) proponen ejecutar el método *Least Cost Path* un determinado número de veces, introduciendo pequeñas variaciones en los valores de la capa de fricción, para obtener múltiples caminos que conecten dos espacios distintos; o, también, la citada herramienta de *Corridor Designer*, que es capaz de generar conectores distintos y de una anchura determinada entre espacios. Sin embargo, estos métodos también tienen asociados otros inconvenientes, ya que el primer caso, como señalan Loro *et al.* (2015), puede resultar demasiado arbitrario y, por otro lado, las características asociadas a los corredores derivados de la herramienta *Corridor Designer* parten de unos umbrales definidos por el usuario, del mismo modo que en la ejecución de *Linkage Mapper*, lo que añade subjetividad al modelo.

La herramienta utilizada, gracias a que incorpora la posibilidad de calcular corredores ecológicos a partir de las capas de coste distancia, es capaz de paliar en parte las carencias asociadas a los LCP, aunque esta última opción requiere la intervención del usuario fijando un umbral y, por lo tanto, es fácil acabar utilizando criterios subjetivos para la determinación del mismo.

Otra limitación asociada a todo tipo de trabajos que diseñan corredores ecológicos es la dificultad de verificación de la funcionalidad de los mismos, ya que se está modelando lo que se conoce como conectividad estructural, que es la que hace referencia a las características espaciales del paisaje (EUROPARC, 2009) sin tener en cuenta el uso real que hacen las especies de una unidad concreta; ya que, aunque muchos trabajos insistan en que están diseñando corredores ecológicos funcionales, si se pretende llegar a cubrir ese objetivo se hace necesario el trabajo de campo adicional para comprobar que, efectivamente, las zonas que han sido delimitadas como corredores están siendo utilizadas como pasos preferentes por distintos grupos de fauna, y esto es algo que la gran mayoría de estudios en ecología del paisaje y conectividad no llegan a realizar, principalmente por su grado de complejidad y dificultad añadido.

A estos efectos, los resultados de este trabajo podrían enriquecerse utilizando más factores en la modelización de los corredores, como elementos concretos del relieve, características climáticas y microclimáticas, otros tipos de barreras, además de la utilización de distintos grupos de fauna. Sin embargo, todo esto se ha visto simplificado debido al escaso tiempo con el que se cuenta para realizar un Trabajo de Fin de Master en comparación con los estudios encargados de diseñar conectividad ecológica, que normalmente implican meses de trabajo y, sobre todo, la participación de equipos multidisciplinares en el proceso.

5. CONCLUSIONES

La conectividad ecológica es, sin duda alguna, una de las tareas pendientes en materia de gestión y conservación del medio natural en Aragón. La existencia de espacios protegidos resulta en sí misma insuficiente y la generación de cartografía de corredores ecológicos es un paso necesario para ello. Por otra parte, el fomento de la conservación de corredores ecológicos y su gestión es un mandato normativo, reforzado en la última actualización de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, y también un objetivo específico de la política territorial de ordenación del territorio en Aragón.

El análisis realizado constituye una aproximación metodológica a la utilización de los SIG al diseño de corredores ecológicos, utilizando los espacios de la Red Natura 2000 como núcleos de partida, atendiendo al grupo de grandes mamíferos forestales, mediante la herramienta *Linkage Mapper* y capas de fricción construidas a partir de la asignación de valores de impedancia a diversas categorías de cobertura del suelo, la consideración de las vías de comunicación como barreras y la inclusión de otras variables con influencia en la conectividad.

Los ensayos realizados de cara a la obtención de la cartografía de conectividad ecológica han permitido poner de manifiesto los puntos fuertes y las debilidades de las herramientas habitualmente utilizadas, permitiendo orientar el trabajo que en esta materia se vaya a abordar en un futuro inmediato en nuestra Comunidad Autónoma.

En este sentido, se ha constatado, entre otras consideraciones, lo siguiente:

- Aunque con limitaciones, el método *Least Cost Path* constituye un buen procedimiento para dimensionar redes de corredores ecológicos.
- La herramienta *Linkage Mapper* permite dimensionar corredores ecológicos basándose en el método *Least Cost Path*, aunque de un modo más rápido y automático.
- Los resultados de estos métodos deben complementarse con los de otras herramientas, así como validarse de forma previa a su utilización en otros trabajos relacionados con el paisaje y la ordenación territorial.
- A la hora de construir una capa de fricción para diseñar corredores ecológicos, conviene determinar correctamente el orden de importancia de cada una de las categorías que intervienen en el modelo, además de consensuar los valores asignados con grupos de expertos.

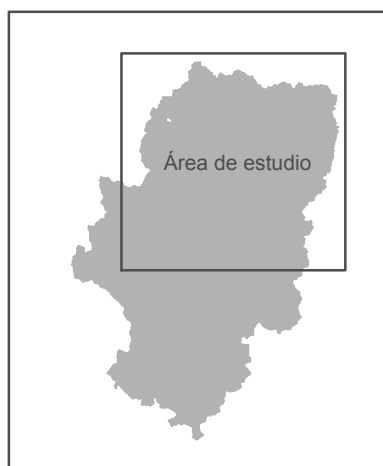
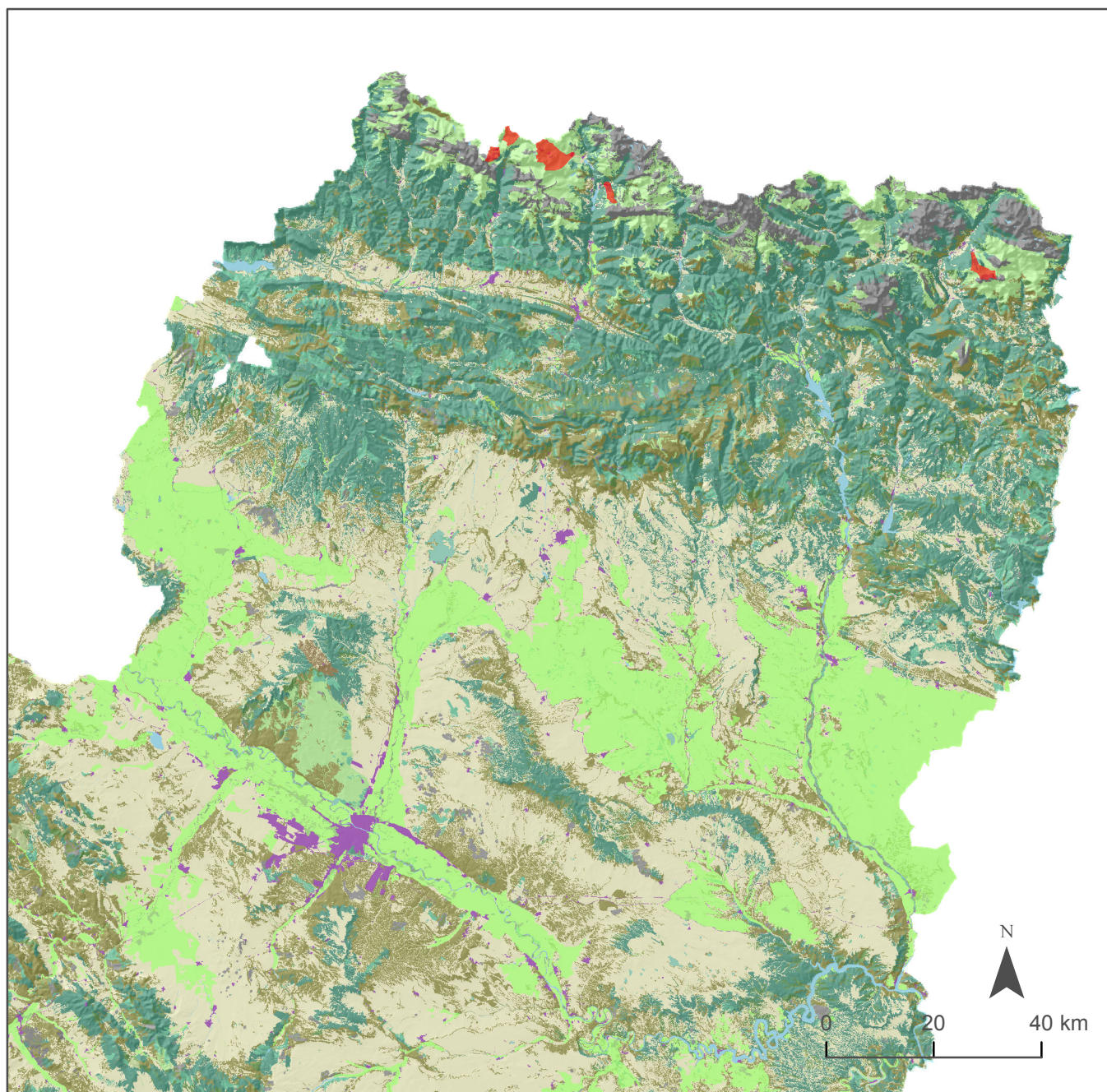
6. BIBLIOGRAFÍA

