



UNIVERSIDAD DE CHILE

Facultad de Arquitectura y urbanismo

Escuela de Pregrado

Carrera de Geografía

**ANÁLISIS DE LA CONECTIVIDAD DE PAISAJE: ESPACIOS VERDES  
PRIORITARIOS PARA EL SISTEMA DE INFRAESTRUCTURA VERDE DE  
SANTIAGO**

Memoria para optar al título de Geografía

JAVIERA JOSÉ DÍAZ VÁSQUEZ

Profesor guía: Alexis Vásquez

SANTIAGO - CHILE

2023

## Agradecimientos

A mis padres por apoyarme en todo este proceso y creer siempre en mí.

## RESUMEN

La conectividad es uno de los pilares fundamentales para el óptimo funcionamiento de la infraestructura verde puesto que corresponde a un sistema interconectado de espacios verdes. Una red de infraestructura verde conectada es capaz de mantener los flujos de materia y energía, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en un paisaje. El principal objetivo de la presente memoria consistió en identificar los espacios verdes prioritarios para ser conservados y restaurados para mejorar la conectividad de la infraestructura verde de Santiago. Se utilizó el análisis morfológico de patrones espaciales (MSPA por sus siglas en inglés) para identificar los núcleos a conectar para generar los corredores de mínimo costo del paisaje, los núcleos identificados inicialmente por el MSPA destacan por ser principalmente espacios verdes naturales y en menor medida áreas verdes urbanas. Basado en el modelamiento de conectividad según la teoría de grafos y la teoría de circuitos, se generó una red de corredores de mínimo costo con el propósito de identificar las áreas prioritarias para donde deben ser conservados y restaurados para mejorar la conectividad de la infraestructura verde de Santiago. Los corredores de mínimo costo de mejor calidad se extendieron por las tipologías de espacios naturales y silvoagropecuarios en los sectores periurbanos. A través de las métricas de paisaje como el índice probabilidad de conectividad y la centralidad del flujo de corriente, se identificaron los núcleos de mayor importancia que se distribuyen sobre todo en el sector cordillerano andino constituidos por espacios naturales y silvoagropecuarios. Las áreas prioritarias para la conservación son reducidas tanto en cantidad como en superficie y se concentraron principalmente en los pies de la Cordillera de Los Andes como el Bosque Panul y el Parque Natural San Carlos de Apoquindo, ubicados fuera del límite urbano de la ciudad establecido por el Plan Regulador Metropolitano de Santiago. Las barreras, elementos que con su eliminación podrían mejorar significativamente de la conectividad, se concentran en los corredores del área céntrica de la mancha urbana de Santiago, y principalmente corresponden a áreas residenciales, infraestructura y también algunos espacios verdes. Este trabajo contribuye con información significativa para el diseño de planes y proyectos para asegurar la conectividad e integridad espacial de la red de infraestructura verdes en Santiago.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN .....   | 8  |
| 1.1 INTRODUCCIÓN .....   | 8  |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....   | 10 |
| 1.3 ESTADO DEL ASUNTO .....  | 13 |
| 3.3.1.1 <i>Fragmentación del paisaje</i> .....   | 13 |
| 3.3.1.1 <i>Infraestructura verde, conectividad y corredores</i> .....                                      | 13 |
| 3.3.1.1 <i>Estructura del paisaje y estructura de grafos</i> .....   | 17 |
| 3.3.1.1 <i>Núcleos y análisis morfológico de patrones espaciales</i> .....                                 | 18 |
| 3.3.1.1 <i>Teoría de circuitos</i> .....   | 19 |
| 1.4 ÁREA DE ESTUDIO .....  | 22 |
| 1.5 OBJETIVOS .....  | 25 |
| 1.5.1 <i>Objetivo General</i> .....  | 25 |
| 1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....   | 25 |
| CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO .....   | 26 |
| 2.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS NÚCLEOS A CONECTAR A PARTIR DEL ANÁLISIS MORFOLÓGICO DE PATRONES ESPACIALES..... | 27 |
| 2.2 MODELAMIENTO DE CORREDORES DE MENOR COSTO.....   | 29 |
| 2.2.1 <i>Resistencia o superficie de costo</i> .....   | 29 |
| 2.2.2 <i>Corredores potenciales de mínimo costo</i> .....  | 30 |
| 2.3 IDENTIFICACIÓN DE LOS ESPACIOS VERDES PRIORITARIOS PARA CONSERVAR Y RESTAURAR.....                     | 31 |
| 2.3.1 <i>Núcleos de mayor importancia</i> .....  | 31 |
| 2.3.2 <i>Cuellos de botella</i> .....  | 32 |
| 2.3.3 <i>Barreras</i> .....  | 34 |
| CAPÍTULO 3: RESULTADOS .....   | 36 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.1  | IDENTIFICACIÓN DE LOS NÚCLEOS A PARTIR DE LA ESTRUCTURA DEL PAISAJE.....  | 36 |
| 3.2  | MODELAMIENTO DE CORREDORES DE MENOR COSTO.....  | 39 |
| 3.3  | PUNTOS PRIORITARIOS PARA LA CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE LA<br>CONECTIVIDAD DEL SISTEMA DE INFRAESTRUCTURA VERDE..... | 43 |
| 3.3.1  | <i>Núcleos de mayor importancia</i> .....   | 43 |
| 3.3.2  | <i>Cuellos de botella</i> .....   | 48 |
| 3.3.3  | <i>Barreras</i> .....   | 55 |
| 3.3.4  | <i>Propuesta de espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración<br/>de la conectividad</i> .....       | 61 |
| CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... |   | 66 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                               |   | 69 |
| ANEXOS.....                                      |   | 76 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1. | Esquema modelo Parche-matriz-corredor.....   | 17 |
| Figura 2. | Segmentación del análisis morfológico de patrones espaciales. a) entrada: imagen binario y b) resultados de la segmentación MSPA.....  | 19 |
| Figura 3. | Representación esquemática de la Teoría de circuitos a) representación simplificada de un paisaje a cuadrilla y b) un circuito simple cuando se le aplica un amperio.....      | 21 |
| Figura 4. | Delimitación del área de estudio, Santiago, RM.....  | 24 |
| Figura 5. | Esquema de los pasos metodológicos. ....   | 26 |
| Figura 6. | Análisis morfológico de patrones espaciales para los escenarios. A la izquierda todos los espacios verdes y a la derecha espacios naturales y silvoagropecuario. ....          | 36 |
| Figura 7. | Análisis morfológico de patrones espaciales para los escenarios. A la izquierda las áreas verdes y espacios naturales y a la derecha las áreas verdes y silvoagropecuario..... | 37 |
| Figura 8. | Corredores de menor costo y costo de la distancia ponderada (CWD) en escenario de todos los espacios verdes de la IV. ....   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 9. Corredores de menor costo y costo de la distancia ponderada (CWD) en a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuario y c) espacios naturales y silvoagropecuario. ....   | 42 |
| Figura 10. Núcleos de mayor importancia según el índice de probabilidad de Conectividad (dPC). a) todos los espacios verdes de la IV; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios; c) áreas verdes y espacios naturales y d) espacios naturales y silvoagropecuario. .... | 46 |
| Figura 11. Núcleos de mayor importancia según centralidad de Linkage Mapper. a) todos los espacios verdes de la IV; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios; c) áreas verdes y espacios naturales y d) espacios naturales y silvoagropecuario. ....                   | 47 |
| Figura 12. Análisis de cuellos de botella (Pinch Point) en escenario de todos los espacios verdes de la IV. ....  | 49 |
| Figura 13. <i>Cuellos de botella medios según tipología de infraestructura verde de STGO+ Infraestructura Verde en escenario de todos los espacios verdes de la IV. ....</i>  | 50 |
| Figura 14. Cuellos de botella medios según tipología de infraestructura verde de Stgo+ Infraestructura Verde del límite urbano PRMS. ....   | 51 |
| Figura 15. Cuellos de botella en los espacios verdes Stgo+ IV. ....   | 52 |
| Figura 16. Análisis de punto de pellizco (Pinch Point) a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y c) espacios naturales y espacios silvoagropecuarios. ....  | 53 |
| Figura 17. Análisis de barreras a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y c) espacios naturales y espacios silvoagropecuarios. ....   | 56 |
| Figura 18. Análisis de barreras en escenario de todos los espacios verdes de la IV. ....  | 57 |
| Figura 19. Barreras de alta puntuación de mejora según tipología de infraestructura verde de Stgo+ Infraestructura Verde. ....  | 59 |
| Figura 20. Barreras en los espacios verdes Stgo+ IV. ....   | 60 |
| Figura 21. Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante norponiente. ....   | 62 |
| Figura 22. Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante nororient. ....   | 63 |
| Figura 23. Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante surponiente. ....   | 64 |
| Figura 24. Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante surorient. ....   | 65 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación de la prioridad de los núcleos .....  | 32 |
| Tabla 2. Clasificación de la prioridad de los cuellos de botella. ....                                 | 33 |
| Tabla 3. Clasificación de la prioridad de las barreras.....  | 35 |
| Tabla 4. Clasificación del paisaje basada en el MSPA por escenario. ....                               | 38 |
| Tabla 5. Descripción de corredores de menor costo (LCP) de mejor calidad (CWD/LPC) por escenario. .... | 40 |
| Tabla 6. Núcleos de mayor importancia según índice dPC.....  | 44 |
| Tabla 7. Núcleos de mayor importancia según centralidad del flujo. ....                                | 45 |
| Tabla 8. Superficie de cuellos de botella por escenario. ....  | 54 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| Anexo 1. Significado de la segmentación del Análisis morfológico de patrones espaciales a nivel ecológico y de píxel..... | 76 |
| Anexo 2. Representatividad de los parches centrales seleccionados.....  | 77 |
| Anexo 3. Valores de superficie de costo para las capas de resistencia. ....   | 78 |
| Anexo 4. Pinch Point método "todo a uno" para anchura de corredor a) 1 km; b) 5 km; c) 20 km y d) 30 km.....              | 80 |
| Anexo 5. Bosque Panul .....   | 81 |
| Anexo 6. Mirador la Roca de Parque Natural San Carlos de Apoquindo .....  | 81 |
| Anexo 7. Espacio silvoagropecuario cercano a Estero Colina, Lampa. ....   | 82 |
| Anexo 8. Espacio natural en Pirque.....   | 82 |
| Anexo 9. Espacio natural, Río Maipo. Pirque. ....   | 83 |
| Anexo 10. Espacio natural, Quebrada el Toro, Camino al Volcán, San José de Maipo. ....                                    | 83 |

# **CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN**

## **1.1 Introducción**

Las ciudades han sufrido una rápida urbanización y un cambio del paisaje provocando que el medio urbano se enfrente a retos complejos, a los múltiples y diversos fenómenos que convergen en la ciudad como el cambio de coberturas del suelo, la fragmentación del paisaje y el retroceso de los espacios naturales que bordean la ciudad. Se considera la infraestructura verde (IV) como un sistema relevante en el que debe basarse el desarrollo sostenible para proteger el entorno urbano. Como la IV se define como un sistema interconectado de espacios verdes, la conectividad del paisaje juega un papel fundamental para el éxito y desarrollo de esta para mantener los procesos ecológicos en ambientes urbanos.

La conectividad ha sido ampliamente estudiada desde la ecología del paisaje con enfoques en la conservación del paisaje en áreas naturales debido a la importancia para los procesos ecológicos que ocurren en ellas como el flujo energético, flujo de genes, dispersión de individuos y el mantenimiento de la biodiversidad entre otros. Sin embargo, los estudios de la conectividad en la ciudad son relativamente más recientes.

En el presente trabajo se utiliza una combinación de tres metodologías para identificar los principales espacios verdes prioritarios de la infraestructura verde de Santiago en ser conservados y restaurados para mejorar la conectividad del paisaje. En la primera etapa, se utilizó el análisis morfológico de patrones espaciales para identificar los núcleos para conectar a partir de los espacios verdes mapeados en el proyecto de Stgo+ Infraestructura Verde. En la segunda etapa, se modelaron corredores de mínimo costo a partir de los núcleos identificados para el paisaje de Santiago según el análisis morfológico de patrones espaciales y la construcción de la superficie de costos a partir de referencias bibliográficas.

Finalmente, en la tercera y última etapa se identificaron las áreas prioritarias para mantener y restaurar la conectividad de la infraestructura verde de Santiago. Las áreas prioritarias para la conservación de la conectividad corresponden a áreas con procesos ecológicos frecuentes y representan zonas claves para mantener la conectividad ecológica de los corredores, en donde el movimiento de las especies se canaliza dentro de los enlaces, por lo que no pueden ser eliminados o destruidos debido a su importancia para el aporte de la conectividad y las áreas prioritarias para la restauración son áreas donde se dificultan considerablemente los procesos ecológicos que se llevan a cabo en el paisaje por lo que la restauración de las barreras puede conducir a una mejora de la conectividad, especialmente en ciudades que se encuentran altamente urbanizadas. Para la propuesta de las áreas prioritarias se llevaron a cabo la identificación de núcleos de mayor importancia, los cuellos de botella y barreras de los corredores de menor costo identificados gracias a la teoría de circuitos y los paseos aleatorios (random walk) en la herramienta de Linkage Mapper. Esta combinación de

metodología se ha utilizado ampliamente en el continente asiático en los recientes años para crear y optimizar redes de infraestructura verde.

Conocer e identificar los espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad es esencial para un óptimo y sostenible desarrollo de infraestructura verde en una ciudad que se encuentra constantemente presionada por las actividades económicas, el crecimiento demográfico y la constante expansión de las áreas urbanas. Recuperar y mantener en un estado adecuado estos espacios verdes se ha vuelto prioritario para mantener procesos ecológicos elementales para la migración de especies y el mantenimiento de servicios ecosistémicos.

## 1.2 Planteamiento del problema

Hoy en día más de la mitad de la población mundial habita en las ciudades, incluso se ha llegado a decir que la humanidad se ha transformado en una especie urbana (Unesco, 1985). El 55 % de la población mundial se ha asentado en las ciudades y según estimaciones, para el 2050, se espera que alrededor del 70 % de la población llegue a habitar las urbes (Naciones Unidas, 2018). El caso del Gran Santiago no es una excepción, al igual que la mayoría de las ciudades latinoamericanas, Santiago ha presentado un explosivo y descontrolado crecimiento de su límite urbano provocado por el crecimiento demográfico y la presión inmobiliaria, convirtiéndose en una de las ciudades más urbanizadas del continente americano. Solo la Región Metropolitana de Santiago concentra al 40,47 % de la población nacional, donde el 96,3 % de la población regional que habita este territorio lo hace en el área urbana, según el Censo de población (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017).

A pesar de que la urbanización ha permitido que la población haya podido acceder a los beneficios propios que pueden otorgar las ciudades, este desarrollado se ha traducido en un proceso con diversos conflictos y consecuencias para su propio entorno. Las grandes presiones que han supuesto las ciudades han provocado una completa transformación del paisaje natural, como la destrucción de la gran riqueza de los suelos naturales, la alteración del medio natural por un ecosistema altamente artificial que compone la ciudad, introduciendo especies no nativas, afectando procesos importantes como los flujos energéticos y modificando ciclos propios del medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2020). Además, la biodiversidad y la funcionalidad de los ecosistemas, que aportan servicios indispensables a nuestras sociedades, se han visto perturbadas. Así mismo, la fragmentación del paisaje afecta la movilidad de las especies, los flujos de materia y energía (ej.: agua, viento) y de la población humana generando que los paisajes urbanos se establezcan sin conectividad dentro de la matriz urbana (Rueda, 2020).

Los espacios verdes dentro de la ciudad se caracterizan por ser heterogéneos y desiguales en tanto a su distribución como también de una baja cantidad y calidad. Informes señalan que en general Santiago presenta una cobertura de espacios verdes menor a los 8 m<sup>2</sup> por habitante (Ministerio del Medio Ambiente, 2020), por debajo del estándar de áreas verdes que se ha establecido por el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU) de 10 m<sup>2</sup> por habitante.

Santiago se caracteriza por ser una ciudad que constantemente se encuentra en proceso de urbanización, entendiéndose por ello al proceso de pavimentación de calles y pasajes, plantación y obras de ornato, instalaciones sanitarias y energéticas, obras de alimentación y desagües de aguas servidas y de aguas lluvias y obras de defensa y servicio como lo señala el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (1975). Esto ha provocado la desconexión de los espacios verdes presentes de la ciudad, acarreando alteraciones en el sistema desde la pérdida de biodiversidad, falta de movilidad de la fauna y personas y contaminación del aire, entre otros.

La falta de conectividad entre los espacios verdes de la ciudad no solo fragmenta hábitat, sino que se generan situaciones de riesgo como la pérdida de individuos provocada por los atropellos cuando se movilizan las especies en el territorio, lo que restringe su movilidad, acceso a lugares de refugio, alimento y reproducción (Gurrutxaga, 2004).

Por otra parte, la contaminación del aire de Santiago se acentúa principalmente por el uso de vehículos, el parque industrial y el consumo de leña, alterando las características del aire, modificando entre ellos su circulación, a causa de la geometría, material y color de las calles y edificaciones (Romero et al., 2010). Las áreas verdes juegan un rol clave en las ciudades contaminadas, aportan servicios ecosistémicos significativas que ayudan a descontaminar la ciudad, sin embargo, estas deben formar parte de un sistema integrado que los vinculen entre si con corredores verdes que se establezcan en los límites de la ciudad o que resulten de áreas de conservación de la naturaleza, terrenos agrícolas o terrenos forestados (Romero et al., 2010).

No obstante, los espacios verdes urbanos han recobrado una nueva creciente importancia en el tema de la planificación de ciudades más sustentables debido a su aportación a la calidad de vida de las poblaciones. Estos proporcionan una serie de beneficios, entre ellos, se ha reconocido su capacidad de mitigación de los impactos negativos de la urbanización creando ciudades más resilientes, mantienen los servicios ecosistémicos como también incrementan la biodiversidad de las ciudades (Prieto-Torres, 2020).

Con el renovado reconocimiento de la importancia de los espacios verdes, dejando de ver a estos espacios como tierras disponibles para ser urbanizadas, se plantean como una tipología de uso por sí mismo que entregan una serie de beneficios tanto sociales como económicos y ecológicos. Bajo esta perspectiva, la infraestructura verde (IV) cumple el rol de mantener ecosistemas viables y beneficios asociados al bienestar humano y a la sustentabilidad ambiental (Vásquez, 2016). Se plantea la infraestructura verde como una solución rentable para realinear las áreas urbanas hacia la residencia y la sostenibilidad a largo plazo (Liu et al., 2020).

La infraestructura verde se señala como un enfoque que posee como eje estratégico la planificación territorial y sustentabilidad ambiental (Benedict & McMahon, 2006). En concreto, corresponde a un sistema interconectado de espacios verdes diversos que sostienen una variedad de funciones y beneficios. La infraestructura verde se conceptúa como conector de zonas protegidas o de alto valor natural, de espacios verdes urbanos y rurales, así como de elementos urbanos, zonas verdes y espacios libres públicos que sirvan de corredores ecológicos (también llamados corredor biológico, corredor verde, corredor de conservación, entre otros).

La conectividad es un principio fundamental para desarrollar un sistema infraestructura verde, entendiéndose que los espacios verdes deben estar vinculados espacialmente con el

objetivo de permitir el movimiento de personas, especies de fauna, viento, agua y materia viva entre los componentes del sistema (Benedict & McMahon, 2006).

Se considera que la conectividad de las redes ecológicas es imprescindible para la conservación de la biodiversidad, por lo que deben crearse y optimizarse a fin de mantener el funcionamiento del ecosistema (An et al., 2021). Además, un sistema de infraestructura verde no solo tiene alcances ecológicos sino que también una red interconectada de espacios verdes favorece la movilidad de las personas, la salud humana, el ocio, un desarrollo social sostenible, incluso es capaz de mejorar el sentido de identidad de una comunidad (Hansen et al., 2016).

Es por ello por lo que surge la necesidad de identificar los espacios verdes prioritarios para mejorar y restaurar la conectividad de la infraestructura verde, ya que contribuirá a la conservación y restauración de los ecosistemas mediante la movilidad de flujos de materia y energía. Por lo que constituirá un antecedente a la toma de decisiones en cuanto a la priorización en la planificación y gestión en el mejoramiento de la conectividad de los espacios verdes a fin de optimizar el sistema de infraestructura verde.

## 1.3 Estado del asunto

### 3.3.1.1 Fragmentación del paisaje

La historia del desarrollo de las sociedades humanas ha estado marcada por la constante transformación del medio que les rodea, en donde cada momento histórico, se han logrado diferenciar por las formas de relación particulares en las que se han visto envuelto la sociedad y el ambiente natural, materializándose en una estructura territorial singular que se expone por medio del paisaje visible (Morera et al., 2007), lo que configura al paisaje como un sistema dinámico y complejo en constante transformación.

La transformación del paisaje se ha ido desencadenando por múltiples y diversas actividades antrópicas que se desarrollan a lo largo del territorio, convirtiendo en sí mismas estas actividades en agentes moldeadores de paisajes más humanizados. Los cambios del uso y de cobertura de suelo se han producido como consecuencia del crecimiento de la población, la expansión de la agricultura, la urbanización del suelo, la ganadería y el incremento de la industria en desmedro de las áreas naturales, entre otras actividades, que se han traducido en la eliminación y transformación de la vegetación primaria, llegando a calcularse en más de un 50 % de los ecosistemas terrestres en el año 2012 (Mendenhall et al., 2012; Galindo et al., 2019).

Bajo en este contexto, la fragmentación del paisaje se asocia a los efectos negativos derivados de las acciones antrópicas, lo que implica una modificación intensa del territorio y que se traduce en una pérdida importante de hábitats naturales, en la disminución e incluso en la extinción de especies, siendo considerada como una de las principales amenazas para la biodiversidad (Múgica de la Guerra et al., 2002). El proceso de la fragmentación es continuo y dinámico que cambia la estructura del paisaje, provocando una disminución de las cubiertas vegetales, convirtiendo la vegetación original de un área determinada reducida a pequeños fragmentos aislados unos de otros en una matriz más o menos alterada, aumentando las distancias entre parches de hábitat naturales o seminaturales.

Para contrarrestar la tendencia de la fragmentación del paisaje y los hábitats, se ha señalado que el gestionar y desarrollar infraestructura verde se vuelve esencial. Se considera fundamental que la naturaleza esté conectada para formar un sistema, la infraestructura verde se considera como la infraestructura en la que se debería basar el desarrollo sostenible.

### 3.3.1.1 Infraestructura verde, conectividad y corredores

El estudio y la implementación de la infraestructura verde en la creación de ciudades más sustentables y resilientes es relativamente reciente en la literatura, sobre todo en las regiones del Sur Global, como en el caso Latinoamérica y del Caribe, en donde pocos artículos han utilizado el término como tal. En los estudios de los tipos de IV más investigados en la región

corresponden a los relacionados con los bosques urbanos, espacios verdes y parques urbanos (Pauleit et al., 2021). No obstante, se ha concebido la infraestructura verde como una solución basada en la naturaleza para enfrentar los diversos problemas urbanos que han presentado las ciudades, como la fragmentación del paisaje y del hábitat.

A pesar de que no hay una única definición de lo que es la IV en la literatura existente, para algunos autores como Benedict y McMahon (2006) se han referido a ella como un concepto de planificación y diseño territorial para el desarrollo urbano sostenible, es decir, como un sistema interconectado de espacios verdes diversos que sustentan diversas funciones y beneficios. Entre sus características también se ha mencionado que posee cuatro principios esenciales para su desarrollo: sistema, diversidad, multifuncionalidad y conectividad. Muchos autores (Bartesaghi Koc et al., 2017; Mell, 2016; Rolf et al., 2018) coinciden que la concepción básica en cuanto a la multifuncionalidad y la conectividad son requisitos fundamentales para el desarrollo de la infraestructura verde. Debido a esto es por lo que la conectividad ha estado ligada inherentemente al concepto de infraestructura verde, apuntando consigo al desarrollo de una red para apoyar y mejorar procesos, funciones y beneficios que están restringidos sin estas interconexiones (Rolf et al., 2018).

Uno de los supuestos básicos de la ecología del paisaje es la existencia de un estrecho vínculo entre la configuración espacial del paisaje y los procesos que se desarrollan en él, comprendiendo que la configuración espacial no solo abarca la naturaleza de sus elementos, ya sea las coberturas del suelo o los tipos de vegetación, sino de las relaciones de vecindad, proximidad, forma y conexiones, que se generan entre ellos (Múgica de la Guerra et al., 2002).

La noción de conectividad de paisaje tiene su origen en los conceptos de ecología de paisaje y en el “conocimiento de las interrelaciones entre la estructura del paisaje y el movimiento de los organismos” (Merriam, 1984). En esta clásica definición de conectividad del paisaje ha hecho referencia al grado en que el paisaje facilita o impide el movimiento y flujo de organismos entre parches de hábitats (Taylor et al., 2006; Tischendorf & Fahrig, 2000).

A pesar de la diversidad de formas en que se ha ocupado el término de conectividad en la literatura, desde este enfoque, se ha distinguido dos grandes dimensiones: estructural y funcional. La conectividad estructural se refiere principalmente la estructura espacial de los paisajes y sus relaciones físicas, haciendo referencia a la continuidad y adyacencia entre los parches de un paisaje, considerando también las formas y tamaños de los parches, esta conectividad aumenta si se estrechan las relaciones físicas entre las personas de hábitats (Taylor et al., 2006). Por otro lado, la conectividad funcional considera la respuesta de los flujos de materia y energía a lo largo del paisaje, como también los movimientos de los organismos presentes en la estructura del paisaje (Hansen et al., 2016).

Se ha señalado que la mejora de la conectividad, entre otros, tiene el alcance de incrementar las tasas de intercambio de individuos entre poblaciones, aumento de la estabilidad y capacidad de recuperación frente a alteraciones y recolonización por posibles extinciones locales, por tanto, una mejora en la persistencia local y regional (Saura Martínez de Toda, 2013). Una red bien interconectada de espacios verdes es capaz de otorgar funciones y servicios ecosistémicos elementales, ya sea la provisión de hábitat, regulador de inundaciones, entre otros, para mantener un paisaje urbano sostenible. Los aportes que puede generar una infraestructura verde bien conectada no se mantienen únicamente en términos ecológicos, sino que también se extienden al ámbito social y cultural, prestando servicios ecosistémicos culturales donde no solo se permiten el movimiento de las personas, el ocio y las actividades recreativas en los espacios verdes sino que también experiencias espirituales, identidad cultural y sentimientos de apego que incluso pueden influir en las relaciones de vecindad y amistad (Hansen et al., 2016).

Uno de los enfoques para el estudio de la conectividad del paisaje y para dar respuesta al proceso acelerado de fragmentación surgió la idea de los corredores como formas para conectar los fragmentos aislados del paisaje (García & Abad, 2014). Estos corredores se han caracterizado por ser elementos lineales del paisaje capaces de otorgar funciones y servicios ecosistémicos desde la provisión de hábitat, el flujo genético y energético, que facilitan el movimiento de especies (flora y fauna), etc. Los corredores son señalados como elementos esenciales para la promoción de la conectividad de los paisajes fragmentados.

El término de corredor ecológico se ha utilizado como una manera genérica para definir una:

*“vía que facilita la dispersión de los seres vivos entre hábitat (o elementos de interés) que conectan entre dos más o más lugares, que se encuentran en condiciones adecuadas para su desarrollo”.*

(García & Abad, 2014, pág. 256).

Por otra parte, también se ha acuñado el término de corredor verde, entendiéndolo como áreas lineales con múltiples funciones sociales y ecológicas (Vásquez, 2016). Se ha descrito a los corredores verdes como:

*“sistemas y/o redes de tierras protegidas que incluye corredores lineales y áreas más grandes de tierras protegidas que están conectadas física y funcionalmente. Se gestionan para múltiples usos, como la protección de la naturaleza, la gestión de la biodiversidad, los recursos hídricos, el ocio y la protección de los recursos culturales e históricos”.*

(Ahern, 1995, pág. 11).

La conectividad del paisaje se ha evaluado desde diferentes enfoques y con propósitos diversos. En general, en los estudios de la modelación de la conectividad ecológica han

utilizado especies focales con la idea de la selección de “público objetivo” en el diseño de corredores ecológicos o en infraestructuras de conectividad, orientado principalmente en la conectividad funcional del territorio, especialmente en la conectividad y/o corredores de la vida silvestre (Beier et al., 2008).

No obstante, también se han implementado enfoques más amplios para el estudio de la conectividad en las que se puede considerar además de los movimientos de especies, sino que otros flujos potenciales de materia y energía, ya sea viento, agua e incluso servicios ecosistémicos. Estas aproximaciones más amplias se han utilizado para los estudios de la planificación territorial, como en los casos de la Estrategia Europea de Infraestructura Verde (European Environment Agency, 2011), Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020 (Ayuntamiento de Barcelona, 2013), Plan de Infraestructura Verde de Vitoria-Gasteiz (Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, 2014) o en el caso local Planificación Ecológica a escala local zona central, Chile (MMA - ONU Medio Ambiente, 2020).

En los últimos años, desde países del sur global del continente asiático se han generado una considerable cantidad de estudios y artículos académicos que abarcan la conectividad en sus análisis ya sea para estudiar la resiliencia urbana mediante la conservación de la conectividad de la infraestructura verde en la ciudad de Shenyang, China (Liu, Z. et al., 2020), estudios de métodos para vincular el análisis de la conectividad funcional y estructural para la construcción de redes de infraestructura verde urbana en la ciudad de Beijing, capital de China (Liu, Y. et al., 2022), para el análisis del patrón de bloqueo ecológico en áreas importantes en función ecológica en China (Xu, J., 2022), optimización de una red regional de infraestructura verde (Shi & Qin, 2018; Shen et al., 2021), sobre integración de los servicios ecosistémicos en la construcción de seguridad ecológica en cuenca de río Daning, China (Gou et al., 2022), entre otros.

Varios autores de los mencionados han utilizado una combinación de métodos para vincular la conectividad en los estudios de la optimización de una red de infraestructura verde, como también para vincular la conectividad estructural y funcional en el análisis la infraestructura verde. Tal como Liu, Z. et al. (2020), Liu, Y. et al. (2022), Shi & Qin (2018) y Shen et al. (2021) han vinculado el análisis morfológico de patrones espaciales, la teoría de grafos y la teoría de circuitos para el estudio de la conectividad, enfocada en una escala espacial regional. Mencionan que una de las ventajas de la combinación de metodologías propuestas recae en que no es necesario contar con una especie focal para integrar en el análisis, que muchas veces son difíciles de acceder debido a la falta de información robusta de presencia de especies, entre otros.

El análisis morfológico de patrones espaciales, enfocado en la conectividad estructural del paisaje, tiene la capacidad de identificar y diferenciar en clases diferentes según el tipo de estructura de paisaje no solapados, identificando así los núcleos, áreas de gran valor ecológico para los procesos abióticos y bióticos. Las métricas de paisaje basado en la teoría

de grafos ayudan a identificar los nodos de mayor importancia para la conectividad. La teoría de circuitos tiene la particularidad de ofrecer la capacidad de deducir la conectividad del paisaje para múltiples especies generalistas, con requerimientos de habitar similar, que realizan movimientos más o menos aleatorios y que “*responden positivamente a la presencia de un mayor número de conexiones entre parches de hábitat*” (Martínez & Sainz, 2016, pág. 5).

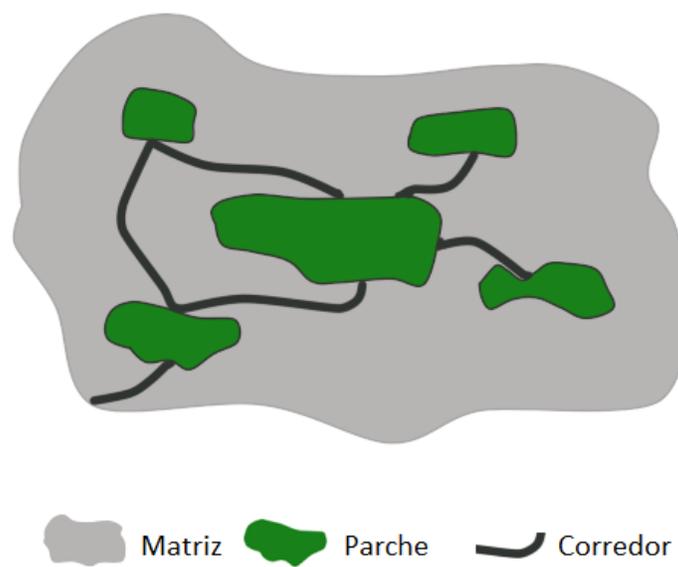
### 3.3.1.1 Estructura del paisaje y estructura de grafos

En múltiples estudios desde la ecología de paisaje y sobre la conectividad del paisaje, han utilizado en sus análisis la estructura del paisaje propuesta por Forman (Forman, 1995), el modelo de parche-matriz-corredor (ver **Figura 1**). Este modelo se centra por sobre todo en la configuración geográfica del paisaje fragmentado (Valdés, 2011) más que en la riqueza de especies, considerando el paisaje como un mosaico complejo compuesto por elementos del paisaje.

En este modelo, el mosaico es entendido como un paisaje fragmentado donde se puede diferenciar tres grandes elementos: los parches (fragmentos), los corredores y la matriz.

Los parches corresponden a las diferentes unidades morfológicas que se extienden en el territorio, es decir, áreas de hábitat que pueden ser de diferentes tamaños y formas. Los corredores son las conexiones existentes entre los fragmentos como elementos lineales de hábitat. Y la matriz, el elemento dominante, compuesta por los fragmentos y corredores, que puede ser de diversas extensiones (Vila et al., 2006).

**Figura 1.** Esquema modelo Parche-matriz-corredor.



Fuente: elaboración propia a partir a Vera et al. (2012).

La teoría de grafos aprovecha la misma estructura de datos del proveído por la estructura del paisaje del modelo parche-matriz-corredor. Es un enfoque matemático basado en la consideración de una colección de puntos o nodos y líneas. Más concretamente, los grafos son redes compuestas por un conjunto de nodos o vértices, refiriéndose a puntos de conexión que pueden representar por ejemplo parches de hábitat, poblaciones u otro tipo de unidades delimitadas de acuerdo con criterios espaciales, conectado por aristas. Una arista entre dos nodos implica la existencia de un flujo ecológico entre ellos (Urban & Keitt, 2001).

Los grafos permiten representar el paisaje como una forma espacialmente explícita, logrando que se pueda reconocer la importancia a nivel individual de los elementos para la conservación o mejoramiento de la conectividad del paisaje en su conjunto (Saura Martínez de Toda, 2013), mediante índices y métricas que se pueden aplicar a los análisis de conectividad. Las estructuras de grafos proveen una manera simple y rápida para evaluar la conectividad del paisaje, ya sea a niveles de parches y/o de paisaje. En un contexto ecológico, la teoría de grafos se comenzó a utilizar para la evaluación de los hábitats fragmentados y para identificar y priorizar los parches para la conservación.

Los nodos representan atributos relevantes para el análisis ya sea el hábitat o números de individuos y los enlaces o aristas representan las relaciones topológicas o conexiones funcionales entre los nodos (Saura Martínez de Toda, 2013). Los enlaces se pueden representar mediante la probabilidad de dispersión directa como la distancia euclidiana (distancia recta entre los puntos) o una distancia efectiva con base en las capacidades de dispersión a través de diferentes tipos de cubierta presentes en la matriz de paisaje (McRae et al., 2008; Saura Martínez de Toda, 2013).

### *3.3.1.1 Núcleos y análisis morfológico de patrones espaciales*

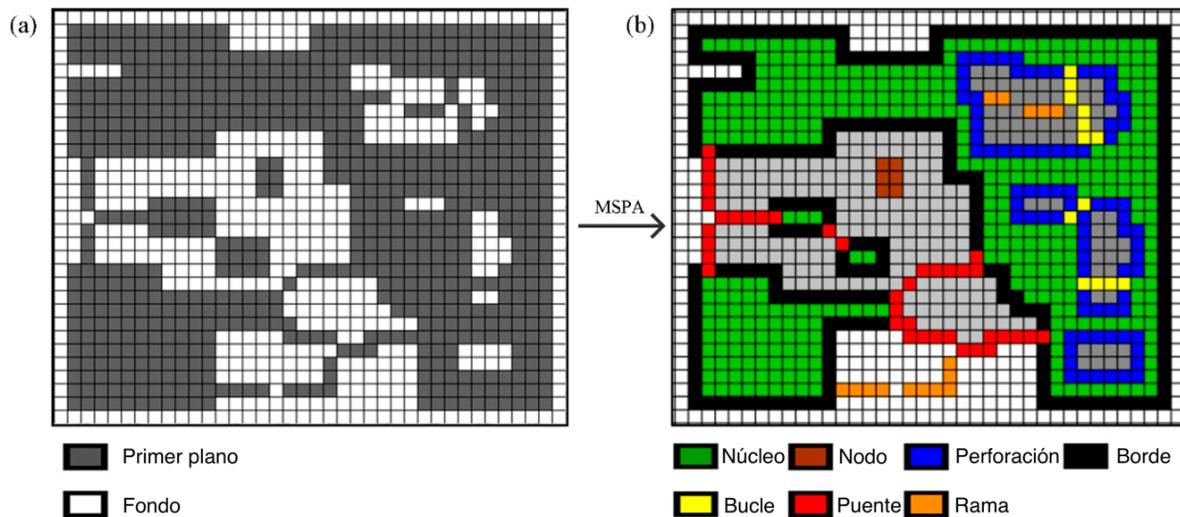
Las redes ecológicas se pueden diseñar de diferentes enfoques de la conectividad, ya sea estructural o funcional. En los últimos años, el enfoque de análisis de patrones espaciales morfológicos o MSPA (por sus siglas en inglés) que se centra en la conectividad estructural del paisaje, se ha ido aplicando cada vez más en el estudio de las redes ecológicas (An et al., 2021).

El MSPA es un enfoque útil que se originó a partir de la morfología matemática y que se introdujo posteriormente en el análisis de imágenes (Liu et al., 2020) y en la descripción de los patrones espaciales del paisaje (Ostapowicz et al., 2008), a través de operaciones como erosión, expansión, apertura y cierre, permitiendo distinguir los tipos y estructuras de paisaje con mayor precisión (Soille & Vogt, 2008). Los estudios iniciales usando esta metodología se enfocaron principalmente en el análisis del patrón de cobertura de uso de suelo de imágenes ráster para evaluar la fragmentación del bosque a lo largo del tiempo y estudios principalmente forestales.

El MSPA es un método de procesamiento de imágenes que se basa en los datos de uso de suelo para identificar objetivamente siete clases de paisaje que son importantes para mantener la conectividad que no se superponen entre sí (ver Figura 2). Las clases de paisaje se componen por el núcleo (core), borde (edge), puente (bridge), bucle (loop), nodo (islet), ramas (branch) y perforación (perforation) que poseen un significado ecológico diferente (ver Anexo 1). Este método se ha utilizado en varios estudios para evaluar la Infraestructura verde a diferentes escalas tanto nacional, regional como urbana (Liu et al., 2022).

A diferencia de otros métodos para estudiar la conectividad de paisaje que se han caracterizado por aislar los núcleos o corredores en sus análisis, el enfoque del MSPA identifica los núcleos y corredores de hábitat importantes ecológicamente, como espacios con predominio de vegetación, dentro de una determinada área de estudio que desempeñan un papel importante en la conectividad del paisaje a nivel de elementos de imagen (Xu et al., 2015).

**Figura 2.** Segmentación del análisis morfológico de patrones espaciales. a) entrada: imagen binario y b) resultados de la segmentación MSPA.



Fuente: extraído de Vogt (2022).