- Adriaensen, F., Chardon, J.P., De Blust, G., Swinnen, E., Villalba, S., Gulnick, H., Matthisen, E. 2003. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*. 64. 233 – 247.
- Beier, P., Majka, D., Jennes, J. 2006. Conceptual steps for designing wildlife corridors. Disponible en <http://www.corridordesign.org>
- Beier, P., Brost, B., 2010. Use of land facets to plan for climate change: conserving the arenas, not the actors. *Conservation Biology*. 24, 701 -710.
- Bennet, A. F. 2003. Linkages in the landscape: the role of corridors and connectivity in wildlife conservation. IUCN. Gland, Cambridge.
- EUROPARC. 2009. Monografía 2: conectividad ecológica y áreas protegidas. Herramientas y casos prácticos. EUROPARC-España. FUNGOBE, Madrid, 86pp.
- García, P. 2008. Diseño de redes de conservación: los corredores ecológicos a través de los modelos espaciales. *Naturalia Cantabrigiae*, 4, 3 – 70.
- Gurrutxaga, M. 2005. Red de corredores ecológicos de la Comunidad Autónoma de Euskadi. Gobierno Vasco. 141 pp.
- Gurrutxaga, M., Lozano, P., del Barrio, G., 2010. GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation*, 18, 318 – 326.
- Gurrutxaga, M., Rubio, L., Saura, S. 2011. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: A translational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). *Landscape and Urban Planning*, 101, 310 – 320.
- Gurrutxaga, M. 2014. Categorización de corredores ecológicos en función de su contribución a la conectividad de la Red Natura 2000. Implicaciones para la ordenación del territorio. *Geofocus*, 14, 68 – 84.
- Hector, T., Carr, M., Zwick, P. 2000. Identifying a linked reserve system using a regional landscape approach: the Florida Ecological Network. *Conservation Biology*, 14, 4, 984 – 1000.
- Herrera Calvo, P., Díaz Varela, E. 2013. Ecología del paisaje, conectividad ecológica y territorio. Una aproximación al estado de la cuestión desde una perspectiva técnica y científica. En *Planificación espacial y conectividad ecológica: corredores ecológicos*. Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid. Valladolid. 298 pp.
- Herrera Calvo, P. 2013. Una aproximación a la conectividad ecológica aplicada a la planificación territorial: modelización para el caso de Valladolid y entorno. En *Planificación espacial y conectividad ecológica: corredores ecológicos*. Instituto Universitario de Urbanística de la Universidad de Valladolid. Valladolid. 298 pp.

- Jongman, R., Külvik, M., Kristiansen, I., 2004. European ecological networks and greenways. *Landscape and Urban Planning*, 68, 305 – 319.
- Loro, M., Ortega, E., M. Arce, R., Geneletti, Davide. 2015. Ecological connectivity analysis to reduce the barrier effect of roads. An innovative graph-theory approach to define wildlife corridors with multiple paths and without bottlenecks. *Landscape and Urban Planning*, 139, 149 – 162.
- MacArthur, R. Wilson, E. 1967. The theory of island biogeography. Princeton University Press, Princeton (New Jersey), 203 pp.
- Majka, D., Jennes, J., Beier, P. 2007. Corridor Designer: ArcGIS tool for designing and evaluating corridors. Disponible en <http://corridordesign.org>.
- Mallarach, JM. 2004. Análisis y diagnóstico de la conectividad ecológica y paisajística en el sector sur del Anillo Verde de Vitoria-Gasteiz. Estudio de opciones y alternativas para maximizar el beneficio social y ecológico de los enlaces potenciales del anillo verde con los montes de Vitoria. Vitoria-Gasteiz, 21 pp.
- Marull, J., Mallarach, JM. 2005. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*. 71, 243 – 262.
- Saura, S., Torné, J. 2009. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 24, 135 – 139.
- Shah, V., McRae, V. 2008. Circuitscape: a tool for landscape ecology. En *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008)*, Varoquaux, G., Vaught, T., Millman, J. (Eds), pp. 62-66.
- Washington Wildlife Habitat Connectivity Working Group (WHCHG). 2010. Washington connected landscapes project: statewide analysis. Washington Departments of Fish and Wildlife, and Transportation. Olympia, WA. 21pp. Disponible en <http://www.waconnected.org>

ANEXO I

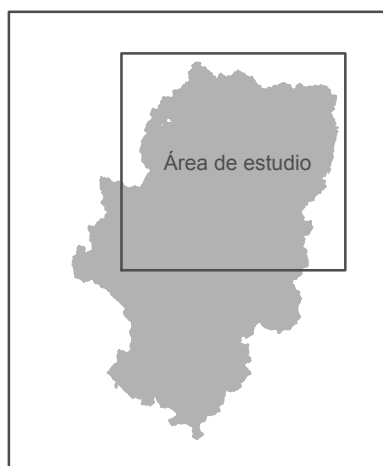
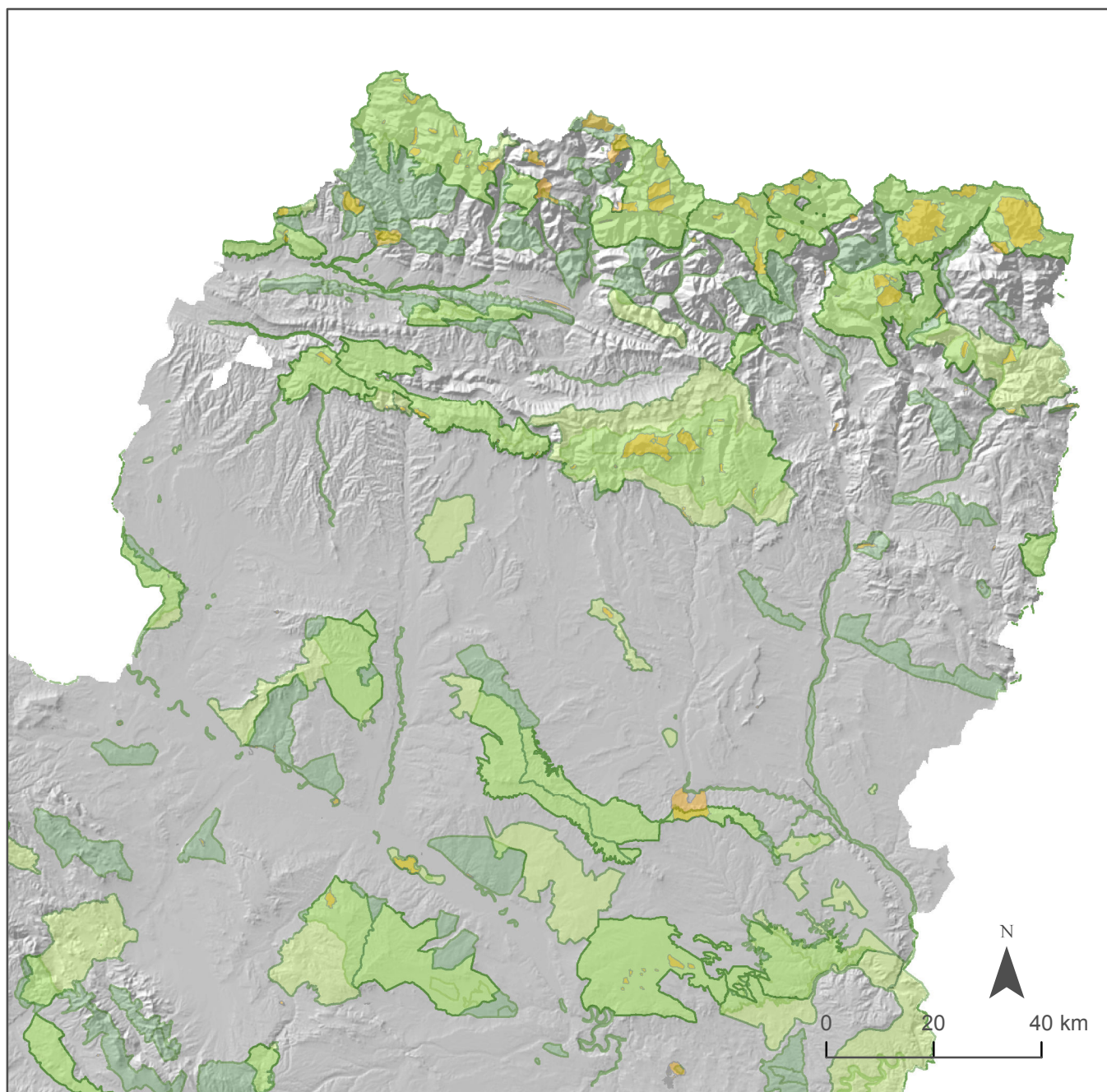
Mapa de usos del suelo