### 3.3.1.1 Teoría de circuitos

McRae (2006) introdujo la teoría de circuitos en el estudio de la ecología del paisaje como un enfoque alternativo para modelar los flujos de genes, las rutas de dispersión y los movimientos de organismos (Dickson et al., 2018). El origen de la teoría de circuitos reside en la ingeniería eléctrica, sin embargo, su aplicación se diversificó a otras áreas de estudio como en el análisis de la conectividad de redes químicas, neuronales, económicas y sociales (McRae et al., 2008). McRae (2006) relacionó los aportes de Doyle y Snell (1984) sobre la

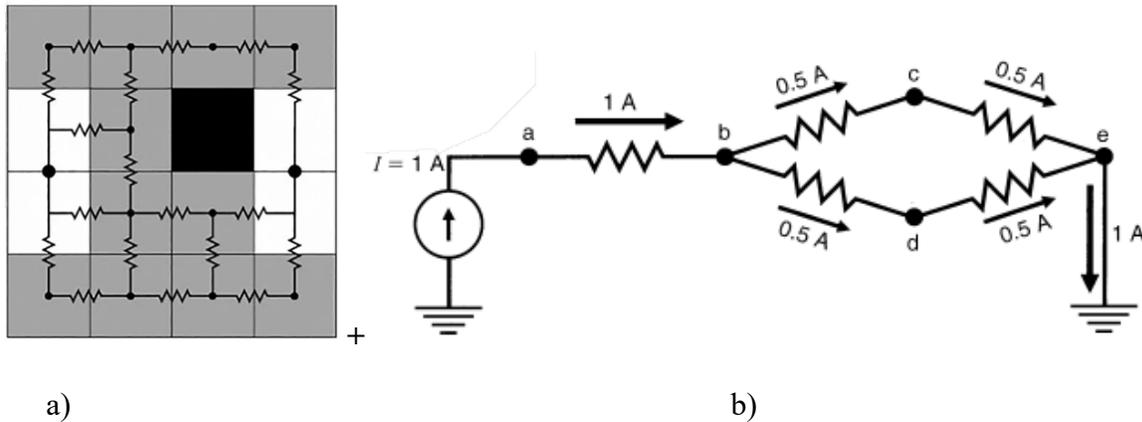
teoría de los paseos aleatorios de las redes eléctricas y de Chandra et al. (1997) acerca de la relación entre los tiempos de conmutación con las resistencias efectivas de los caminantes aleatorios entre puntos en circuitos con la genética de poblaciones y la ecología del paisaje.

En la teoría de circuitos, los circuitos son definidos como redes de nodos conectados por resistencias (componentes electrónicos que conducen la corriente) que se utilizan para representar y analizar gráficos (McRae et al., 2008). Los modelos de conectividad de la teoría de circuitos aprovechan la estructura de los datos de la teoría de grafos de nodos interconectados, pero reemplaza las aristas o enlaces de conexiones por resistencias.

Basado en la ley de Ohm, cuando se aplica un voltaje en el circuito por medio de dos nodos, la cantidad de corriente que fluye en el circuito está dada por el voltaje aplicado y la configuración de resistencia, cuanto menor sea la resistencia, mayor será la corriente que fluya por unidad de voltaje. Los paisajes son considerados como una superficie conductora y asigna diferentes valores de resistencia a los parches del paisaje en función de los factores de resistencia, ya sea el tipo por cobertura vegetal, pendiente o estructura del paisaje, una baja resistencia implica permeabilidad y permite el movimiento y la migración de especies y el flujo de genes, por el contrario, una alta resistencia generará impedimentos para el movimiento (McRae et al., 2008; Liu, Y. et al., 2022).

En un paisaje simplificado como una cuadrícula (ver Figura 3), existen tres tipos de parches de paisaje: uno de resistencia cero (en blanco), uno resistencia finita (en gris) y una resistencia infinita o de barrera (en negro). Las celdas con resistencias cero se consolidan como nodos claves o de alto valor ecológico, las celdas con resistencia finita se convierten en pequeños nodos del circuito, en donde se conectan con otros nodos adyacentes mediante las resistencias y las celdas de resistencia infinita son consideradas como obstáculos para la migración de especies por lo que se descartan. La aplicación de un voltaje en un circuito que une un nodo a y e está relacionado con las probabilidades de paseo aleatorio. En el circuito se observan las resistencias unitarias y las ramas del circuito, cuando se aplica una corriente  $I = 1$  A en el punto a se observa a demás las veces que se espera que un caminante aleatorio pase por las ramas antes de llegar al punto e. Todos los caminantes aleatorios deben pasar por la rama unida entre el punto a y b, sin embargo, para llegar al punto e desde el punto b se espera que la mitad de los caminantes tomen la rama superior y la otra la inferior, reduciendo la densidad de corriente, que representa la magnitud o frecuencia de la posibilidad de que las especies pasen por diferentes nodos o caminos. La densidad de corriente puede utilizarse para identificar los corredores o cuellos de botellas, las características del paisaje que los dispersores tienen una alta probabilidad de pasar (McRae et al., 2008).

**Figura 3.** Representación esquemática de la Teoría de circuitos a) representación simplificada de un paisaje a cuadrilla y b) un circuito simple cuando se le aplica un amperio.



Fuente: extraído de McRae et al. (2008).

Los modelos de conectividad basados en la teoría de circuitos son relativamente nuevos en los estudios de ecología del paisaje, estos se han caracterizado por ofrecer una amplia gama de usos y de ventajas por sobre otros modelos de conectividad. Bajo la teoría de los paseos aleatorios han aportado en la capacidad de poder evaluar las contribuciones en múltiples vías de dispersión, predecir los patrones de movimiento y el destino de los caminantes aleatorios en paisajes complejos y, además, capaces de identificar parches de hábitat y corredores de movimientos importantes para los objetivos de una planificación con enfoque en la conservación (McRae et al., 2008).

Una de las ventajas que presenta este modelo de conectividad basado en la teoría de circuitos recae en que puede configurarse como un método complementario a otros enfoques disponibles como la teoría de grafos y de caminos de mínimo costo, aprovecha las mismas estructuras de datos para su ejecución (McRae et al., 2008). La teoría de circuitos es capaz de proporcionar un método robusto para el análisis de la conectividad a pesar de la incertidumbre y/o falta de datos de distribución de especies. De la derivación de las propiedades básicas de esta teoría a herramientas de análisis de conectividad como Linkage Mapper hace posible cartografiar las características del territorio que contribuyen más eficazmente a la conectividad del paisaje por medio de las predicciones de rutas de menor costo y los puntos de pellizcos (McRae et al., 2008).

## 1.4 Área de estudio

El área de estudio corresponde al área urbana consolidada del área de estudio del proyecto Conexus. Se determinó como límite un área de 10 km desde el área urbana consolidada de la Región Metropolitana (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2019), el rango se definió debido a que cuyos límites coinciden aproximadamente con las primeras divisorias de aguas que se pueden encontrar en los cordones montañosos (ver Figura 4).

Los límites del estudio abarcan 43 de las 52 comunas de la Región Metropolitana, que corresponden principalmente a las comunas de la provincia de Santiago y las comunas de Puente Alto, Calera de Tango, San Bernardo, Padre Hurtado y Peñaflores y parcialmente a Lo Barnechea, Colina, Lampa, Pirque, San José de Maipo, Buin y Talagante.

La Región Metropolitana se configura como la región más poblada a nivel país, concentrando la mayor parte de la población en las áreas urbanas de la ciudad. Para el área de estudio se estima que la población asciende aprox. 6.762.629, según el Censo 2017, lo que representa el 39,1% de la población nacional.

El paisaje metropolitano se caracteriza por la mancha urbana ubicada en la depresión intermedia y por los cordones montañosos que rodean la ciudad, la Cordillera de Los Andes en el sector este y la Cordillera de la Costa por el oeste. Se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones invernales y estación seca prolongada, promediando anualmente precipitaciones del orden de 350 mm (Reyes & Figueroa, 2010). Desde el punto de vista hidrográfico, el área de estudio se encuentra conformada por la Cuenca del río Maipo que nace de la confluencia de los ríos Cruz de Piedra, Alvarado y Argüelles y tiene como tributarios a los ríos Volcán, Colorado y Yeso en la cordillera. En el sector norte de la cuenca, el río Mapocho cruza Santiago drenando sus aguas en el río Maipo en el límite comunal de Isla de Maipo, Talagante y El Monte. El río Maipo es el principal recolector de las aguas de la Región Metropolitana y atiende aproximadamente el 70% de la demanda de agua potable y 90% de las demandas de regadío (DGA, 2004).

A pesar del carácter urbano de la Región Metropolitana, el 13,8 % de la superficie regional corresponden a terrenos agrícolas cuyo principal rubro son las frutas, que abarca 54.661,71 ha equivalente al 3,5% de la superficie regional y a las hortalizas con el 0,15% de la superficie regional (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2022). Con el continuo crecimiento de Santiago ha conllevado a la pérdida de suelos agrícolas, concentrándolos principalmente en los sectores periurbanos (ODEPA, 2012), en los límites entre los espacios urbano-rural (Barsky, 2005). Las plantaciones frutales se ubican sobre todo en el sector sur y sur poniente de Santiago, especialmente en las provincias de Maipo, seguido de Talagante y en menor medida en el sector norponiente en la provincia de Chacabuco.

Entre los espacios verdes naturales de la región, se encuentra el bosque nativo, que se caracteriza por ser de tipo esclerófilo, cuya extensión alcanza los 363.955,3 ha (CONAF, 2021), lo que representa el 2,5% de la superficie de bosque nativo nacional, concentrándose principalmente en la provincia de Melipilla. También se distribuyen a lo largo del piedemonte de la cordillera de Los Andes y de la Costa, en el límite urbano de la ciudad. En tanto a las áreas protegidas, la región metropolitana se configura como una de las regiones con menos superficie de áreas protegidas del país con 98.333 ha en total para el año 2011 (Sierralta et al., 2011). La región tiene tres áreas silvestres protegidas del Estado, la Reserva Nacional Río Clarillo 10.185 ha en la comuna de Pirque y el Monumento Natural El Morado con 3.009 ha en San José de Maipo. Actualmente, la región cuenta con 11 santuarios de la naturaleza de 78.228 ha en total (Red Santuarios de la Naturaleza RM, 2022), el santuario de la naturaleza Yerba Loca en Lo Barnechea (39.029 ha) y San Francisco de Lagunilla y Quillayal (13.426 ha) son los santuarios que poseen la mayor superficie en la región y ambos se encuentran insertos en el piedemonte de la cordillera de Los Andes.

En cuanto a las áreas verdes presentes en la ciudad, la oferta de áreas verdes de diversa tipología asciende a los 238,43 km<sup>2</sup> para el año 2009 distribuidas de manera heterogénea en la región y con variado grado de consolidación (Ubilla et al., 2014). En el catastro de espacios verdes realizado por el proyecto Stgo+ Infraestructura Verde, las áreas verdes urbanas tienen una extensión de 35,65 km<sup>2</sup> donde los parques urbanos alcanzan los 19,63 km<sup>2</sup>. Gran aporte a la superficie de las áreas verdes lo realiza el Parque Metropolitano de Santiago, La Platina, Parque O'Higgins y Parque Padre Hurtado. Se encuentran dispersos en la ciudad y presente en 33 comunas de la región, comunas como La Cisterna no posee ningún parque presente en su territorio.

Figura 4. Delimitación del área de estudio, Santiago, RM.



Fuente: elaboración propia (2022).

## **1.5 Objetivos**

### *1.5.1 Objetivo General*

Identificar los espacios verdes prioritarios para mejorar y mantener la conectividad de la infraestructura verde de Santiago

### *1.5.2 Objetivos Específicos*

1. Identificar los núcleos a conectar a partir del Análisis morfológico de patrones espaciales.
2. Definir una red de corredores basado en la ruta de menor costo entre los núcleos identificados.
3. Identificar los cuellos de botella y de barrera a partir de los corredores de menor costo para identificar los espacios verdes prioritarios para conservar y restaurar.

## CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

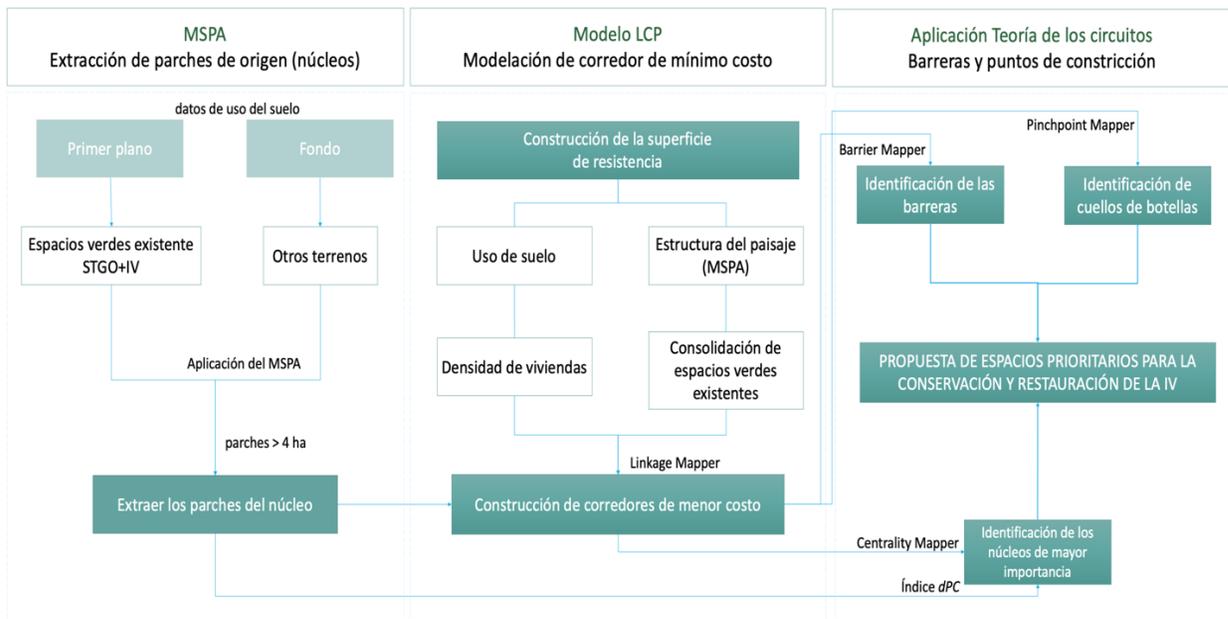
La metodología consistió esencialmente en tres grandes etapas. En la Figura 5 se detallan las etapas: 1) la extracción de los núcleos identificados en el análisis morfológico de patrones espaciales, 2) la modelación del corredor de mínimo costo y 3) la identificación de los espacios verdes prioritarios de la infraestructura verde para la conservación y restauración de la conectividad de la red según la identificación de 3.1) núcleos de mayor importancia, 3.2) cuellos de botella y 3.3) barreras.

En el presente trabajo de memoria se estudió la conectividad del sistema de infraestructura de Santiago donde se realizó análisis de escenarios con diferentes tipologías de espacios verdes definidos en el proyecto de Stgo+ Infraestructura Verde. El estudio de la conectividad por escenario se estableció para conocer el rol que desempeñan y la contribución que las diferentes tipologías de espacios verdes pueden tener en la conectividad de un sistema de infraestructura verde en Santiago.

Se establecieron cuatro escenarios a estudiar:

- Todos los espacios verdes (contempla las seis tipologías de espacios verdes de Stgo+ Infraestructura Verde)
- Áreas verdes y espacios silvoagropecuarios
- Áreas verdes y espacios naturales
- Espacios naturales y silvoagropecuario

**Figura 5.** Esquema de los pasos metodológicos.



Fuente: elaboración propia (2022).

## **2.1 Identificación de los núcleos a conectar a partir del análisis morfológico de patrones espaciales**

Para este trabajo se utilizó el método del MSPA para seleccionar los núcleos a conectar en la modelación de los corredores del mínimo costo basado en la estructura del paisaje. El MSPA es un método basado en una serie de transformaciones morfológicas tales como erosiones, dilataciones, reconstrucción por dilatación, entre otros, que se encarga de segmentar los patrones binarios de interés en siete patrones mutuamente excluyentes: núcleo, nodo, bucle, puente, perforación, borde y rama. El núcleo tiene un importante significado ecológico para la conectividad del paisaje (Liu, Y. et al., 2022).

El análisis morfológico de patrones espaciales se obtuvo por medio del software GTB: Guidostoolbox (Vogt & Ritter, 2017). Se requiere una imagen ráster segmentada en dos categorías: primer plano y fondo. El primer plano es el plano de interés donde se establecen los usos de suelo de interés y el fondo los usos de suelos que no son primordiales para el estudio.

La definición de primer plano y fondo depende estrechamente de los objetivos planteados del estudio, en este se utilizó como elemento de primer plano los espacios verdes mapeados en el proyecto Stgo+ Infraestructura Verde de Conexus para la construcción de una red de infraestructura verde. Estos espacios verdes fueron mapeados a partir del uso de suelo del proyecto Planificación Ecológica a Escala Local de GEF Montaña (MMA - ONU Medio Ambiente, 2020) y se clasifican en seis categorías: áreas verdes, espacios verdes asociados a infraestructura vial, espacios verdes asociados a cursos de agua, espacios silvoagropecuarios, espacios naturales y espacios asociados a equipamiento.

Antes de la ejecución del MSPA, se seleccionaron los polígonos a trabajar de los espacios verdes del Stgo+ Infraestructura Verde bajo los criterios de tamaño del polígono y del porcentaje verde. Se seleccionaron los parches mayores a las 4 ha, ya que la escala de trabajo se estableció a nivel ciudad (1:50.000), por tanto, los elementos menores a este tamaño no son apreciados debido al área mínima cartografiada de la escala escogida (Chávez & Puebla, 2013). El criterio de porcentaje de verde se refiere al grado de consolidación del verde en el polígono, para las áreas verdes se estableció igual o mayor a 30% y para el resto de las tipologías de espacios verdes igual o mayor 50%. El porcentaje de las áreas verdes se estableció con un menor porcentaje debido a que estas áreas son las predominantes dentro del área urbana consolidada, se caracterizan por ser áreas verdes fuertemente antropizadas y corresponden a áreas de especial interés para la conservación de la biodiversidad urbana, pudiendo albergar especies, principalmente avifauna, de gran valor (Molina et al., 2017).

El resto de los paisajes se clasificaron como fondo, tales como autopistas, áreas residenciales, aeropuerto y aeródromo, asentamiento menor, espacios abiertos con escasa o nula vegetación, extracción de áridos, parque industrial, río, zonas de negocios y/o institucional

entre otros principalmente urbanos. En términos generales, los elementos del primer plano son las características que deben clasificarse, es decir, la segmentación MSPA solo se realiza para esta clase de datos (Vogt, 2022). Finalmente, se obtuvieron los siete tipos de paisajes no superpuestos mediante el método de análisis de ocho vecinos, con la anchura de los bordes fijados en 1 píxel equivalente a 30 m (Shi & Qin, 2018).

## 2.2 Modelamiento de corredores de menor costo

### 2.2.1 Resistencia o superficie de costo

En la modelación de los corredores de menor costo es necesario contar con una capa de resistencia o superficie de costo. La resistencia es definida como la resistencia que opone un determinado parche al movimiento de especies o al flujo de materia y energía. A cada píxel de una matriz de costo se le otorga un valor de acuerdo con el impedimento que encuentra el flujo del movimiento. Es decir, se necesita una capa de resistencia para modelar los impactos de las superficies del paisaje como la dificultad, el coste energético y la mortalidad de los procesos ecológicos (Liu, X. et al., 2020).

Generalmente para la modelación de la conectividad ecológica se utiliza un enfoque basado en especies paraguas del área de estudio (Acuña, 2020), basado en especies o ensamblajes focales, no obstante, para abordar el presente trabajo se optó por un enfoque más amplio de la conectividad, la modelación de la conectividad mediante los corredores considera otros los flujos ecológicos potenciales tal como de materia y energía.

En el área de estudio, la resistencia proviene principalmente de las superficies artificiales y zonas construidas, por lo que se estableció cuatro variables para la construcción de la superficie de costo: la estructura del paisaje (MSPA), el uso y cobertura de suelo, consolidación de los espacios verdes existentes (el grado de verde del polígono) y la densidad de viviendas. Los valores asignados para la superficie de costo para las cuatro variables utilizadas (ver Anexo 3) tienen el mismo peso en la construcción de la superficie de costos y los valores se establecieron en una escala de 1 a 100, donde más alto el valor asignado, mayor es la resistencia.

Los valores asignados para la capa de usos y coberturas de suelos fueron establecidos según la superficie de costos elaborada por el proyecto Planificación Ecológica a Escala Local (MMA - ONU Medio Ambiente, 2020), donde los costos oscilan originalmente entre 1 (muy bajo) en las superficies naturales y bosques nativos a 1000 (muy alto) en zonas residenciales y construidas. No obstante, se modificó la escala a entre 1 (muy bajo) a 100 (muy alto).

Los valores para las clases de paisaje del análisis morfológico de patrones espaciales se asignaron tomando como referencia los trabajos de Shi & Qin (2018), Liu, Z. et al. (2020) y Liu, Y. et al. (2022).

Tanto para la densidad de viviendas como para los espacios verdes existentes, se definieron los valores de las clases a partir del método de clasificación rupturas naturales de Jenks, genera clases conforme a las agrupaciones naturales propias de los datos, agrupa valores similares y maximiza las diferencias entre clases (ESRI, 2022). A mayor densidad de viviendas el valor de la superficie de costo es mayor y viceversa. En el caso del grado de

consolidación del espacio verde se estableció que a un mayor grado de consolidación menor es el costo y a menor consolidación o no existencia de espacio verde sería mayor el costo de la superficie.

### 2.2.2 *Corredores potenciales de mínimo costo*

Existen variados métodos y herramientas para la identificación y construcción de corredores para la conexión de los parches de interés para el estudio de la conectividad de un paisaje. Uno de los principales y el utilizado en el presente estudio es la modelación de los corredores de mínimo costo. Estos son rutas que representa el menor costo acumulado al desplazamiento de los organismos entre dos núcleos, es decir, representa el camino más fácil o eficiente posible que puede llevarse a cabo entre dos parches de hábitat (Martínez & Sainz, 2016).

Los corredores de mínimo costo fueron modelados por medio de la herramienta de Linkage Mapper en el ArcGIS 10.8. La herramienta desarrollada por McRae & Kavanagh (2011) crea mapas de corredores de mínimo costo basado en el costo de la distancia ponderada de cada celda a los núcleos o fuentes de hábitat más cercana. Utiliza como entradas un archivo vectorial con la información de los núcleos, una imagen ráster con las resistencias y un archivo de texto con las distancias euclidianas entre los núcleos calculadas por la extensión de Conefor Inputs en ArcGIS 10.8.

Para los análisis posteriores, se identificaron los corredores de menor costo de mejor calidad para las conexiones en el área de estudio. Se utilizó la métrica basada en la relación entre la distancia ponderada por el costo y la distancia euclidiana, sugerida por McRae & Kavanagh (2011) como una métrica para la calidad del corredor. Los valores altos para la relación entre CWD/distancia euclidiana señala altos costos de movimiento a lo largo del camino de menor costo y valores bajos indican una alta calidad para la conectividad (Cannas et al., 2018).

$$\text{Calidad del corredor} = \frac{CWD}{\text{Distancia euclidiana}}$$

## 2.3 Identificación de los espacios verdes prioritarios para conservar y restaurar.

Las áreas prioritarias para mantener y mejorar la conectividad de la infraestructura verde de Santiago se identificaron a partir de la aplicación de las herramientas de Linkage Mapper y métrica de paisaje. Las áreas prioritarias para la conservación de la conectividad se obtienen a partir de los núcleos de mayor importancia y los cuellos de botella y las áreas prioritarias para la restauración por la identificación de las barreras.

### 2.3.1 Núcleos de mayor importancia

Se utilizaron métrica de paisaje y centrality (centralidad del flujo) de la herramienta de Linkage Mapper para identificar los núcleos de mayor importancia para las conexiones estructurales y funcionales para la conectividad del paisaje en su conjunto a partir de los núcleos identificados en el MSPA.

El índice es una métrica de paisaje que señala la probabilidad de conectividad. El PC se define como la probabilidad de que dos puntos puestos aleatoriamente dentro del paisaje caigan en áreas de hábitat alcanzables entre sí, evalúa directamente las probabilidades de dispersión entre todos los pares de núcleos presentes (Liu, Z. et al., 2020). Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij}^* \times a_i \times a_j}{A_L^2}$$

Donde  $n$  representa la cantidad de parches;  $a_i$  y  $a_j$  hacen referencia a las áreas de los parches  $i$  y  $j$ ;  $A_L$  representa el área total;  $p_{ij}^*$  representa la máxima posibilidad de migración de especies o flujos ecológicos entre los parches  $i$  y  $j$  (Liu, Z. et al., 2020).

A partir del cálculo del índice  $PC$  se obtiene el índice  $dPC$ , la probabilidad de pérdida de valor del índice de conectividad, índice útil para la priorización de los elementos del paisaje con el cual es posible cuantificar la variación relativa de la conectividad global en caso de que falte un parche concreto permitiendo identificar la contribución de cada núcleo en término de su importancia para mantener la conectividad global de la red de infraestructura verde (Organismo Autónomo Parques Nacionales, 2020). Esta métrica se calcula según la siguiente ecuación:

$$dPC = \frac{PC - PC'}{PC} \times 100\%$$

$dPC$  cuantifica la importancia de un núcleo concreto para mantener el  $PC$  en la red de corredores.  $PC'$  representa el valor del  $PC$  después de la eliminación del área del parche del

paisaje. A mayor valor en el índice *dPC* mayor es la importancia del núcleo para la conectividad estructural del paisaje y viceversa (Liu, Z. et al., 2020).

El cálculo del índice *dPC* se obtiene por la herramienta Conefor Inputs en ArcGIS 10.8.

Centrality Mapper de la herramienta Linkage Mapper analiza la centralidad del flujo a partir de la inyección de corriente a la red de rutas de mínimo costo generadas anteriormente para identificar los núcleos y corredores de mayor importancia generados por Linkage Mapper para mantener la conectividad funcional global del paisaje o para mantener el movimiento entre todos los parches de un paisaje (Dutta et al., 2016; Schuett-Hames et al., 2013).

Así, la centralidad del flujo es una medida de la importancia que posee un núcleo o corredor para mantener la conectividad de la red de infraestructura verde. Los elementos de la red que posean una alta centralidad son prioritarios para la conectividad y su pérdida podría causar la desconexión de la red.

Se definieron los núcleos prioritarios mediante la superposición de ambos métodos. Los núcleos prioritarios para ser conservados se obtuvieron por la selección de los núcleos considerados como “muy importantes” para la conectividad del paisaje. El nivel de importancia de los núcleos se obtuvo a partir de la clasificación de los datos basados en la ruptura natural de Jenks (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Clasificación de la prioridad de los núcleos

| Nivel de importancia del núcleo | Prioridad  |
|---------------------------------|--|
| Muy importantes                 | Área prioritaria para conservar la conectividad actual de la infraestructura verde             |
| Importante                      | Área no prioritaria para la restauración de la conectividad actual de la infraestructura verde |
| Medianamente importantes        |  |
| No importantes                  |  |

Fuente: Elaboración propia (2022).

### 2.3.2 Cuellos de botella

Los cuellos de botella son identificados partir de la herramienta Pinch Point Mapper, incluida en el paquete de Linkage Mapper, en el software ArcGIS 10.8. Para la ejecución de la herramienta se requiere la instalación del software Circuitscape, programa de código abierto que aplica la teoría de circuitos para modelar la conectividad en el paisaje, que utiliza como base los corredores de mínimo costo previamente creados para la elaboración de los mapas de cuellos de botella (McRae, 2012b).

Dentro de los parámetros para la ejecución de la herramienta, se debe asignar el valor de corte CWD, que se refiere a la anchura que deben tener los corredores según las distancias ponderadas por el costo. La herramienta no utiliza distancia euclidiana para la definición de los anchos de los corredores, puesto que utiliza el ráster de distancias ponderadas por el costo generado en el Linkage Mapper (McRae, 2012b).

Dentro de la herramienta Pinch Point Mapper existen tres métodos para identificar los cuellos de botella (también llamados puntos de pellizcos y puntos de pinzamiento) dentro de los corredores de menor costo creados por Linkage Mapper. El método “todos los pares” calcula la intensidad de corriente del corredor entre todos los nodos, este método requiere muchos cálculos y tiene una limitada cantidad de nodos que puede procesar (Shi et al., 2021). El método “pares adyacentes” calcula la intensidad de corriente entre dos nodos adyacentes, encuentra los puntos de pellizcos entre todos los pares de nodo, por lo que valora la conectividad solamente entre nodos y no la conectividad global del paisaje (Shi & Qin, 2018).

El último método y el cual finalmente se escogió para esta memoria es el modelo “todo a uno”, se considera como el método que calcula los cuellos de botella para mantener la conectividad de todo el paisaje, calcula la intensidad de corriente entre una zona central y todas las demás zonas centrales (Shi & Qin, 2018). En este método se obtiene el valor de la corriente acumulada en cada celda ráster, se conecta un parche a tierra y a los otros parches se les introduce una corriente de 1 amperio para calcular el valor de la corriente de los nodos, repite el proceso por cada nodo del paisaje analizado (McRae, 2012b).

Se clasificaron los cuellos de botella en tres niveles (ver Tabla 2) según la ruptura natural de Jenks debido a que para cada escenario la densidad de corriente difiere, por lo que no se puede establecer un parámetro general para los cuatro escenarios modelados.

**Tabla 2.** Clasificación de la prioridad de los cuellos de botella.

| Nivel de prioridad del cuellos de botella | Prioridad  |
|---|--|
| Alto                                      | Área prioritaria para la conservación de la conectividad actual de la infraestructura verde    |
| Medio                                     |  |
| Bajo                                      | Área no prioritaria para la conservación de la conectividad actual de la infraestructura verde |

Fuente: Elaboración propia (2022).

### 2.3.3 Barreras

Las barreras constituyen elementos del paisaje que impiden el movimiento entre áreas ecológicamente importantes, cuya eliminación aumentaría el potencial de movimiento entre las áreas (McRae et al., 2012). Las barreras pueden ser completas o parciales (por ejemplo, tipos de coberturas de suelo que dificultan el movimiento en comparación a condiciones ideales pero que aun así tienen valor para la conectividad. Las barreras pueden ser de origen antrópico ya sea como carreteras, zonas urbanas o natural ríos (McRae et al., 2012).

Para identificar las barreras, en este trabajo se utilizó la herramienta Barrier Mapper que entrega un mapa rasterizado con las puntuaciones del impacto de las barreras (también llamadas puntuación de mejora), el método identifica las zonas que más reducen la conectividad entre dos lugares de un paisaje (Sütünç, 2021), es decir, la puntuación de mejora indica la prioridad de la barrera para ser restaurada para mejorar la conectividad del paisaje. El método para calcular la puntuación de mejora de barrera supone que si se restaura una determinada zona la resistencia en ella se reduce, entonces la distancia de menor costo ( $LCD$ ) de la mejor ruta que conecta los parches a través de la zona de restauración también se reducirá (McRae et al., 2012). Donde  $LCD'$  es la distancia de menor costo del mejor camino entre parches que pasan por el píxel focal tras la eliminación de la barrera. Por lo tanto, la métrica para la mejora de la conectividad:

$$\Delta LCD = LCD - LCD'$$

Cuanto mayor sea la puntuación de mejora ( $LCD'$  menor a  $LCD$ ) mayor será la recuperación de la conectividad global si las barreras son eliminadas puesto que la distancia efectiva se reduciría. El radio de búsqueda se refiere a la mitad de la longitud de una franja de tierra que podría restaurarse (McRae, 2012a), por lo que definió como radio de búsqueda 50 m para identificar las barreras, el ancho de algunas áreas verdes de tamaño promedio y carreteras es de aprox. 100 m por lo que se considera como longitud realista de poder restaurar en la escala de una ciudad altamente urbanizada.

Al igual que en el caso de los núcleos de mayor importancia y los cuellos de botella, se clasificó la prioridad de las barreras mediante la ruptura natural de Jenks (ver Tabla 3), donde mayor valor la puntuación de mejora, mayor es la prioridad para restaurar el área para mejorar la conectividad de la IV.

**Tabla 3.** Clasificación de la prioridad de las barreras.

| Nivel de prioridad de la barrera | Prioridad   |
|----------------------------------|---|
| Alto                             | Área prioritaria para la restauración de la conectividad de la infraestructura verde    |
| Medio                            | Área no prioritaria para la restauración de la conectividad de la infraestructura verde |
| Bajo                             |   |

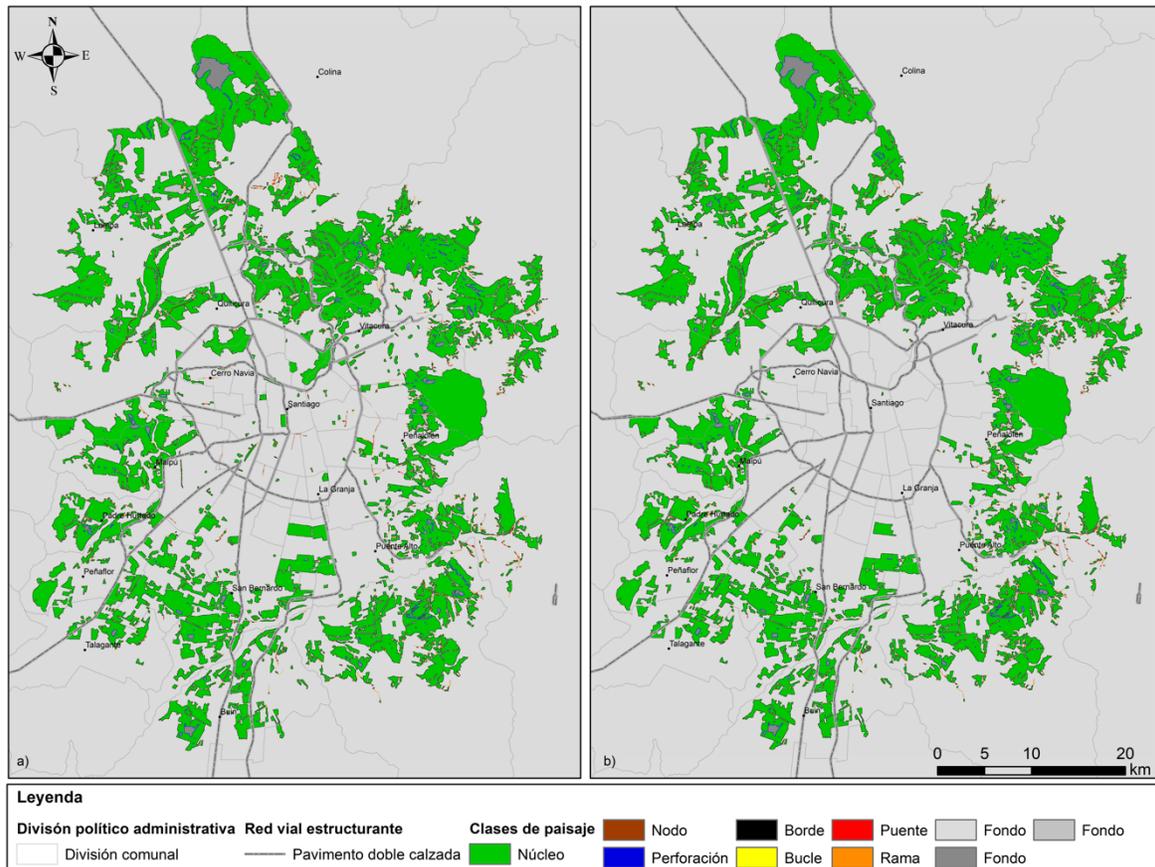
Fuente: Elaboración propia (2022).

## CAPÍTULO 3: RESULTADOS

### 3.1 Identificación de los núcleos a partir de la estructura del paisaje.

A partir de los espacios verdes existentes mapeados en el proyecto Stgo+ Infraestructura Verde se realizó el análisis morfológico de patrones espaciales, obteniendo como resultado las Figura 6 y Figura 7. Se definieron cuatro escenarios para llevar a cabo la modelación de la conectividad de la infraestructura verde del área de estudio. En la primera se consideraron todos los espacios verdes existentes, en el segundo las áreas verdes y los espacios naturales, en la tercera las áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y en la cuarta los espacios naturales en conjunto a los espacios silvoagropecuarios (considerando los criterios de selección mencionados en la metodología).

**Figura 6.** Análisis morfológico de patrones espaciales para los escenarios. A la izquierda todos los espacios verdes y a la derecha espacios naturales y silvoagropecuario.

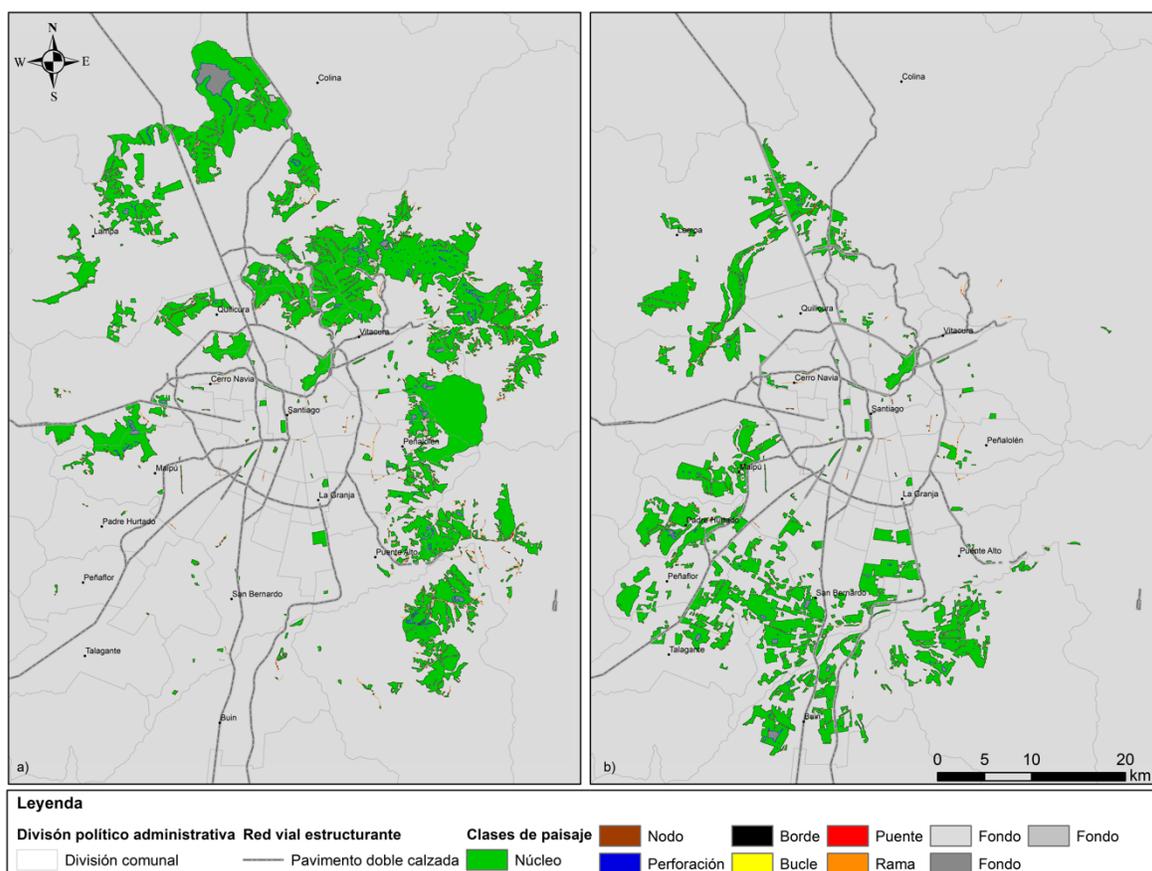


Fuente: elaboración propia (2022).

Existe un marcado patrón en la distribución espacial de los núcleos en el área de estudio según la tipología del espacio verde (ver Figura 6 y Figura 7). En general, los espacios verdes considerados como núcleos en el MSPA se concentran principalmente en el borde urbano de

la ciudad, presentando una distribución fragmentada y dispersa en el área central de la matriz urbana, caracterizada principalmente por presentar núcleos de tipología de áreas verdes. El escenario de áreas verdes y espacios naturales (ver Figura 7.a) se distribuye esencialmente en el sector cordillerano andino y hacia el norte de la ciudad, siendo casi inexistentes hacia el suroeste. En contraposición, los espacios silvoagropecuarios (ver Figura 7.b) se extienden por el sector sur y oeste de la capital, marcando una clara tendencia en los patrones de uso de suelo que se han dado bajo la pauta de la planificación de la ciudad y de las actividades económicas que se desarrollan en el territorio.

**Figura 7.** Análisis morfológico de patrones espaciales para los escenarios. A la izquierda las áreas verdes y espacios naturales y a la derecha las áreas verdes y silvoagropecuario.



Fuente: elaboración propia (2022).