Autor: Eduardo Vicente Bartolí. Año 2015.
 Master en Tecnologías de la Información Geográfica
 Para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
 Fuente: Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR).

- | | |
|--|-----------------|
| Monte desarbolado con arbolado disperso. Arbolado disperso | Regadíos |
| Monte desarbolado. Herbazal o pastizal | Secano |
| Monte desarbolado. Humedal | Agua |
| Monte desarbolado. Matorral | Artificial |
| Monte sin vegetación superior. Superficie con escasa o nula vegetación | Pistas de esquí |
| Monte arbolado ralo. Alineaciones estrechas | |
| Monte arbolado ralo. Bosquete pequeños | |
| Monte arbolado ralo. Ribera arbolada | |
| Monte con arbolado ralo. Bosque | |
| Monte con arbolado ralo. Bosque de plantaciones | |
| Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Cortafuegos | |
| Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Incendios | |
| Monte arbolado temporalmente sin cobertura. Talas | |
| Monte arbolado. Alineaciones estrechas | |
| Monte arbolado. Bosque | |
| Monte arbolado. Bosque de plantaciones | |
| Monte arbolado. Bosquete pequeños | |
| Monte arbolado. Ribera arbolada | |

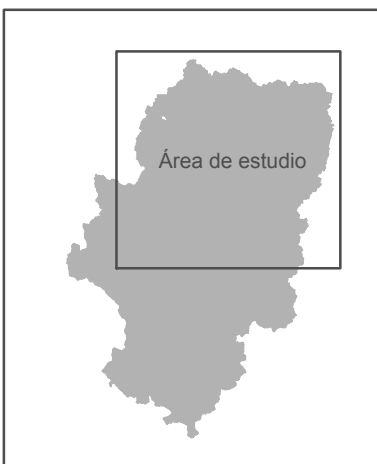
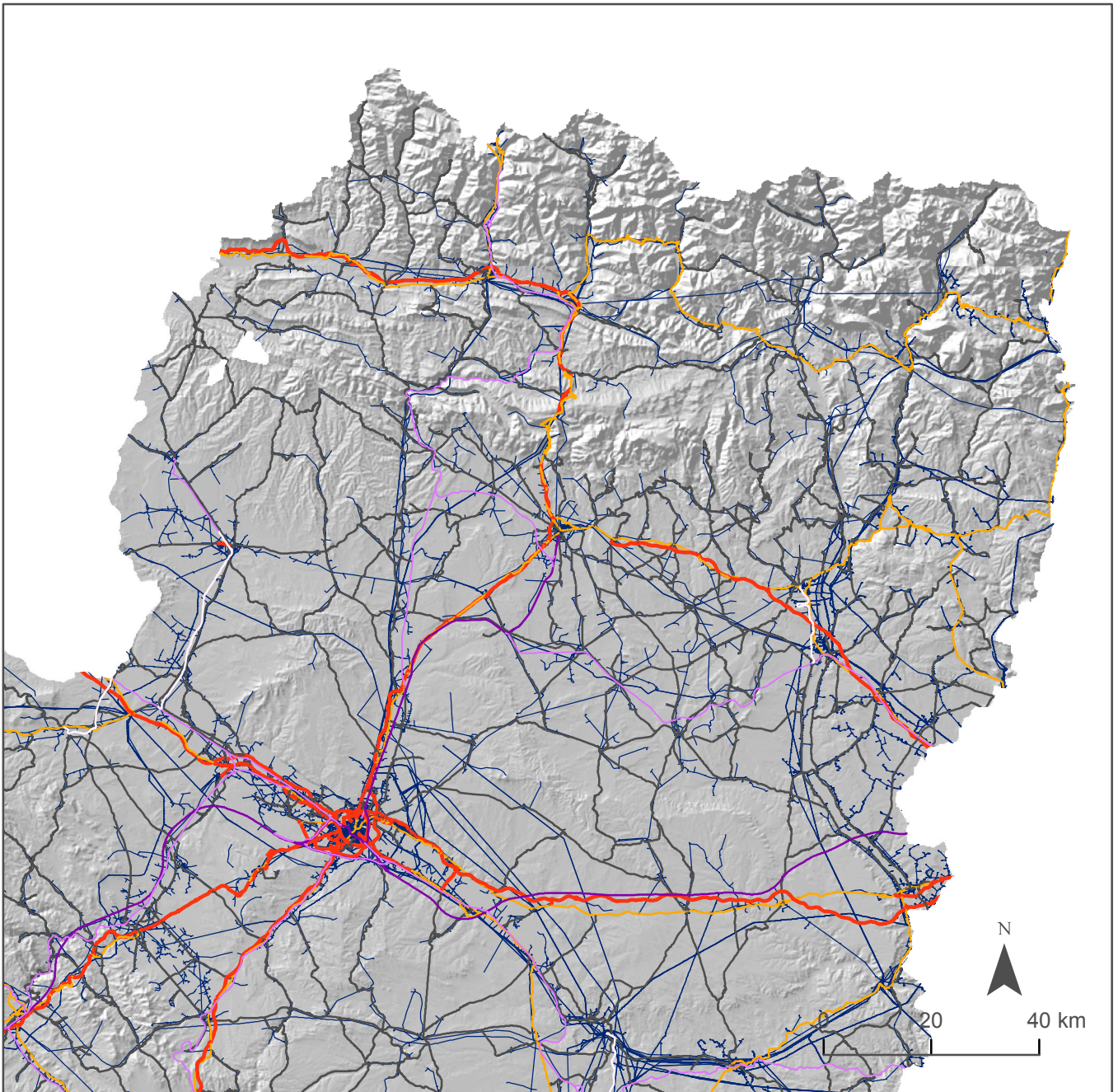
Mapa de LICs, ZEPAs y LIGs



-  Lugares de Interés Geológico (LIG)
-  Zonas de Especial protección para las Aves (ZEPA)
-  Lugares de Interés Comunitario (LIC)

Autor: Eduardo Vicente Bartolí. Año 2015.
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
Para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente,
Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR).

Mapa de infraestructuras lineales artificiales



Red de carreteras

- Autopistas y autovías
- Carreteras nacionales
- Carreteras secundarias

Red ferroviaria

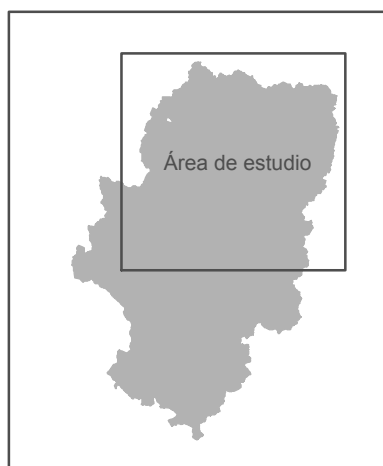
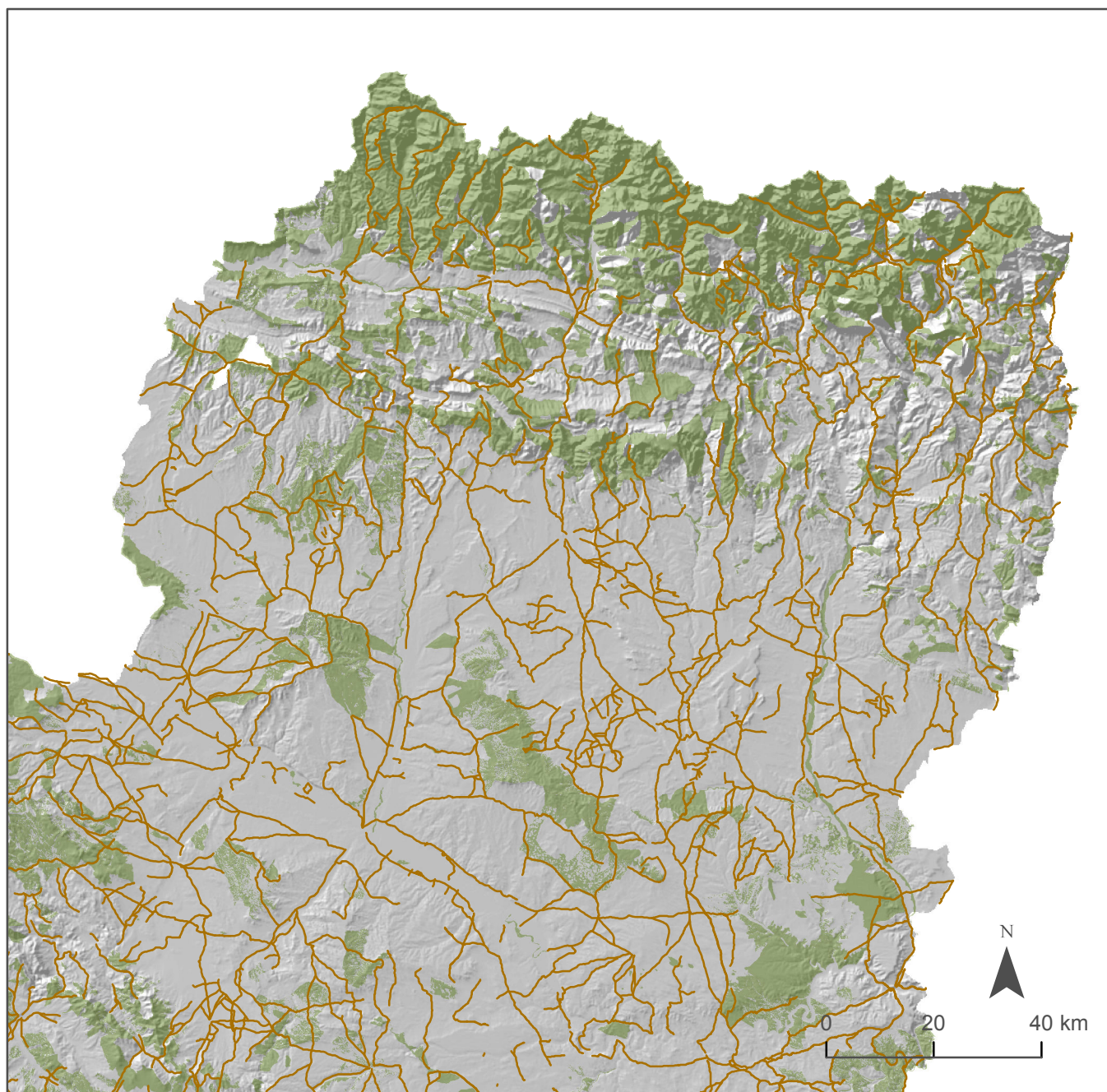
- AVE
- Resto de vías

Red eléctrica

- Líneas eléctricas

Autor: Eduardo Vicente Bartolí. Año 2015.
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
Para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Fuente: Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR).

Mapa de Montes de Utilidad Pública y vías pecuarias

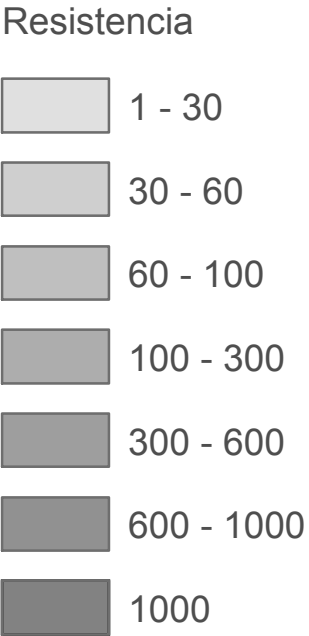


- Vías pecuarias
- Montes de Utilidad Pública

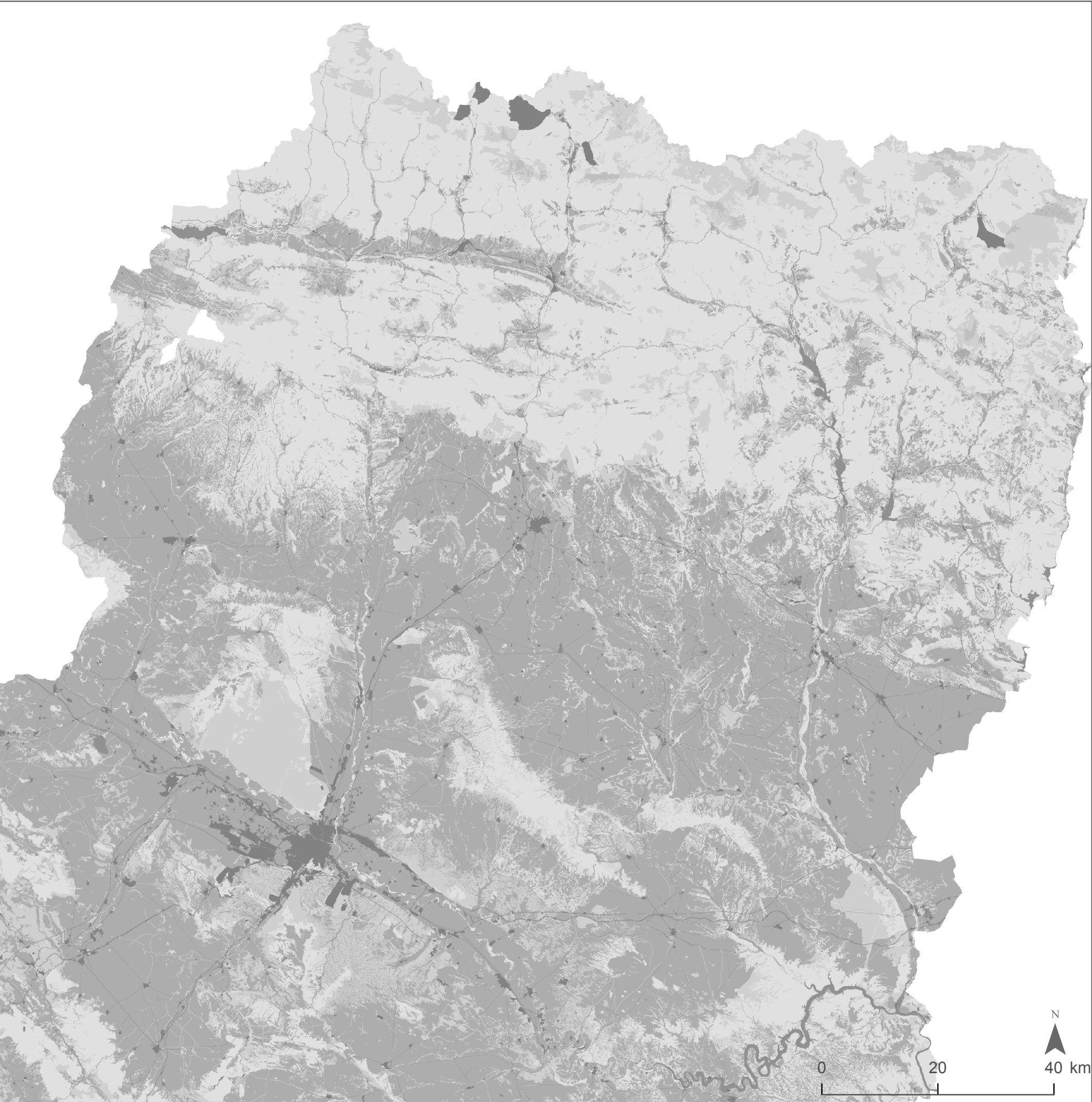
Autor: Eduardo Vicente Bartolí. Año 2015.
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
Para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Fuente: Instituto Geográfico de Aragón (IGEAR).