El escenario de áreas verdes y espacios naturales presenta más proporción de núcleos en comparación al resto de los escenarios basado en el MSPA. En el escenario de todos los espacios verdes, 772,84 km<sup>2</sup> constituyen núcleos, lo que representa aprox. 29,37% del área de estudio.

Las áreas verdes de gran tamaño se establecen como los principales núcleos dentro del área urbana consolidada de Santiago que se encuentran dispersos en la matriz urbana, destacando

en cuanto tamaño el Parque Metropolitano (cerro San Cristóbal), La Platina, el Parque O'Higgins, el Parque Padre Hurtado, el Parque Cousiño de Macul, Parque República del Brasil, el Parque Bicentenario, Parque Mahuida de la Reina, Parque Quinta Normal, Parque de Los Reyes, Parque Tres poniente y el Parque Araucano.

Al analizar la Figura 7.b, las comunas de Quinta Normal, Conchalí, Independencia, Recoleta, Providencia, Ñuñoa, Santiago, Lo Prado, Estación Central, Pedro Aguirre Cerda, Cerrillos, San Miguel, San Joaquín, Macul, Lo Espejo, La Cisterna, La Granja, San Ramón y El Bosque prácticamente no existen espacios naturales considerados como núcleos salvo por la excepción de algunos cerros islas como Renca, Santa Lucía, Calan, Apoquindo, igualmente, la presencia de espacios silvoagropecuarios es inexistente.

Los núcleos finales fueron seleccionados a partir de una superficie mínima de 4 hectáreas para el procesamiento del modelamiento de corredores. Los polígonos seleccionados se redujeron ampliamente, no obstante, representan un alto porcentaje de los núcleos iniciales (ver Anexo 2).

**Tabla 4.** Clasificación del paisaje basada en el MSPA por escenario.

| Clase de paisaje   | Todos los espacios         |      | Áreas verdes y espacios naturales |      | Áreas verdes y espacios silvoagropecuarios |      | Espacios naturales y espacios silvoagropecuarios |      |
|--------------------|----------------------------|------|-----------------------------------|------|--|------|--|------|
|                    | Superficie km <sup>2</sup> | %    | Superficie km <sup>2</sup>        | %    | Superficie km <sup>2</sup>                 | %    | Superficie km <sup>2</sup>                       | %    |
| <b>Núcleo</b>      | 772,84                     | 82,3 | 488,33                            | 83,3 | 282,50                                     | 80   | 750,04   | 82,9 |
| <b>Perforación</b> | 8,57                       | 0,9  | 6,39                              | 1,1  | 1,67                                       | 0,5  | 8,44   | 0,9  |
| <b>Bucle</b>       | 1,64                       | 0,2  | 1,00                              | 0,2  | 0,55                                       | 0,2  | 1,45   | 0,2  |
| <b>Puente</b>      | 4,69                       | 0,5  | 3,04                              | 0,5  | 1,35                                       | 0,4  | 3,98   | 0,4  |
| <b>Nodo</b>        | 1,48                       | 0,2  | 1,40                              | 0,2  | 0,99                                       | 0,3  | 0,65   | 0,1  |
| <b>Borde</b>       | 138,97                     | 14,8 | 79,02                             | 13,5 | 61,97                                      | 17,6 | 131,20   | 14,5 |
| <b>Rama</b>        | 10,68                      | 1,1  | 7,30                              | 1,2  | 3,97                                       | 1,1  | 9,42   | 1    |
| <b>Total</b>       | 938,86                     | 100  | 586,48                            | 100  | 353,00                                     | 100  | 905,17   | 100  |

Fuente: elaboración propia (2022).

### 3.2 Modelamiento de corredores de menor costo

En el escenario que contempla todos los espacios verdes de la IV existen 1.197 corredores con una extensión total de 1.252,03 km. En promedio, estos corredores de menor costo tienen una longitud de 1,05 km.

A pesar de que se generaron múltiples corredores de menor costo por toda la extensión del paisaje del Gran Santiago (ver Figura 8), la mayoría de los corredores son categorizados como de baja calidad según la métrica basada en la relación entre el costo de la distancia ponderada y la distancia euclidiana del corredor de menor costo, mientras mayor el valor de la relación, más difícil es para los individuos atravesar el camino en comparación con el camino de menor costo óptimo que posea un valor menor. Los corredores de mejor calidad se reducen a un total de 633, que representan el 34,4% de la extensión total inicial de las rutas, promediando los corredores una longitud de 0,44 km.

En general, los corredores de menor costo categorizados como de mejor calidad corresponden aproximadamente el 50% de los corredores de menor costo total modelados, no obstante, la longitud de estos representan menos del 42,24% de la longitud total de los corredores de menor costo modelados.

Los mejores corredores de menor costo se caracterizan por extenderse en los márgenes de la ciudad, en donde predominan los espacios verdes de tipología naturales y silvoagropecuarios. Dentro de la ciudad como corredor destaca solamente uno que se ubica en el sector oriente que corresponde al parque lineal Tobalaba, extendiéndose a las orillas del canal San Carlos, uniendo parches centrales urbanos de gran extensión como el Parque Padre Hurtado con el Club de golf Príncipe de Gales con el parche silvoagropecuario de la Viña Cousiño y hacia el sur con Parque Quebrada de Macul.

En el caso de la modelación de corredores de mínimo costo para los otros escenarios, se obtuvieron una cantidad de 1.034 corredores con una extensión total de 920,94 km para los espacios naturales y espacios silvoagropecuarios; 737 corredores que abarcaron en total 1.312,21 km para las áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y 467 corredores con 1.060,33 km de extensión para las áreas verdes y espacios naturales.

Los corredores de mejor calidad también se ubicaron en los márgenes urbanos de la ciudad donde solo el escenario de áreas verdes y espacios silvoagropecuarios presenta un corredor de menor costo dentro de la mancha urbana que une el parque Padre Hurtado a la viña Cousiño por los bandejones de Av. Tobalaba. Es el escenario que presentan el mayor porcentaje de corredores de mejor calidad con respecto a los corredores iniciales, no obstante, se debe a que se generaron múltiples corredores para conectar un pequeño parche en la Cordillera de Los Andes.

A pesar de que los espacios naturales son la tipología de espacios verdes con mayor cantidad de núcleos para conectar en el paisaje metropolitano, los corredores de menor costo en el escenario de las áreas verdes y espacios naturales son los que presentan mayor cantidad de corredores evaluados como de baja calidad según la métrica CWD/distancia euclidiana (ver Tabla 5), siendo los catalogados como mejores corredores los que se concentran en la zona montañosa del borde cordillerano andino y algunos en el sector noreste.

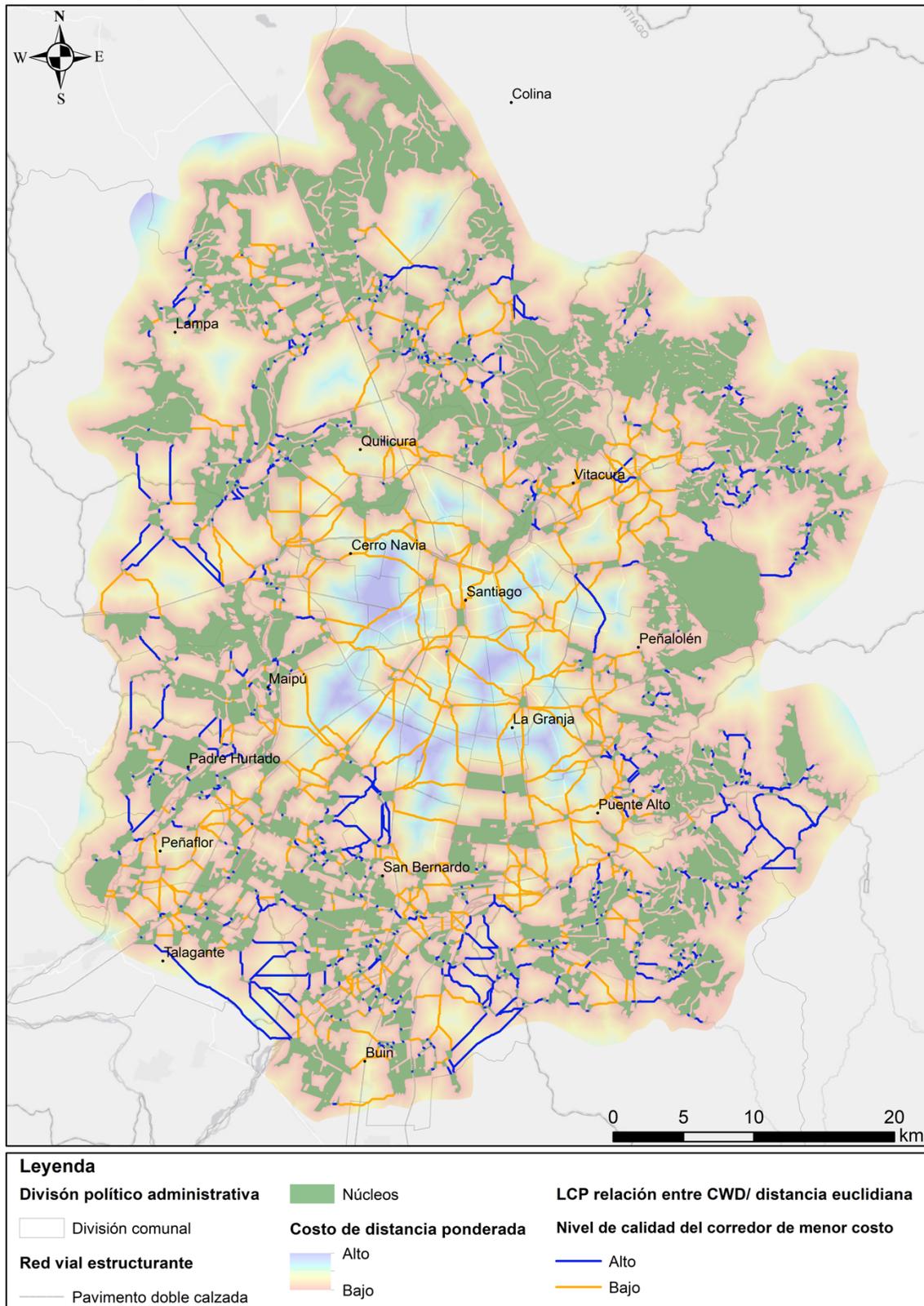
**Tabla 5.** Descripción de corredores de menor costo (LCP) de mejor calidad (CWD/LPC) por escenario.

| <b>Escenarios</b>                                       | <b>Nº de corredores</b> | <b>Longitud del LCP (km)</b> | <b>Longitud promedio de LCP (km)</b> | <b>% de corredores de mejor calidad con respecto a los corredores de menor costo total según cantidad</b> | <b>% corredores de mejor calidad con relación a los corredores de menor costo total según longitud</b> |
|---|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| <b>Todos los espacios verdes</b>                        | 696                     | 430,69                       | 0,62                                 | 58,15   | 34,4   |
| <b>Áreas verdes y espacios silvoagropecuarios</b>       | 428                     | 554,25                       | 1,29                                 | 58,07   | 42,24  |
| <b>Áreas verdes y espacios naturales</b>                | 221                     | 101,6                        | 0,46                                 | 47,32   | 9,58   |
| <b>Espacios naturales y espacios silvoagropecuarios</b> | 517                     | 214,04                       | 0,41                                 | 50  | 23,24  |

Fuente: elaboración propia (2022).

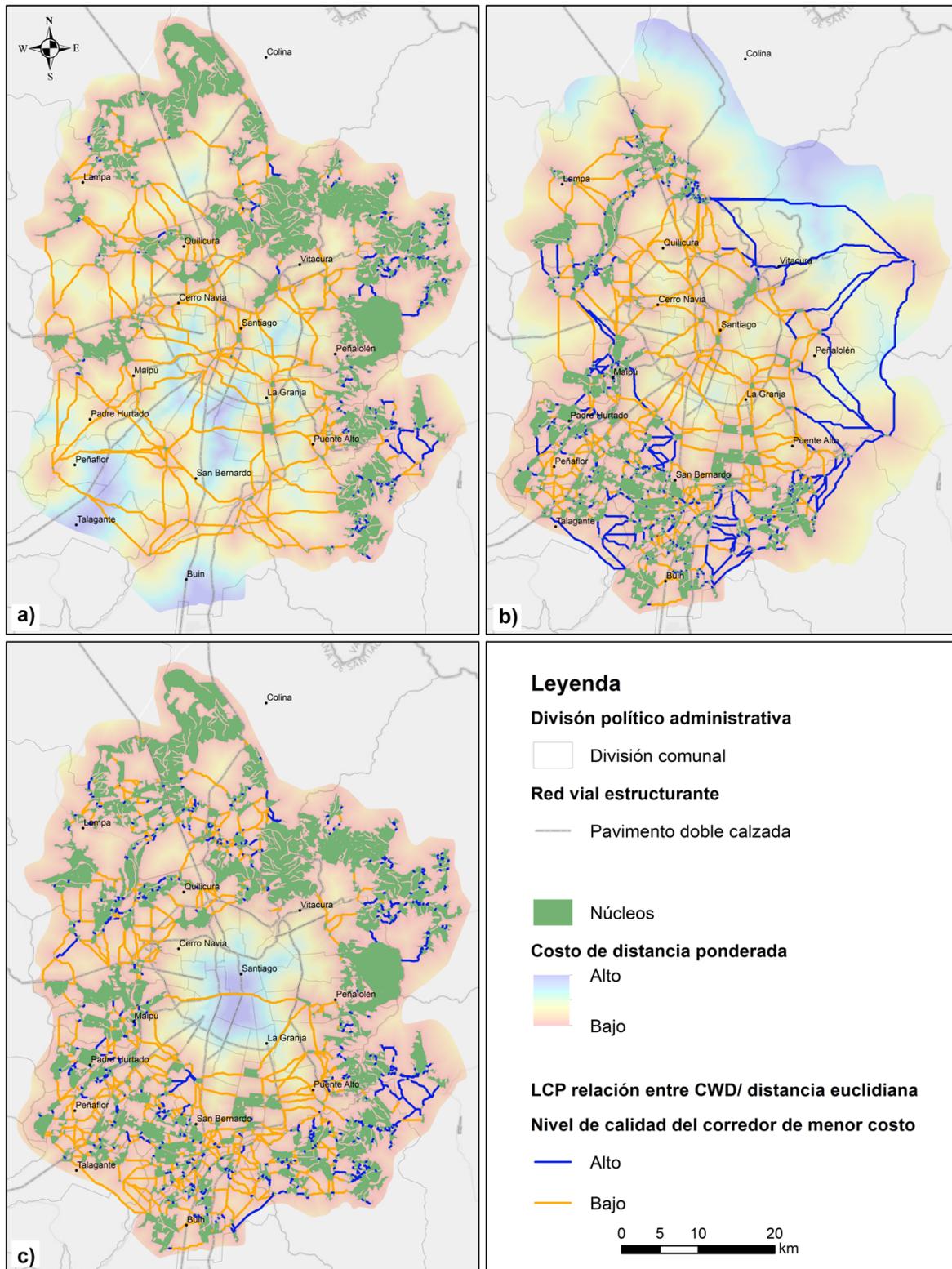
En el escenario de los espacios naturales y silvoagropecuarios, los corredores se concentran en los bordes urbanos, teniendo muy pocos corredores que cruzan la ciudad y ninguno es de buena calidad, salvo un pequeño corredor de 0,83 km que une a la Viña Cousiño con otro parche silvoagropecuario de Av. Quilín sur. De los corredores que destacan dentro de la marcha urbana está el que atraviesa todo Santiago desde oeste a este desde un parche central de tipología silvoagropecuario cercano al Cementerio Parque el Manantial de Maipú hasta a la Viña Cousiño con 18,75 km de longitud. Y el segundo de 11,2 km que también va a la Viña Cousiño hasta el Campus Antumapu de Universidad de Chile.

**Figura 8.** Corredores de menor costo y costo de la distancia ponderada (CWD) en escenario de todos los espacios verdes de la IV.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 9.** Corredores de menor costo y costo de la distancia ponderada (CWD) en a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuario y c) espacios naturales y silvoagropecuario.



Fuente: elaboración propia (2022).

### **3.3 Puntos prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad del sistema de infraestructura verde**

#### *3.3.1 Núcleos de mayor importancia*

Los núcleos de mayor importancia según el índice dPC (ver Tabla 6) para el escenario que contempla todos los espacios verdes de la IV se distribuyen esencialmente en sector sur, seguido por el sector este de la capital (ver Figura 10.a). Los núcleos de mayor importancia se caracterizan por ser de la tipología de espacios naturales ubicados en los límites de Puente Alto, San José de Maipo y Pirque, de la tipología silvoagropecuarias en Calera de Tango, y de la tipología de áreas verdes que posee los núcleos de menor importancia para la conectividad. Esta dinámica se repite en los demás escenarios, salvo en el escenario de áreas verdes y espacios silvoagropecuarias (ver Figura 10.d) debido a que estos núcleos, per se, se concentran en el sector sur. Al comparar el primer escenario de la Figura 10.a y el escenario de Figura 10.b, el patrón de distribución de los parches centrales de mayor importancia es muy similar, siendo completamente irrelevantes y careciendo de importancia las áreas verdes para la conectividad estructural de Santiago.

Cabe recalcar que estos núcleos de mayor importancia para la conectividad estructural del paisaje, la forma y el tamaño de los fragmentos tienen una incidencia significativa en la manera en que se evalúa los fragmentos de mayor importancia para las conexiones.

Por otra parte, existen algunas diferencias entre los núcleos de mayor importancia para la conectividad estructural y funcional del área de estudio (ver Tabla 6 y Tabla 7). Basado en la centralidad del flujo de corriente (ver Figura 11), hay una mayor cantidad de núcleos considerados como muy importantes e importantes para las conexiones en general en todos los escenarios contemplados con respecto al índice dPC. En el caso del escenario de todos los espacios verdes de la IV, los núcleos de mayor importancia según la centralidad del flujo se distribuyen a lo largo del anillo del borde urbano de Santiago, a diferencia del índice dPC que lo hace principalmente en el sector oriente y suroriental y algunos núcleos localizados al suroeste.

Entre los 20 núcleos de mayor importancia de ambos métodos son congruentes, destacando principalmente los núcleos 345, 268, 149, 401, 139, 477 en el este y los núcleos 435 y 460 por el suroeste para el escenario de todos los espacios verdes de la IV. El escenario de áreas verdes y espacios naturales presentan el mayor porcentaje de núcleos de mayor importancia coincidentes entre ambos métodos y el que presentan menores coincidencias es el de áreas verdes y silvoagropecuarias.

**Tabla 6.** Núcleos de mayor importancia según índice dPC.

| Nº        | Todos los espacios verdes de la IV |       | Áreas verdes y espacios naturales |       | Áreas verdes y silvoagropecuarios |       | Espacios naturales y silvoagropecuarios |       |
|-----------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---|-------|
|           | Núcleo                             | dPC   | Núcleo                            | dPC   | Núcleo                            | dPC   | Núcleo                                  | dPC   |
| <b>1</b>  | 477                                | 12,35 | 139                               | 10,08 | 435                               | 14,47 | 477                                     | 12,73 |
| <b>2</b>  | 435                                | 9,92  | 345                               | 22,86 | 553                               | 9,46  | 435                                     | 9,18  |
| <b>3</b>  | 345                                | 9,27  | 268                               | 21,82 | 529                               | 7,93  | 401                                     | 8,96  |
| <b>4</b>  | 401                                | 9,04  | 401                               | 15,86 | 556                               | 6,39  | 345                                     | 8,75  |
| <b>5</b>  | 529                                | 5,30  | 477                               | 10,87 | 568                               | 5,46  | 529                                     | 5,97  |
| <b>6</b>  | 553                                | 5,29  | 149                               | 10,83 | 443                               | 5,42  | 553                                     | 5,83  |
| <b>7</b>  | 268                                | 5,27  | 489                               | 7,22  | 460                               | 4,63  | 268                                     | 4,45  |
| <b>8</b>  | 443                                | 4,32  | 190                               | 6,96  | 499                               | 4,59  | 556                                     | 3,89  |
| <b>9</b>  | 469                                | 3,79  | 544                               | 6,49  | 497                               | 4,45  | 497                                     | 3,67  |
| <b>10</b> | 149                                | 3,57  | 281                               | 4,09  | 481                               | 4,05  | 568                                     | 3,24  |
| <b>11</b> | 556                                | 3,51  | 287                               | 4,06  | 554                               | 3,99  | 492                                     | 3,22  |
| <b>12</b> | 497                                | 3,30  | 459                               | 3,98  | 492                               | 3,93  | 443                                     | 3,22  |
| <b>13</b> | 353                                | 3,14  | 143                               | 3,95  | 566                               | 3,62  | 469                                     | 3,20  |
| <b>14</b> | 492                                | 2,94  | 291                               | 3,86  | 469                               | 3,61  | 489                                     | 3,08  |
| <b>15</b> | 460                                | 2,91  | 309                               | 3,78  | 436                               | 3,52  | 353                                     | 3,05  |
| <b>16</b> | 568                                | 2,91  | 314                               | 3,45  | 520                               | 3,52  | 149                                     | 3,05  |
| <b>17</b> | 489                                | 2,86  | 192                               | 3,23  | 498                               | 3,21  | 460                                     | 2,91  |
| <b>18</b> | 461                                | 2,63  | 142                               | 3,09  | 511                               | 3,06  | 461                                     | 2,68  |
| <b>19</b> | 139                                | 2,63  | 433                               | 3,08  | 539                               | 2,97  | 520                                     | 2,65  |
| <b>20</b> | 499                                | 2,54  | 411                               | 2,99  | 494                               | 2,83  | 499                                     | 2,63  |

Fuente: elaboración propia (2022).