ANEXO II

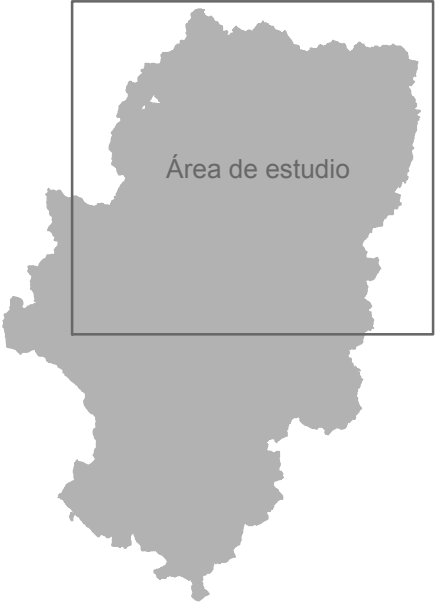
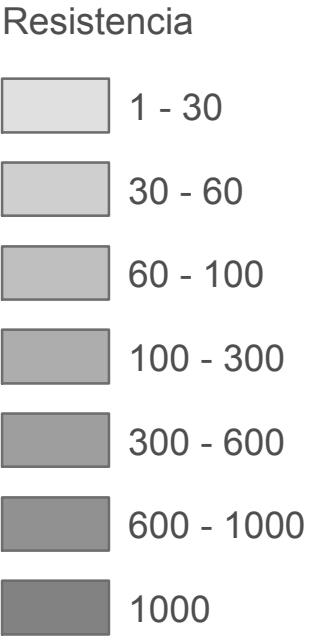
Mapa de fricción en el área
de estudio obtenido
con los valores de resistencia
asignados originalmente



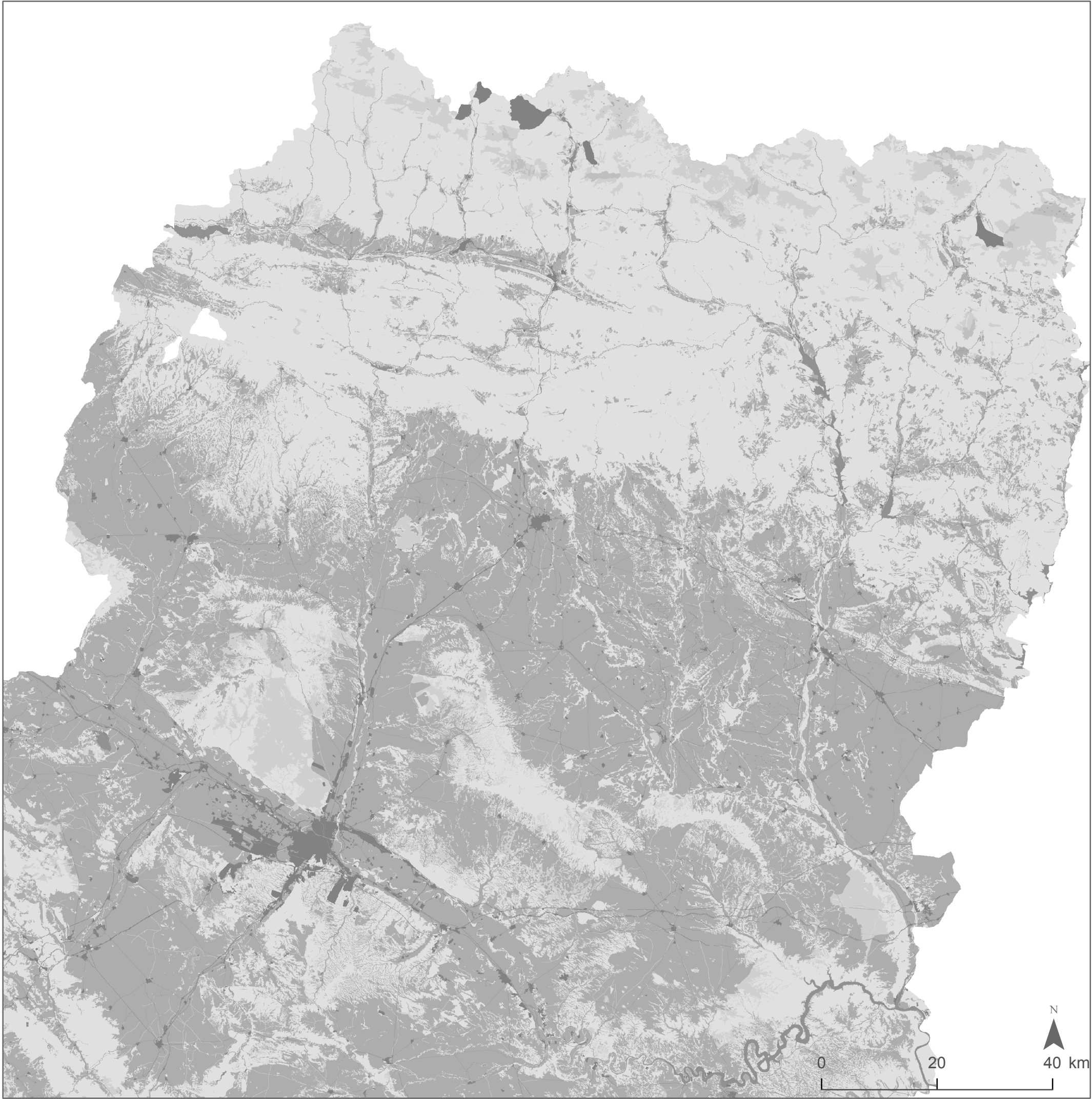
Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza



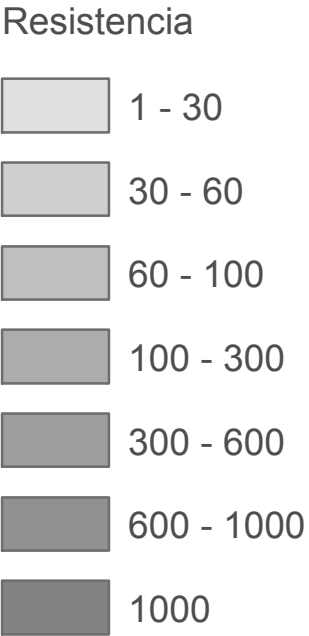
Mapa de fricción en el área
de estudio obtenido con la primera
variación de los valores de resistencia