En el caso del índice dPC no es posible encontrar un núcleo de mayor importancia que sea relevante para todos los escenarios examinados, en cambio, para la centralidad del flujo, el núcleo 29 y el 435 aparece como importante para todos los escenarios. Inclusive el núcleo 29 es considerado como no importante para el índice dPC siendo uno de los núcleos de mayor importancia para la centralidad del flujo.

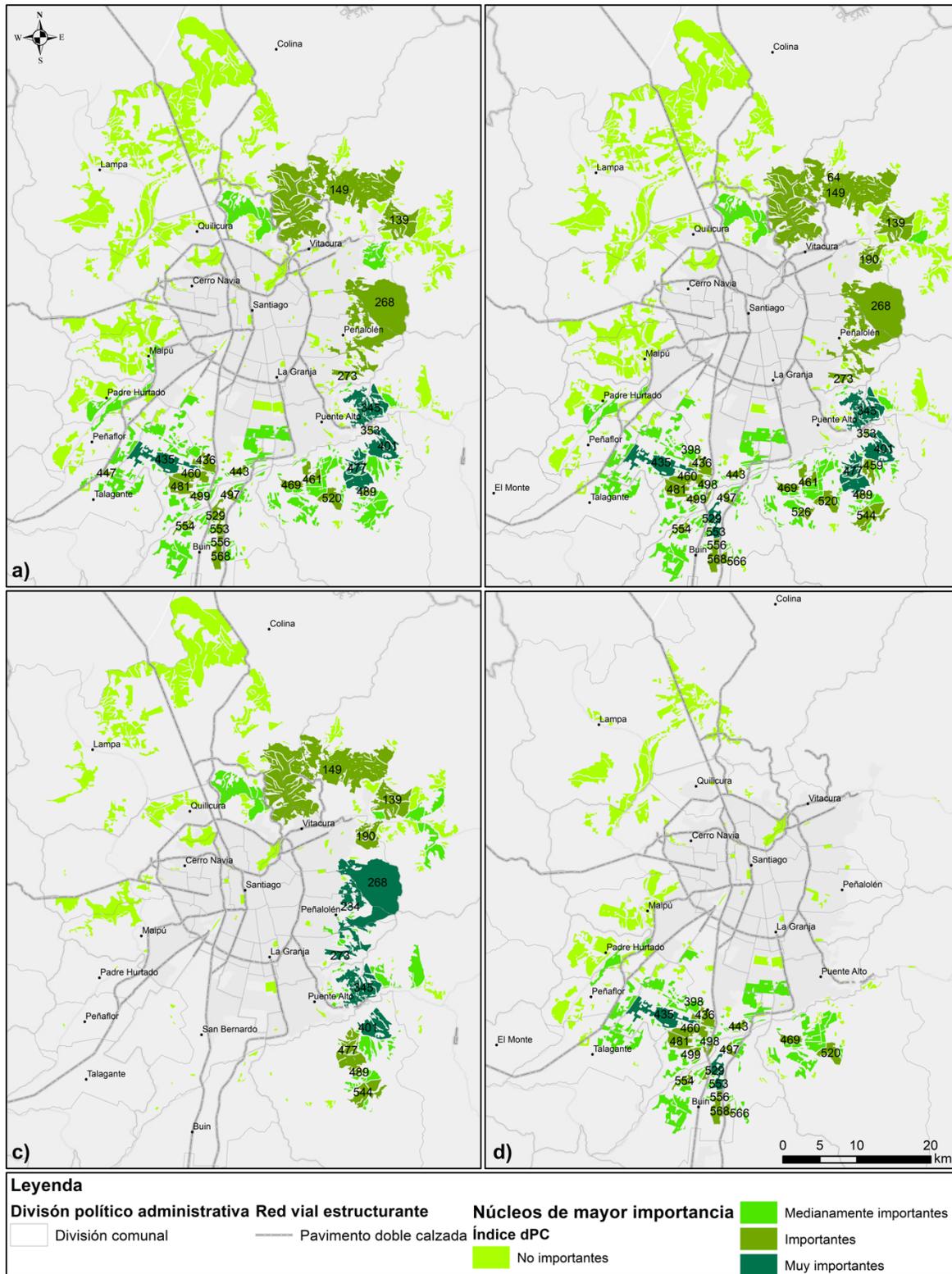
Las áreas verdes presentes en el tejido urbano toman una mayor relevancia para la conectividad funcional que la conectividad estructural, lo que se puede deber a que a pesar de sus tamaños reducidos y los efectos bordes que genera sus formas altamente antropizadas es que son fragmentos de paso a los núcleos de mayor importancia para hábitats convirtiéndose esenciales para la migración y el movimiento de individuos, la no existencia de estos espacios verdes se traduciría en una red de infraestructura verde completamente desconectada dentro del eje urbano.

**Tabla 7.** Núcleos de mayor importancia según centralidad del flujo.

| Nº        | Todos los espacios verdes de la IV |       | Áreas verdes y espacios naturales |       | Áreas verdes y silvoagropecuarios |       | Espacios naturales y silvoagropecuarios |       |
|-----------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---|-------|
|           | Núcleo                             | CF    | Núcleo                            | CF    | Núcleo                            | CF    | Núcleo                                  | CF    |
| <b>1</b>  | 149                                | 63425 | 149                               | 15170 | 435                               | 16869 | 149                                     | 47337 |
| <b>2</b>  | 268                                | 51759 | 268                               | 14661 | 436                               | 13976 | 268                                     | 43558 |
| <b>3</b>  | 139                                | 45470 | 139                               | 13449 | 134                               | 12949 | 139                                     | 43033 |
| <b>4</b>  | 345                                | 45406 | 345                               | 12229 | 240                               | 12197 | 345                                     | 39442 |
| <b>5</b>  | 273                                | 45085 | 291                               | 10191 | 193                               | 12132 | 273                                     | 38980 |
| <b>6</b>  | 477                                | 42952 | 287                               | 9962  | 460                               | 11457 | 477                                     | 38100 |
| <b>7</b>  | 401                                | 38785 | 281                               | 9789  | 246                               | 11104 | 401                                     | 34568 |
| <b>8</b>  | 435                                | 35921 | 190                               | 9658  | 351                               | 10658 | 190                                     | 32099 |
| <b>9</b>  | 291                                | 35810 | 142                               | 8935  | 150                               | 10571 | 291                                     | 31880 |
| <b>10</b> | 143                                | 35633 | 401                               | 7755  | 296                               | 10397 | 287                                     | 31683 |
| <b>11</b> | 281                                | 35069 | 143                               | 7154  | 29                                | 9562  | 281                                     | 31002 |
| <b>12</b> | 190                                | 33433 | 477                               | 6786  | 399                               | 9121  | 143                                     | 30466 |
| <b>13</b> | 287                                | 33381 | 138                               | 6087  | 481                               | 9118  | 435                                     | 30361 |
| <b>14</b> | 247                                | 33002 | 309                               | 5831  | 34                                | 8885  | 134                                     | 29528 |
| <b>15</b> | 134                                | 32092 | 160                               | 5278  | 67                                | 8843  | 247                                     | 28657 |
| <b>16</b> | 29                                 | 31302 | 192                               | 4950  | 269                               | 8756  | 29                                      | 27227 |
| <b>17</b> | 459                                | 29595 | 314                               | 4716  | 497                               | 8750  | 459                                     | 26410 |
| <b>18</b> | 436                                | 27731 | 29                                | 4707  | 356                               | 8593  | 436                                     | 23576 |
| <b>19</b> | 460                                | 25393 | 163                               | 4690  | 463                               | 8418  | 142                                     | 23310 |
| <b>20</b> | 142                                | 24935 | 489                               | 4621  | 529                               | 8045  | 460                                     | 22061 |

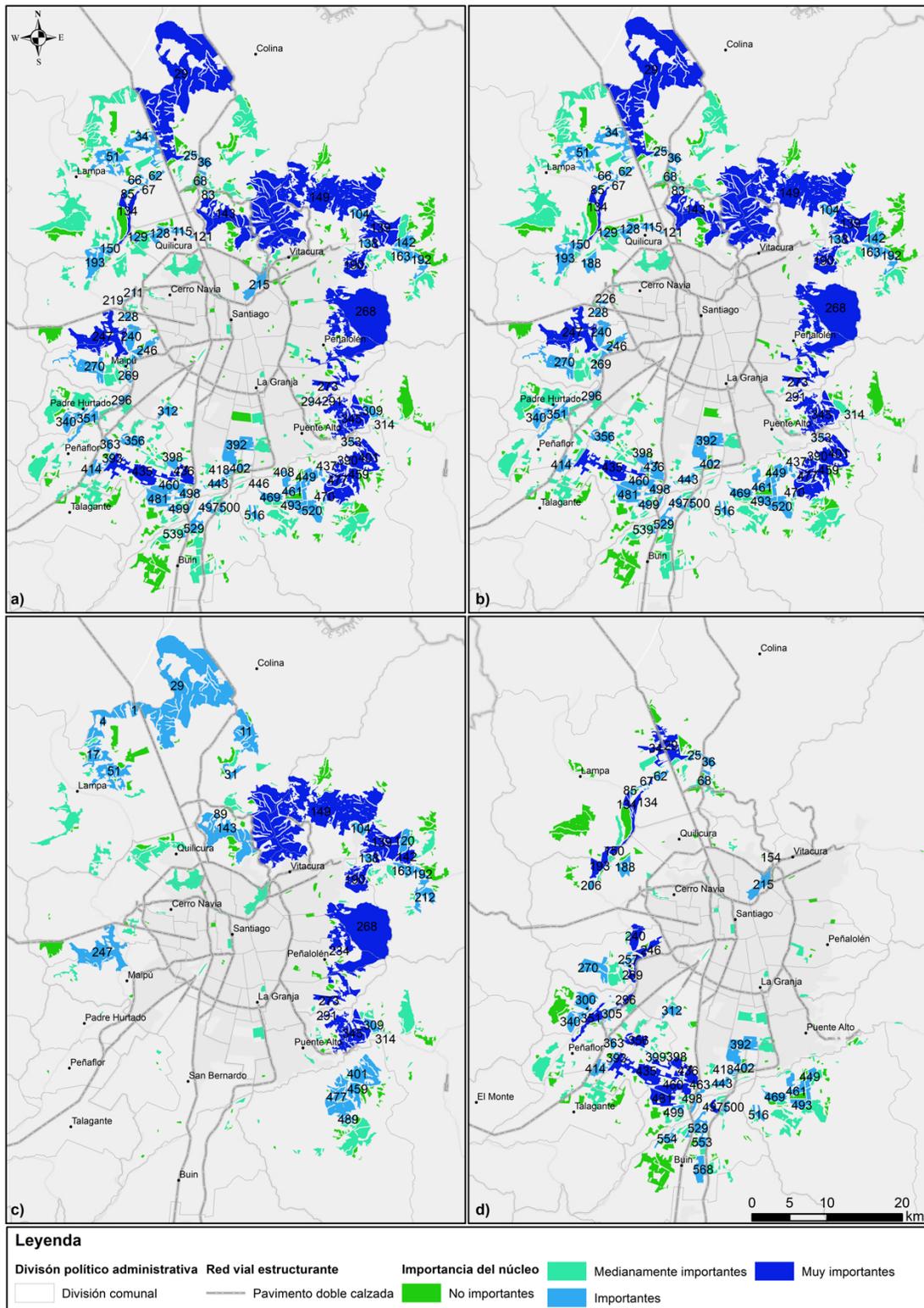
Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 10.** Núcleos de mayor importancia según el índice de probabilidad de Conectividad (dPC). a) todos los espacios verdes de la IV; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios; c) áreas verdes y espacios naturales y d) espacios naturales y silvoagropecuario.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 11.** Núcleos de mayor importancia según centralidad de Linkage Mapper. a) todos los espacios verdes de la IV; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios; c) áreas verdes y espacios naturales y d) espacios naturales y silvoagropecuario.



Fuente: elaboración propia (2022).

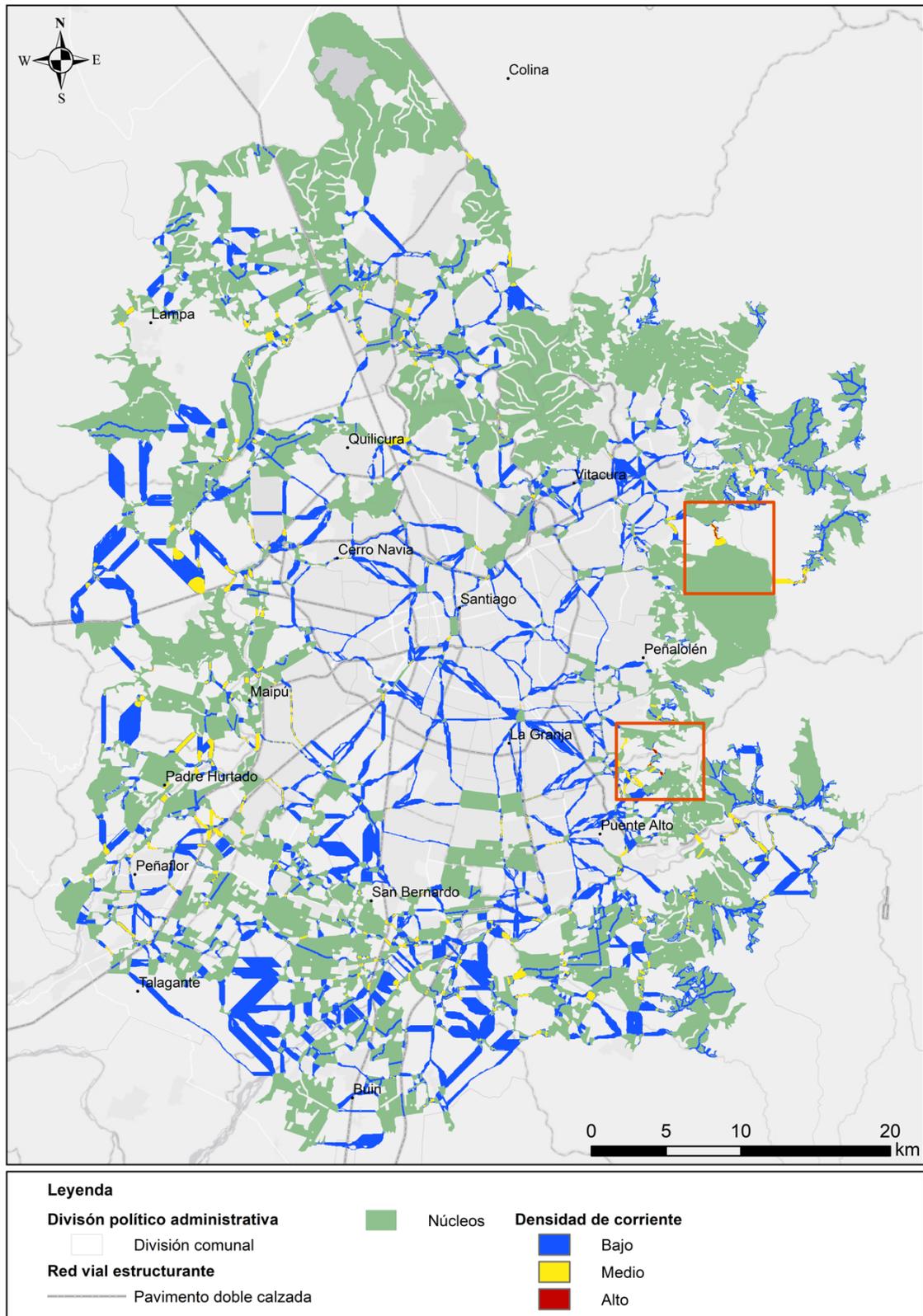
### 3.3.2 *Cuellos de botella*

El análisis de los puntos de pellizcos inicialmente se hizo para diferentes anchos del corredor (ver Anexo 4). Para fijar el ancho del corredor se experimentaron con diferentes anchos debido a que no existe una regla consistente en los estudios para determinar el ancho requerido para las necesidades de conectividad de un determinado paisaje (Gou et al., 2022; Xu, J. et al., 2022).

En el ejercicio de la variación del ancho de corredor no modificó la localización de los cuellos de botella a lo largo del paisaje, aunque si afecto a la superficie por lo que se decidió finalmente establecer para todos los escenarios de modelación un ancho de corte de 10 km, puesto que desde este corte del corredor se estableció como el máximo ancho posible, debido a que un ancho mayor del corredor la superficie de los cuellos se volvió constante (ver Anexo 4,) además, como señala Shi X. et al. (2021) a un mayor ancho hay más posibilidades de movimiento de individuos entre los núcleos aunque no una mejora significativa en la conectividad del paisaje.

Los cuatro escenarios modelados presentan una cantidad reducida de cuellos de botella y una baja densidad de corriente a lo largo de la ciudad, lo que implica que la conectividad funcional general del paisaje es deficiente (Liu, Z. et al., 2020). En el caso del escenario de todos los espacios verdes de la IV (ver Figura 12), los puntos de pellizcos de alta importancia para la conectividad solo cuentan con una superficie total de 0,3 km<sup>2</sup> aprox. en todo el paisaje y se distribuyen principalmente en el sector oriente, en específico en el piedemonte andino, el 92% se encuentran fuera del límite urbano definido en el Plan Regular Metropolitano de Santiago (PRMS) y el 95,6% de la superficie de los cuellos de botella corresponden a la tipología de espacios naturales y el 4,4% a espacios silvoagropecuarios. La mayoría de estos espacios verdes fueron predominantemente espacios naturales, que se distribuyen en Pirque (ver Anexo 8, Anexo 9) y en San José de Maipo (ver Anexo 10), otros más pequeños y en menor medida silvoagropecuarios (ver Anexo 7) en el sector noroeste como Lampa. Destacan particularmente dos cuellos de botella en la cordillera de Los Andes, el Parque Natural San Carlos de Apoquindo (ver Anexo 6) y el Bosque Panul (ver Anexo 5).

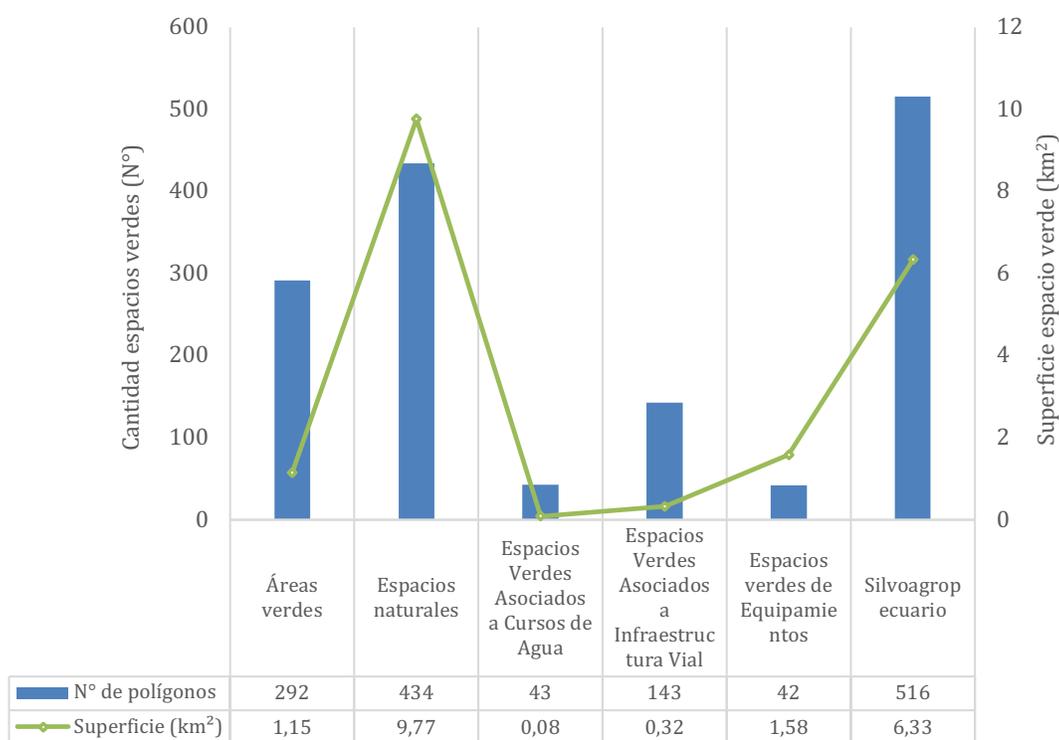
**Figura 12.** Análisis de cuellos de botella (Pinch Point) en escenario de todos los espacios verdes de la IV.



Fuente: elaboración propia (2022).

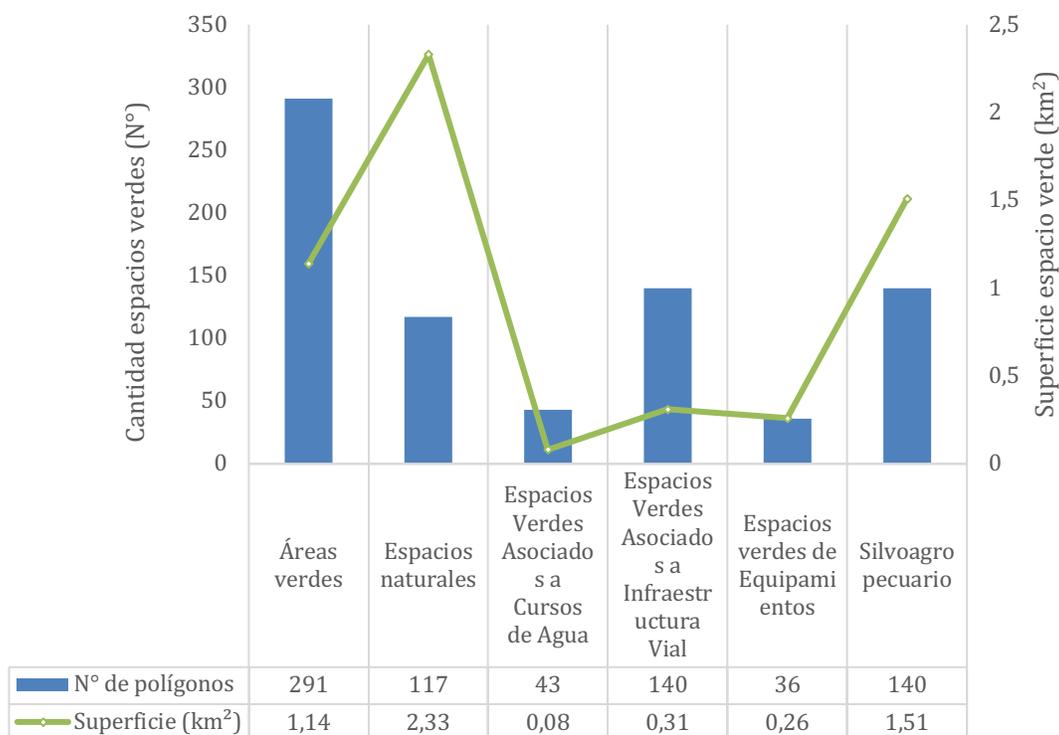
En el caso de los puntos de pellizcos de importancia media para la conectividad se encontraron múltiples pero con superficies pequeñas repartidas por toda el área de estudio. En el escenario de todos los espacios verdes de la IV, la extensión de los cuellos de botella medios abarcó 28,65 km<sup>2</sup>. De estos cuellos de botella, 1.470 correspondieron a espacios verdes mapeados de la infraestructura verde de Stgo+ Infraestructura Verde cubriendo una extensión de 19,23 km<sup>2</sup>, predominando los espacios silvoagropecuarios y espacios naturales como se puede ver en la Figura 13. Dentro de los límites urbanos definidos por el PRMS, las áreas verdes predominan seguido de los espacios verdes asociados a infraestructura vial y silvoagropecuarios, no obstante, las tipologías con mayor superficie son espacios naturales y silvoagropecuarios (ver Figura 14). Los cuellos de botella de tipología de áreas verdes dentro de los límites del PRMS son relevantes con respecto a la abundancia de su presencia, sin embargo, el aporte de superficie es mínima.

**Figura 13.** Cuellos de botella medios según tipología de infraestructura verde de STGO+ Infraestructura Verde en escenario de todos los espacios verdes de la IV.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 14.** Cuellos de botella medios según tipología de infraestructura verde de Stgo+ Infraestructura Verde del límite urbano PRMS.

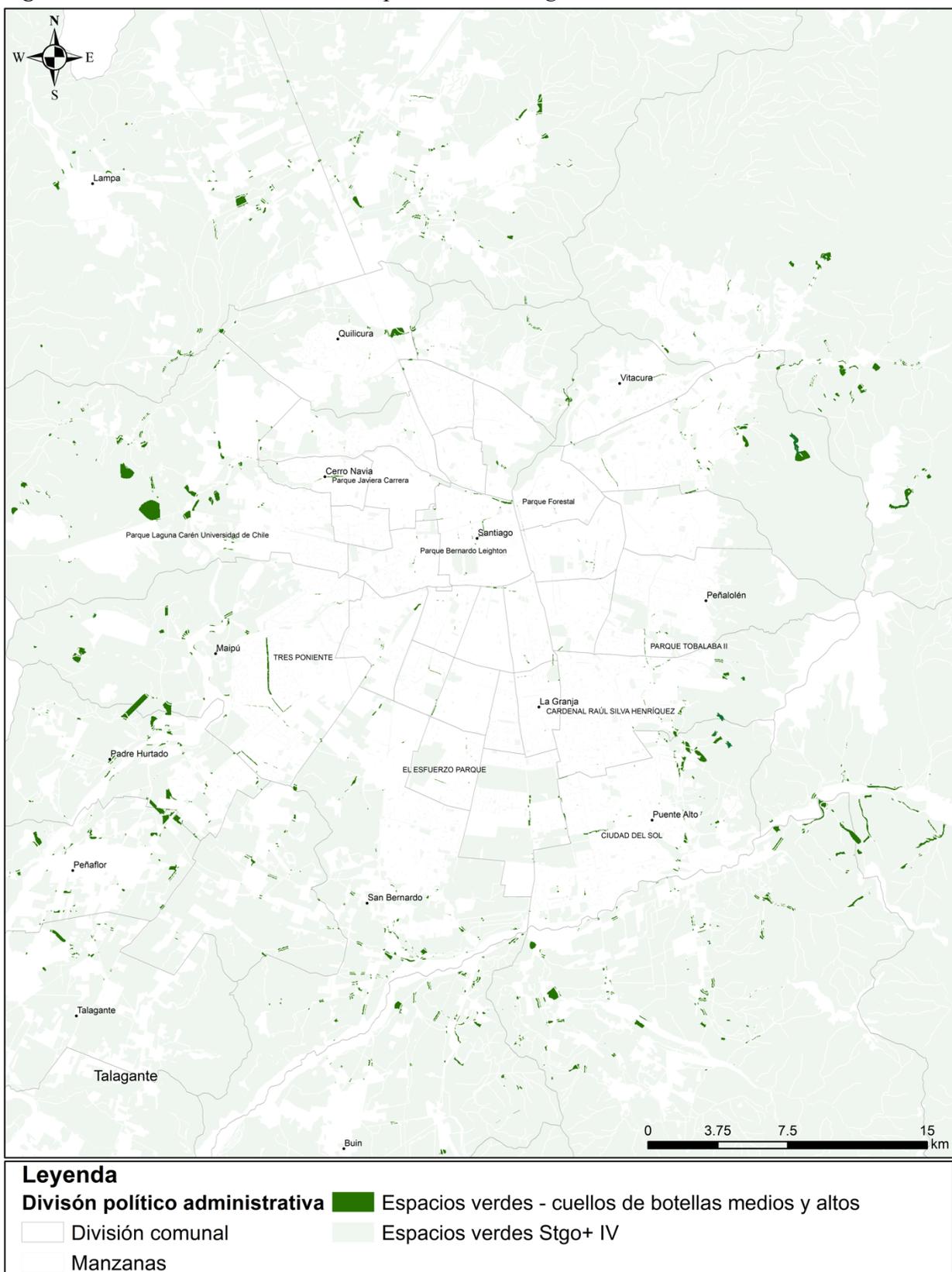


Fuente: elaboración propia (2022).

Las áreas prioritarias para la conservación proporcionadas por el análisis de cuellos de botella (ver Figura 15), se encuentran principalmente en los márgenes de la ciudad, insertos en los espacios naturales por el sector oriente y en los espacios silvoagropecuarios en el sector poniente. La pérdida de estas áreas compromete la conectividad global, por lo que tener especial atención y resguardo en preservar y conservar estos espacios verdes dentro de la ciudad se convierte en prioritario.

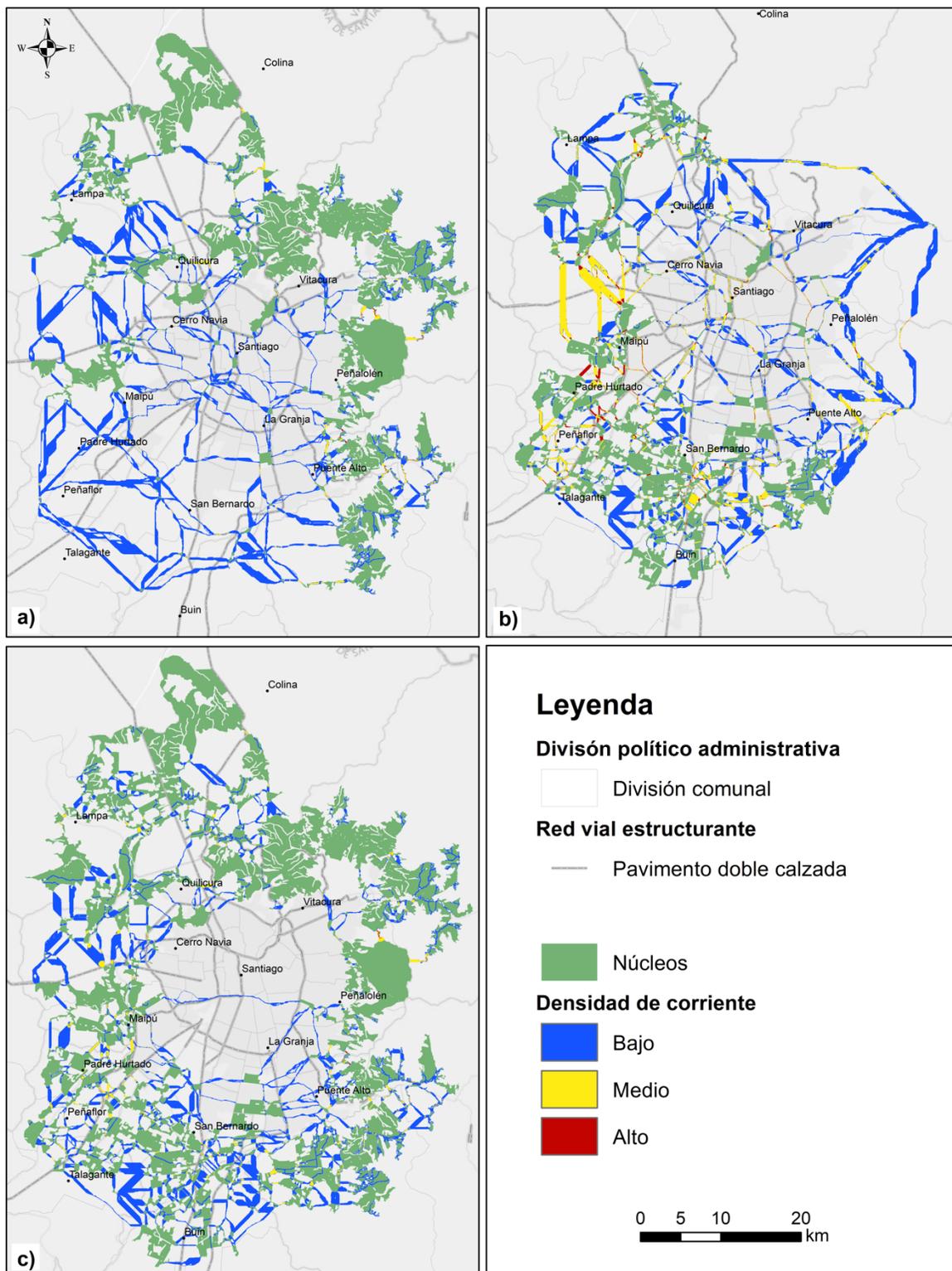
Dentro del área urbana consolidada, los espacios verdes lineales son los principales espacios verdes prioritarios para la conservación de la conectividad, destacando parques de geometría lineal asociados a la infraestructura vial como el parque Tres poniente en Maipú; Parque Forestal, Parque Portales, Parque Almagro, Paseo Bulnes, Bandejón Av. República en Santiago, Parque Ciudad del Sol en Puente Alto, Parque Av. Mapocho Norte en Cerro Navia, Parque Inundable la Aguada en San Miguel, Bandejón central Av. Américo Vespucio Sur en Las Condes entre otros.

**Figura 15.** Cuellos de botella en los espacios verdes Stgo+ IV.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 16.** Análisis de punto de pellizco (Pinch Point) a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y c) espacios naturales y espacios silvoagropecuarios.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Tabla 8.** Superficie de cuellos de botella por escenario.

| Escenarios  | Todos km <sup>2</sup> |       |       | Límite urbano PRMS km <sup>2</sup> |       |       |
|---|-----------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|
|   | Alto                  | Medio | Total | Alto                               | Medio | Total |
| <b>Todos los espacios verdes</b>                        | 0,30                  | 28,72 | 29,02 | 0,004                              | 5,63  | 5,634 |
| <b>Áreas verdes y espacios silvoagropecuarios</b>       | 5,89                  | 54,99 | 60,88 | 1,96                               | 17,47 | 19,43 |
| <b>Áreas verdes y espacios naturales</b>                | 0,45                  | 8,13  | 8,58  | 0,01                               | 3,11  | 3,12  |
| <b>Espacios naturales y espacios silvoagropecuarios</b> | 0,28                  | 13,81 | 14,09 | 0,00                               | 5,40  | 5,41  |

Fuente: elaboración propia (2022).

En general, para todos los escenarios de modelación, los cuellos de botella del área de estudio se caracterizan por ser de importancia baja para la conectividad (ver Figura 16) por lo que los cuellos de botella medios se consideraron igualmente como prioritarias para la conservación de la conectividad en la infraestructura de Santiago.

Los cuellos de botella en los otros escenarios siguen un patrón similar al del escenario principal de análisis, poseyendo pocas áreas importantes para la conectividad funcional global del paisaje metropolitano, pero con múltiples cuellos de botella de importancia media distribuidos por todo el área de estudio (ver Figura 16).

El escenario de áreas verdes y de espacios silvoagropecuarios destaca como el escenario donde se presentan más áreas importantes para la conectividad tanto a nivel alto como medio, con una superficie de 60,88 km<sup>2</sup> entre ambos. En este caso, el 33,2% de los cuellos de botella de alta importancia se encuentran dentro del límite urbano (ver Tabla 8).

El escenario de áreas verdes y espacios naturales muestra una menor presencia y extensión de puntos de pellizcos, con solo 8,13 km<sup>2</sup>, en comparación a los demás escenarios, es decir, menos áreas importantes para la conectividad funcional del paisaje, lo que disiente con la importancia para la conectividad asignada por los índices dPC y la centralidad del flujo de corriente para los núcleos de este escenario.

En el escenario de espacios naturales y silvoagropecuarios, los cuellos de botella se concentran en el sector oeste, al igual que el escenario de áreas verdes y silvoagropecuarios. A lo largo de los corredores dentro del área urbana prácticamente no existen cuellos de botella, salvo unos pequeños de media importancia como Parque El Esfuerzo en El Bosque, en av. Santa Rosa entre Antumapu y Parque Mapuhue, La Pintana y en plaza en Acceso Sur con Luis Matte Larraín.

### 3.3.3 Barreras

Como es esperado, los obstáculos hallados a partir del análisis de las barreras de Linkage Mapper son más abundantes y más extensos que los cuellos de botella en el paisaje metropolitano. Las barreras para la conectividad funcional de la infraestructura verde se encuentran ubicados principalmente en las arterias más urbanizadas por donde franquean los corredores de menor costo modelados para Santiago.

En la mayoría de los escenarios modelados, las barreras siguen el mismo patrón de distribución en el paisaje, extendiéndose por las zonas céntricas de la ciudad de Santiago (ver Figura 17).

Al igual que en el análisis de los cuellos de botella, el escenario que posee mayores barreras corresponde las áreas verdes y silvoagropecuarias, en cambio, el de menores barreras es el escenario de espacios naturales y silvoagropecuarios.

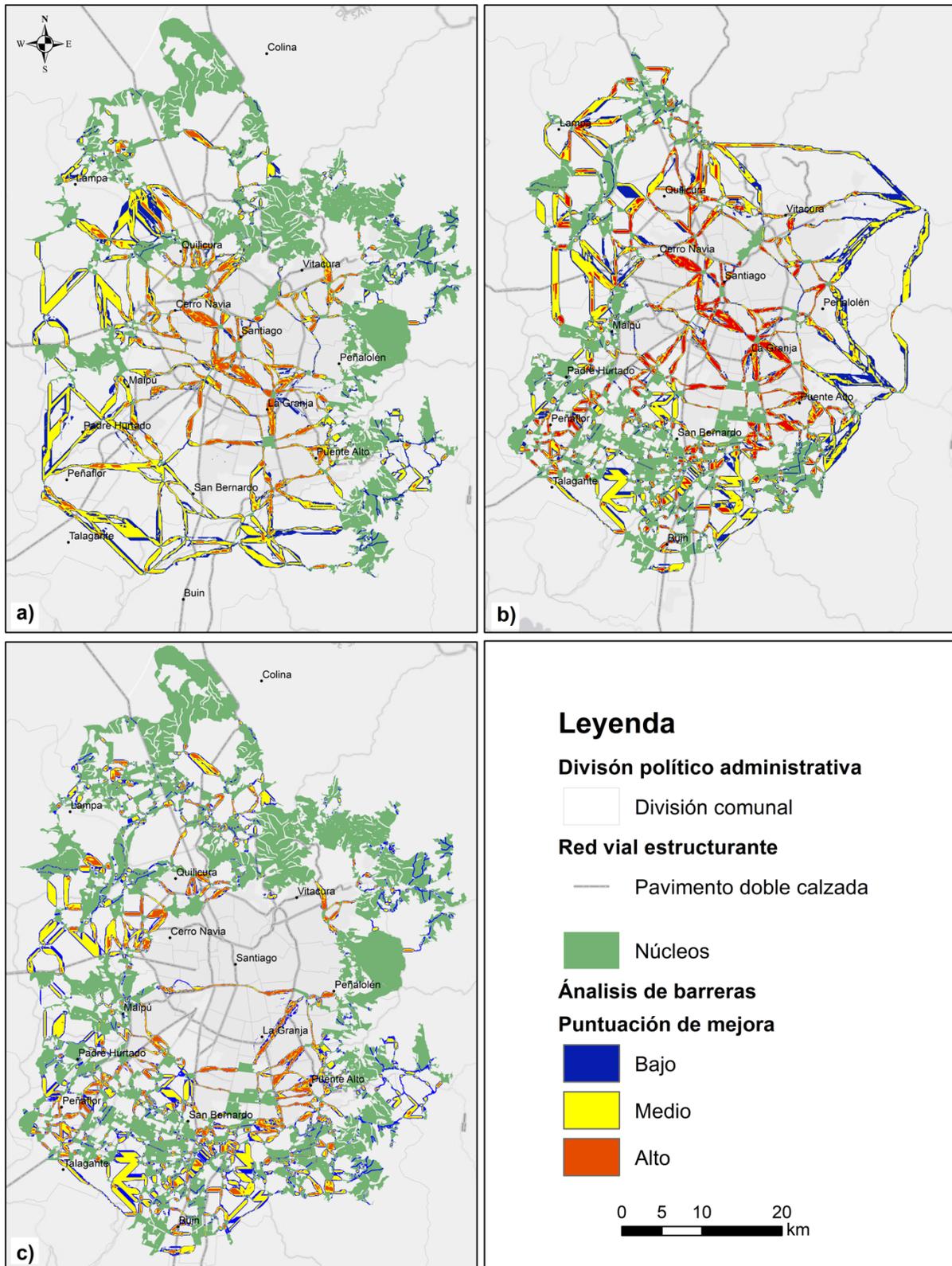
En el escenario de espacios naturales y silvoagropecuarios, las barreras se distribuyen de una forma diferente que al resto. Se concentran en el sector sur debido a la falta de corredores dentro del área urbana consolidada de Santiago.