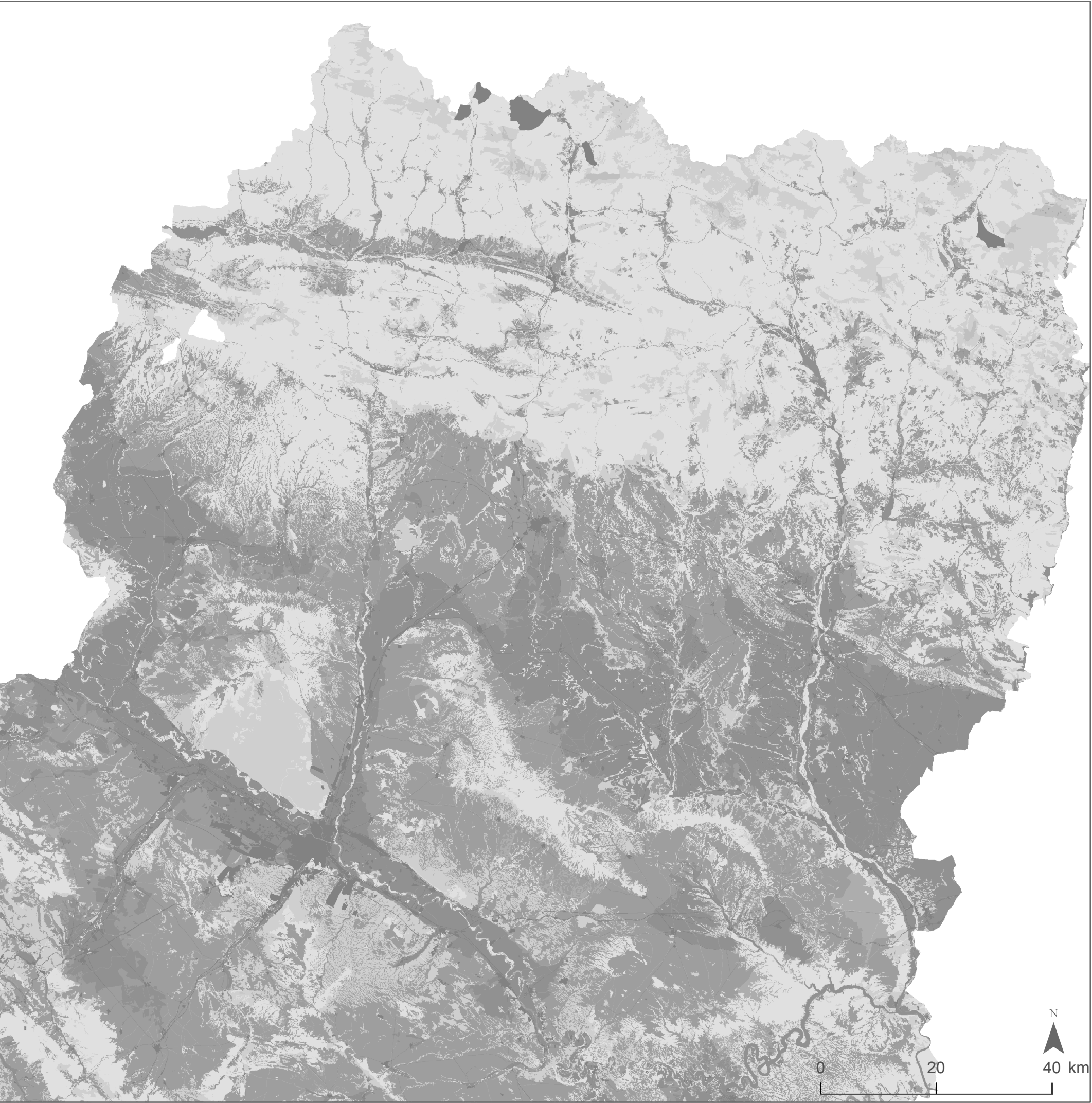
Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza



Mapa de fricción en el área de estudio obtenido con la segunda variación de los valores de resistencia



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza



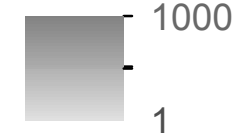
ANEXO III

Itinerarios de menor coste (LCP)
obtenidos con los valores de
fricción asignados originalmente

Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal

Fricción

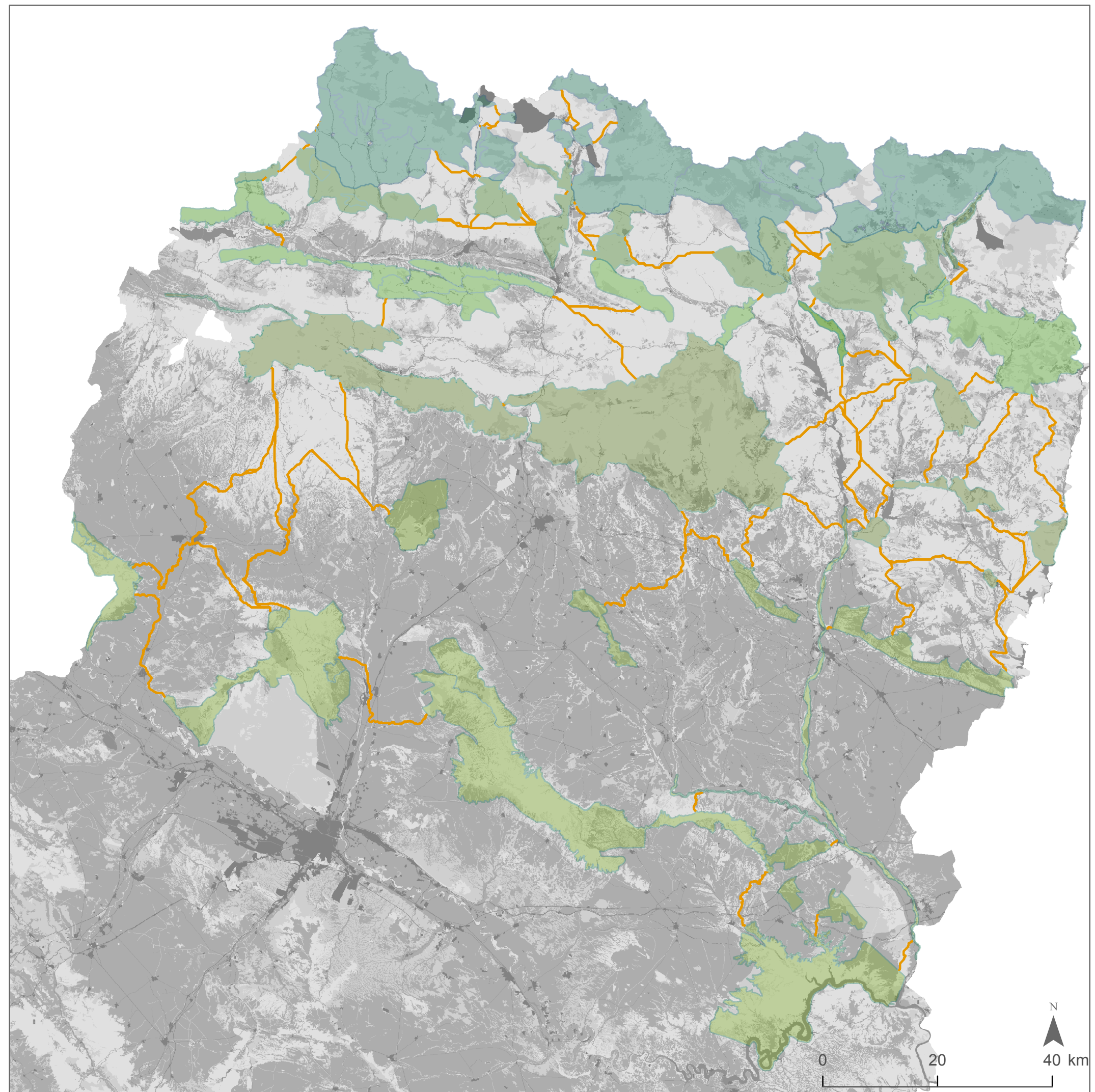


Itinerarios de
menor coste
(LCP)



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015

Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza

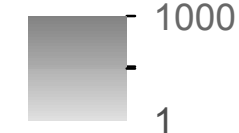


Itinerarios de menor coste (LCP)
obtenidos con la variación 1
de los valores de fricción

Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal

Fricción

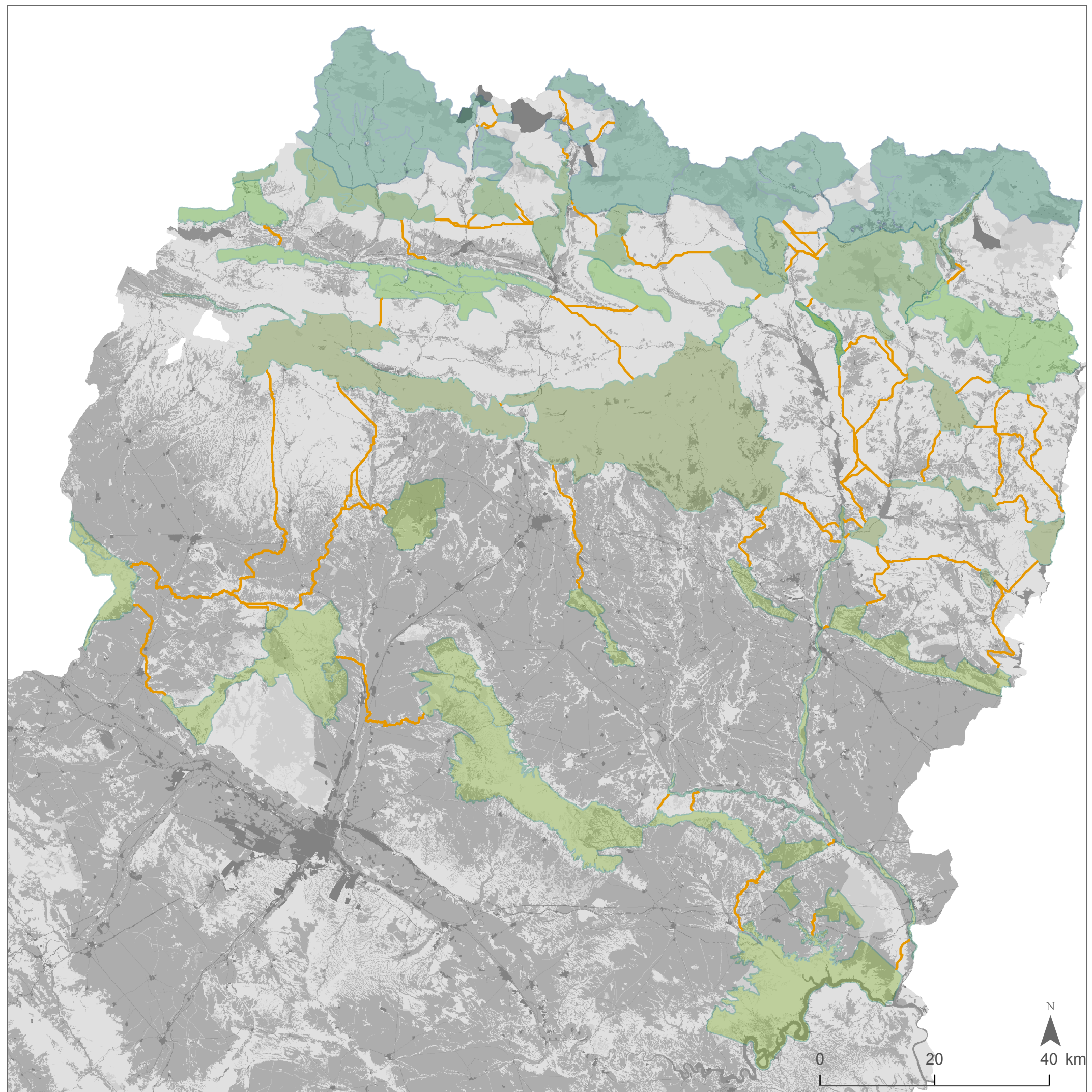


Itinerarios de
menor coste
(LCP)



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015

Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza

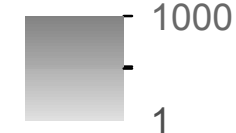


Itinerarios de menor coste (LCP)
obtenidos con la variación 2
de los valores de fricción

Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal

Fricción

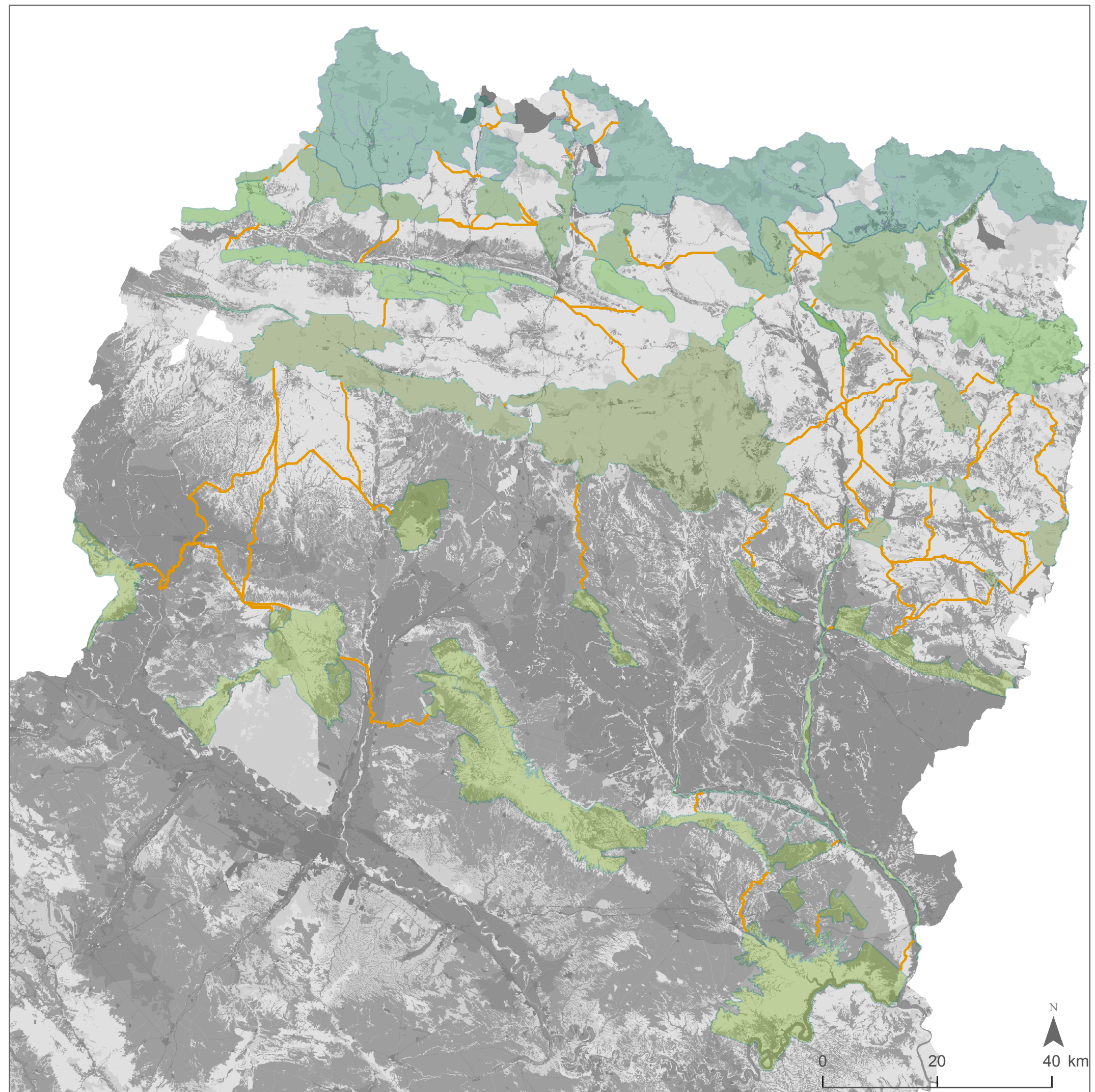


Itinerarios de
menor coste
(LCP)



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015

Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza

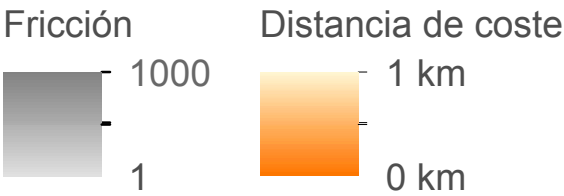


ANEXO IV

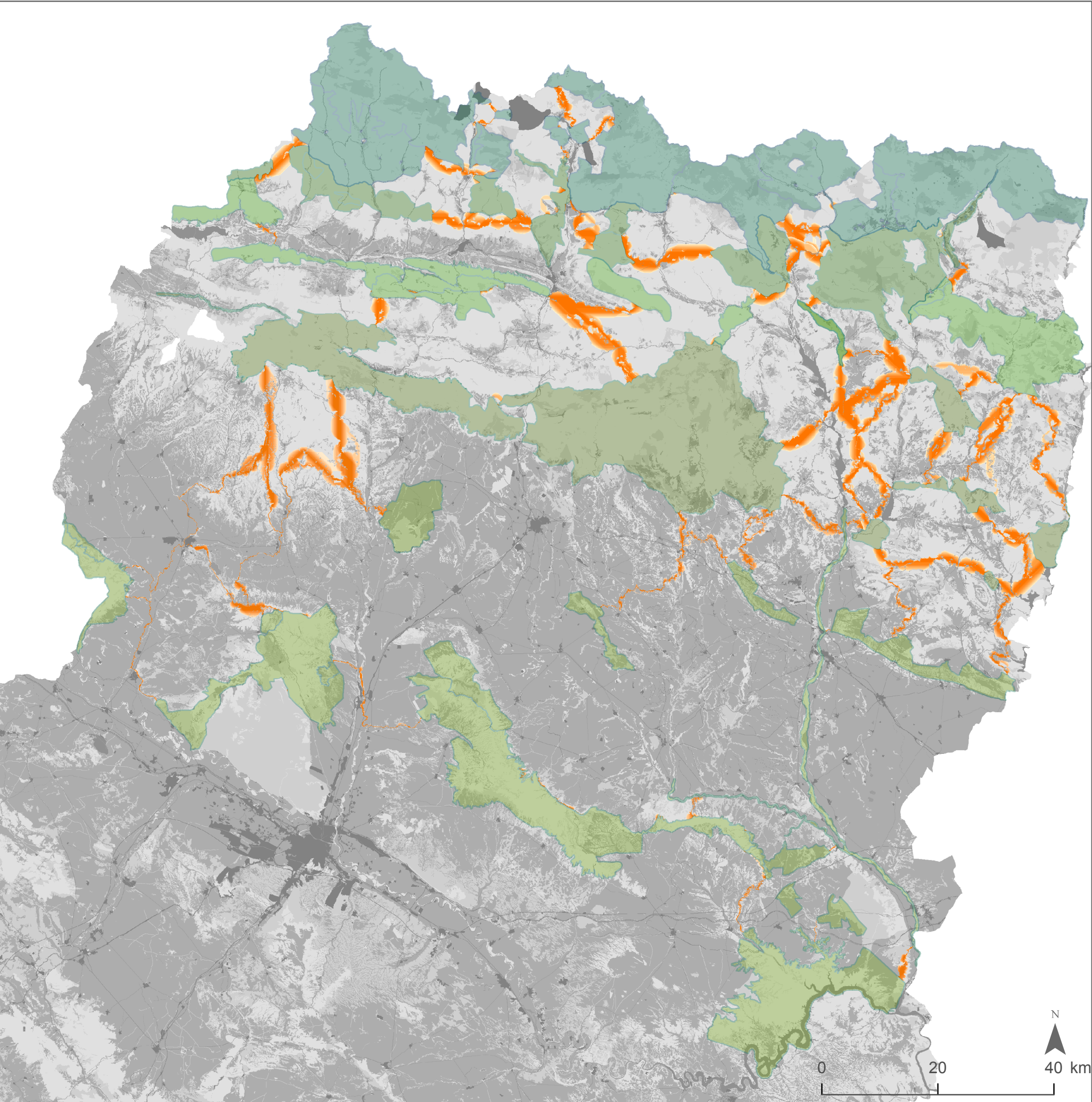
Mapa de corredores ecológicos
obtenido con los valores de
fricción asignados originalmente

Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza



Mapa de corredores ecológicos
obtenido con la variación 1
de los valores de fricción

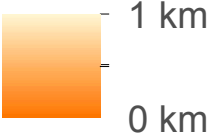
Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal

Fricción



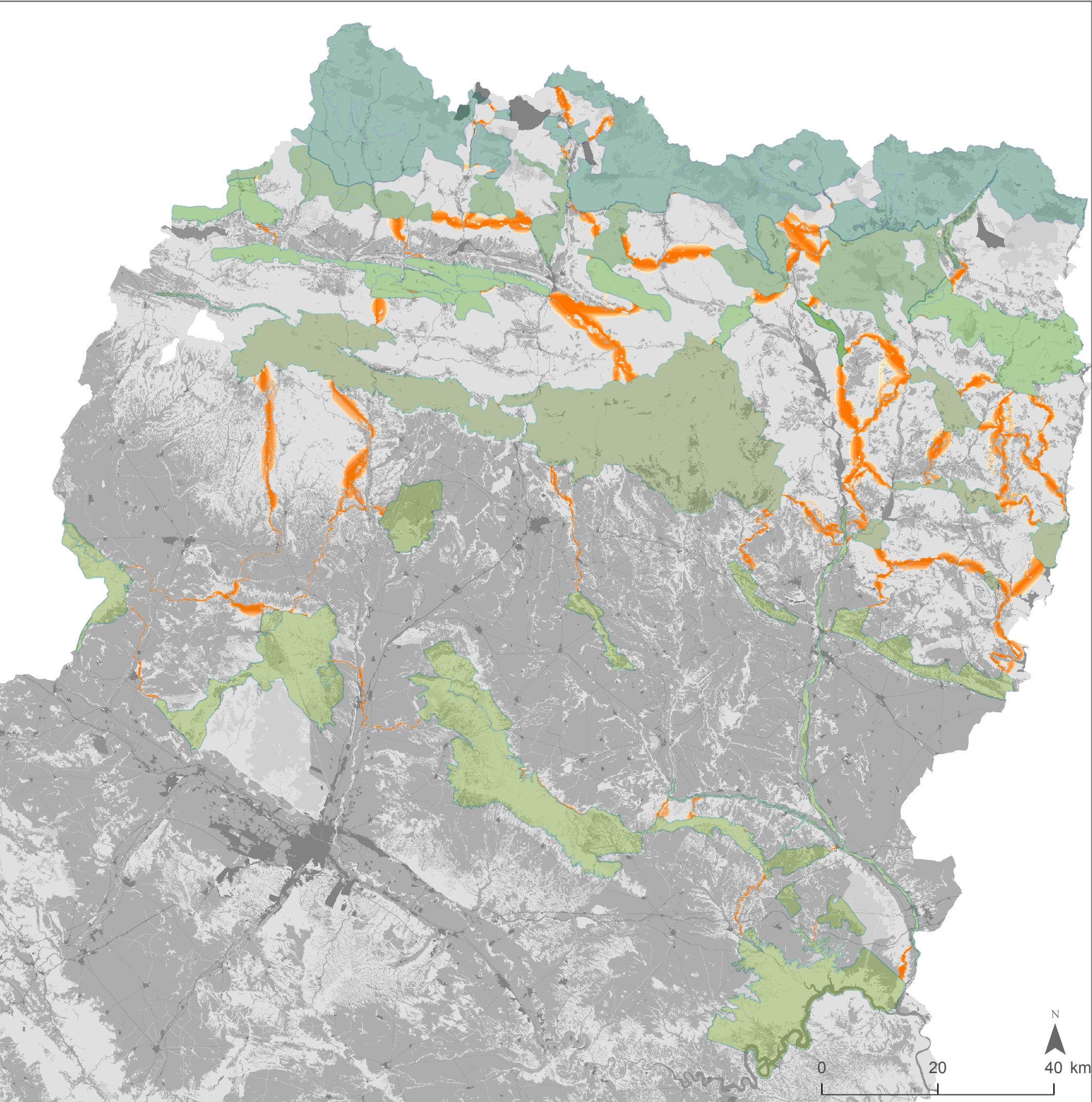
Distancia de coste



Área de estudio

Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015

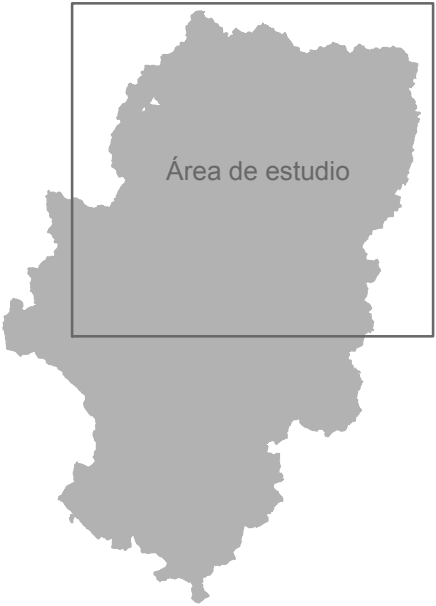
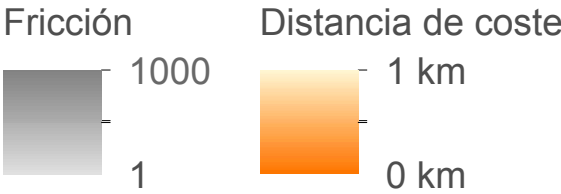
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza



Mapa de corredores ecológicos
obtenido con la variación 2
de los valores de fricción

Ejes de conexión

- Alpino
- Conexión Alcubierre
- Santo Domingo
- Sierras exteriores
- Forestal



Autor: Eduardo Vicente Bartolí
Año: 2015
Master en Tecnologías de la Información Geográfica
para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección
Universidad de Zaragoza