En el caso del escenario de todos los espacios verdes de la IV (ver Figura 18), la extensión de las barreras de alta puntuación de mejora alcanza los 93,16 km<sup>2</sup>, concentrándose en el centro de la ciudad, en los corredores que unen los principales cerros islas de la ciudad con los parques metropolitanos como el O'Higgins, Padre Hurtado, Quinta Normal, Brasil con La Platina y Antumapu.

Gran parte de las barreras de los corredores ecológicos modelados provienen de las superficies de suelo de áreas residenciales que bloquean los flujos hacia otros espacios verdes. En el caso del escenario que contempla todos los espacios, destacan las barreras que interfieren entre en Parque Mapocho y Parque Quinta Normal, compuesto principalmente por áreas residenciales de los sectores Consul Poinsett, Garín, Lo López, Mercurio entre Cerro Navia y Quinta Normal. Las áreas residenciales que se interponen entre el Parque André Jarlán y el Parque La Castrina en los sectores de la av. Pdte. Salvador Allende Gossens, Lo Vial, San Nicolas, Departamental. Y en los sectores aledaños del Parque Brasil a hacia los espacios verdes asociados al piedemonte andino. Es posible notar que en estos sectores la presencia de grandes espacios verdes lineales, como bandejones centrales, son prácticamente inexistente. Los espacios verdes lineales contribuyen de manera significativa a la conectividad en el área de estudio como se pudo observar en el análisis de las áreas prioritarias para conservar la conectividad.

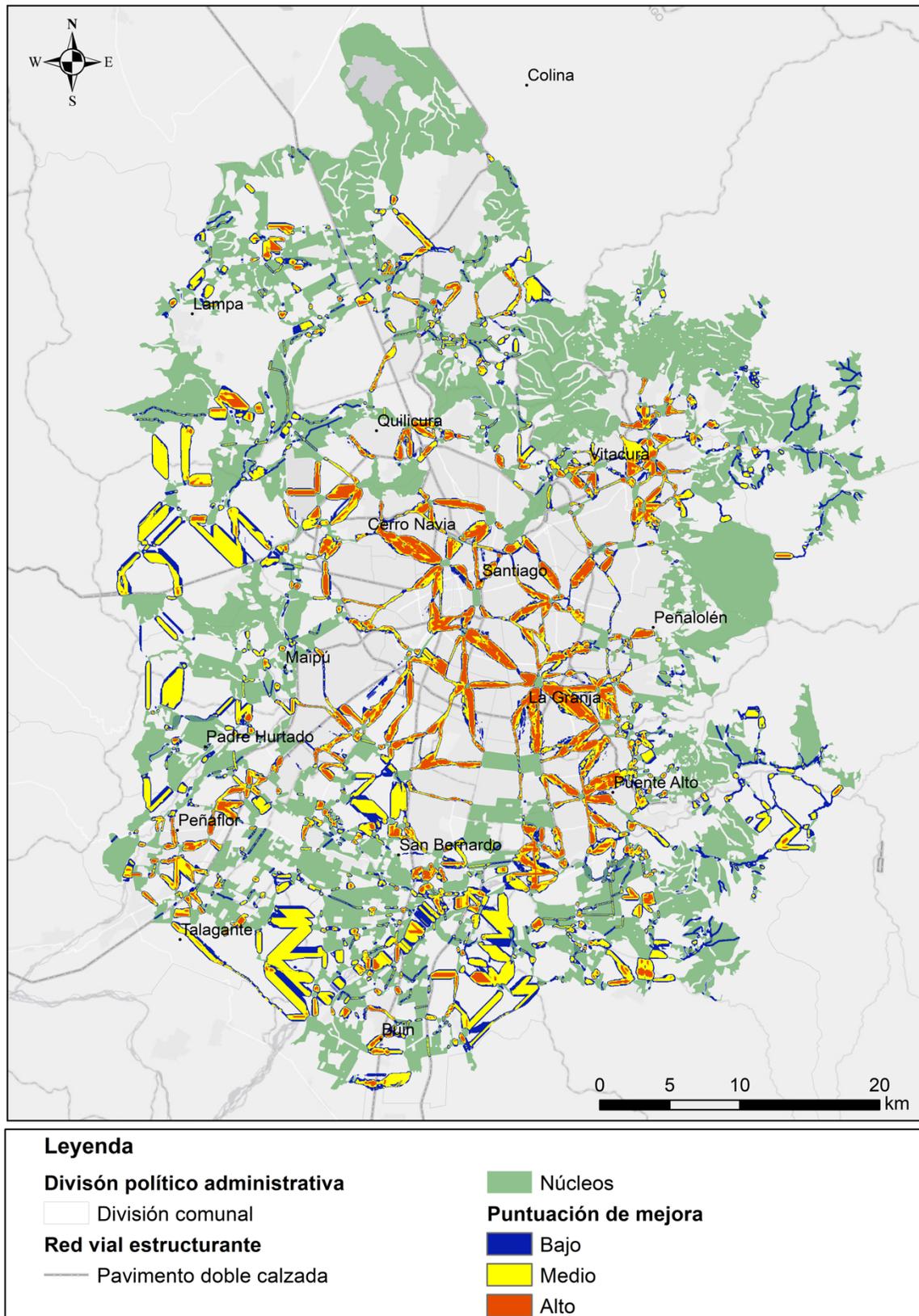
Las barreras no son solo áreas urbanizadas e impermeables como avenidas y áreas residenciales, sino que también es posible identificar dentro de ellas espacios verdes mapeados en Stgo+ Infraestructura Verde que se encuentran generando resistencia para los flujos de materia y energía (ver Figura 20).

**Figura 17.** Análisis de barreras a) áreas verdes y espacios naturales; b) áreas verdes y espacios silvoagropecuarios y c) espacios naturales y espacios silvoagropecuarios.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 18.** Análisis de barreras en escenario de todos los espacios verdes de la IV.



Fuente: elaboración propia (2022).

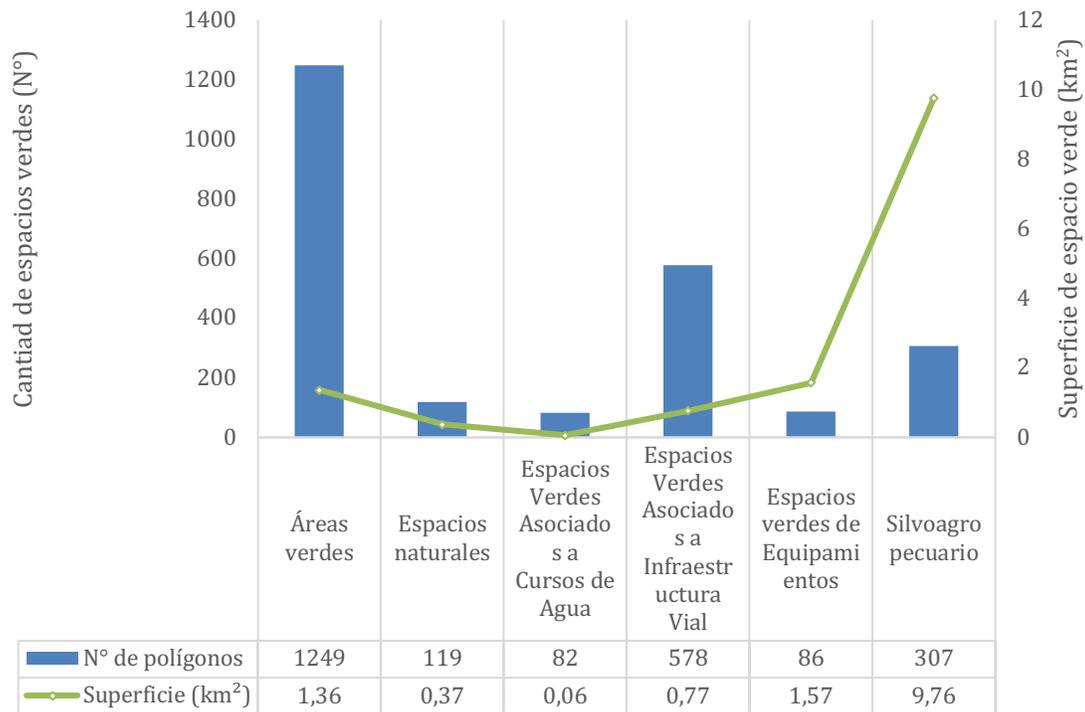
La superficie de estos espacios verdes considerados como barreras de alta puntuación de mejora (alta prioridad para la restauración de la conectividad) son 13,89 km<sup>2</sup>, lo que representa un 14,9% de la superficie de barreras de alta puntuación. Se caracterizan por ser mayoritariamente de tipología de áreas verdes y los asociados a la infraestructura vial (ver Figura 19).

Las barreras de prioridad media para ser restauradas abarcan en total 205,48 km<sup>2</sup> y los espacios verdes como barreras medias 109,54 km<sup>2</sup>. En total, en el paisaje metropolitano, entre barreras medias y altas del paisaje, cubren 298,64 km<sup>2</sup> de la superficie de barreras en su totalidad en el paisaje y 123,4 km<sup>2</sup> de espacios verdes de STGO+.

Los espacios verdes prioritarios de la IV de mayor superficie para ser restaurados se ubican en las comunas periurbanas, predominando las de tipología silvoagropecuarias (ver Figura 19) en cuanto a superficie. Dentro del límite urbano, las barreras de mayor superficie corresponden a espacios verdes asociados a equipamiento, destacando, por ejemplo: Estadio Monumental, Estadio Nacional Julio Martínez Prádanos, Complejo Deportivo La Cisterna, Base Área El Bosque, Hipódromo de Chile y Hospital Sotero del Río, entre otros.

En términos generales, en el piedemonte andino predominan las barreras de menor prioridad, debido a que generan menos resistencia en comparación a las barreras medias y altas, aunque también es posible encontrar algunas predominantemente naturales. Concordando con los resultados de los cuellos de botella, en el sector cordillerano se ubican principalmente las áreas prioritarias para mantener la conectividad actual de la infraestructura verde y presenta en menor medida algunas barreras para la conectividad.

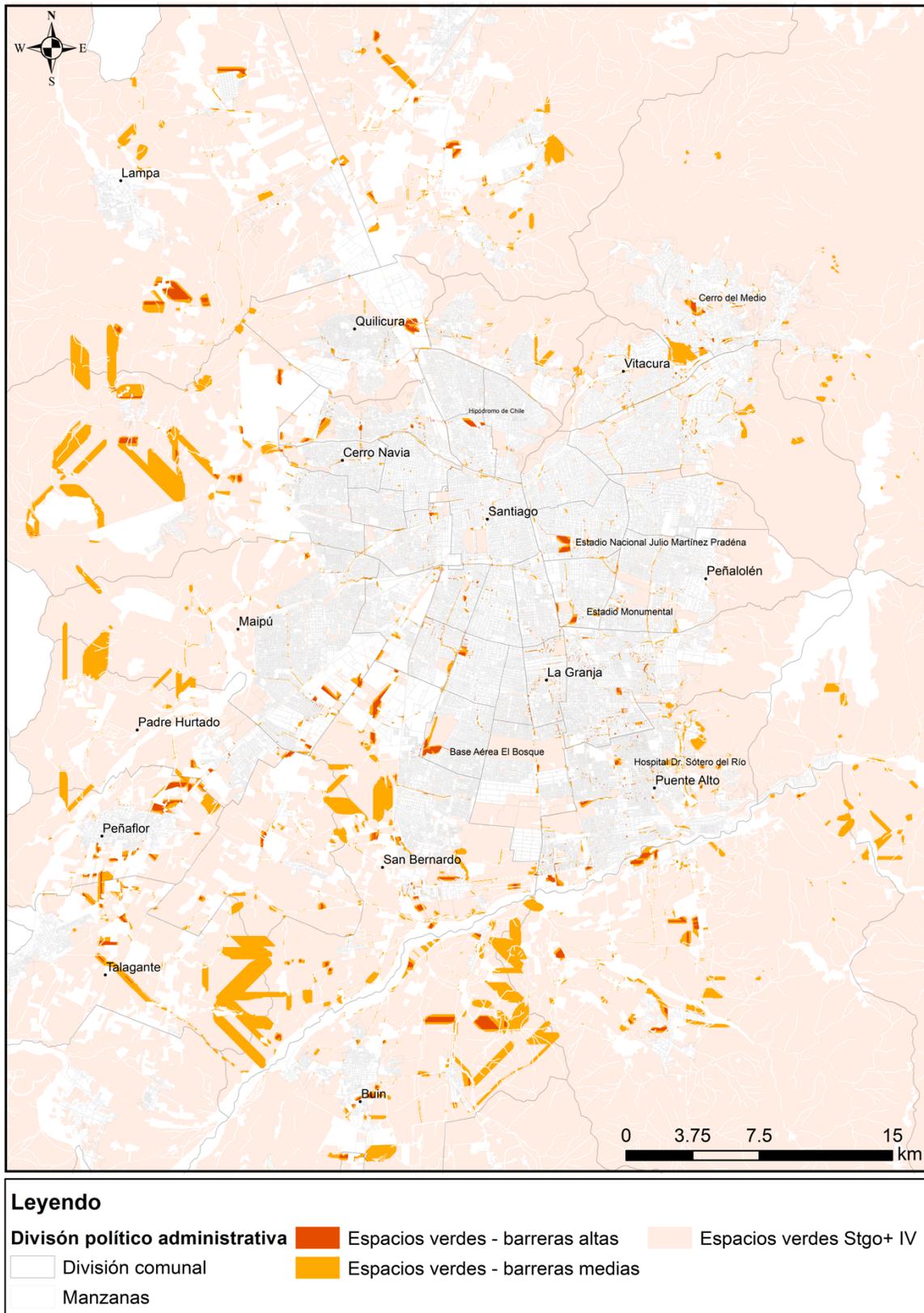
**Figura 19.** Barreras de alta puntuación de mejora según tipología de infraestructura verde de Stgo+ Infraestructura Verde.



Fuente: elaboración propia (2022).

Además, se pudo notar que existen espacios verdes considerados como prioritarios para la conservación desde el análisis de los cuellos de botella, también son barreras para la conectividad funcional desde el análisis de barreras. Principalmente, las barreras coinciden con los bordes o extremos de los espacios verdes, expuestos a los márgenes de la red vial o residencias, mientras que en el núcleo o zonas no tan expuestas se consideran como cuellos de botella.

**Figura 20. Barreras en los espacios verdes Stgo+ IV.**



Fuente: elaboración propia (2022).

### *3.3.4 Propuesta de espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad*

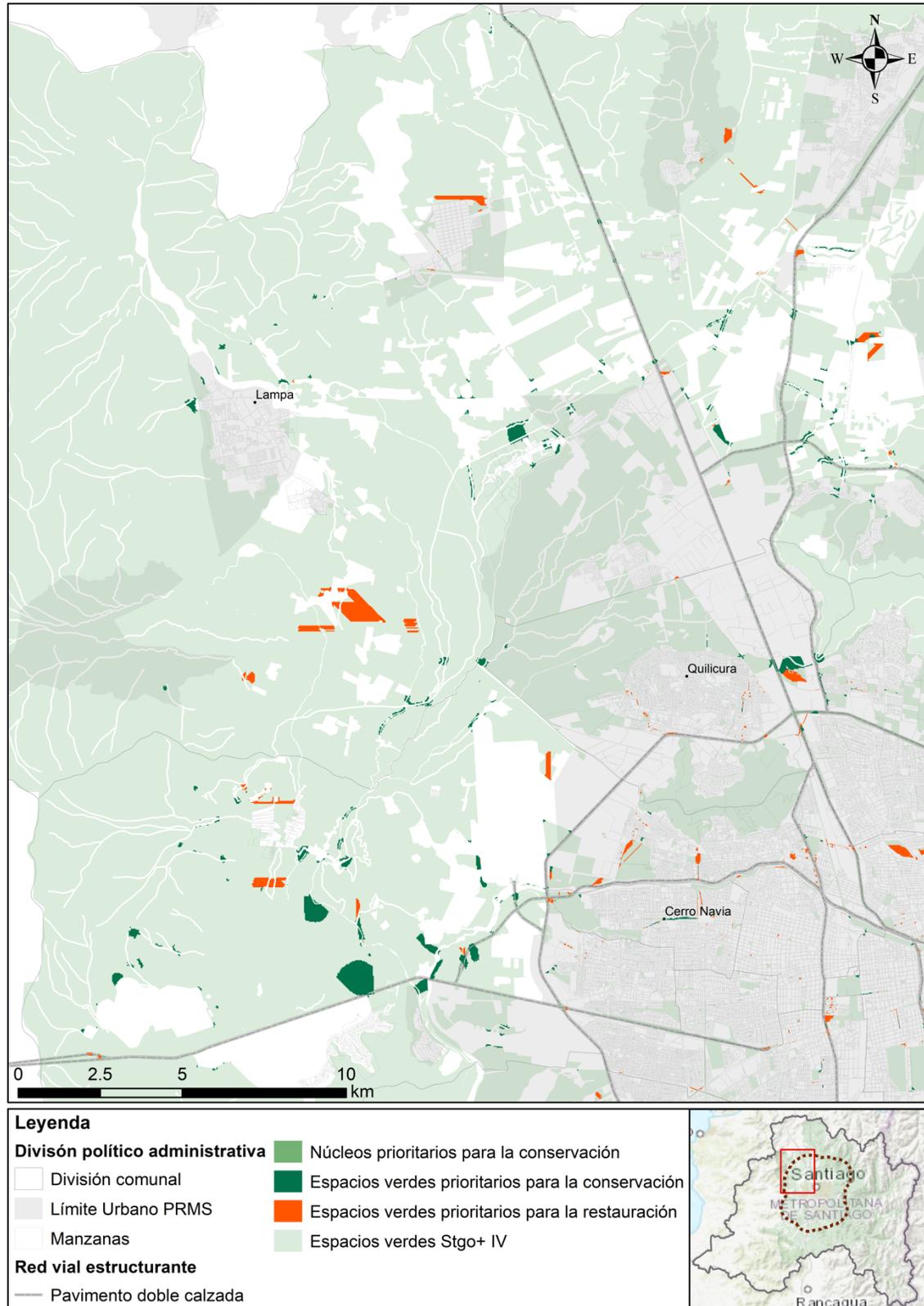
En el siguiente apartado se exponen los espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Se divide en cuatro cuadrantes el área de estudio para mejor visualización (ver Figura 21, Figura 22, Figura 23 y Figura 24).

Los núcleos prioritarios para la conservación identificados a partir de metodologías para la conectividad estructural y funcional del paisaje, se distribuyen principalmente en el piedemonte andino en las comunas de Lo Barnechea, Las Condes, Peñalolén, La Florida, Puente Alto, Pirque, San José de Maipo y Colina. Por el sector sur, los núcleos se caracterizan por ser áreas agrícolas ubicados en San Bernardo, Calera de Tango y Buin. En promedio, la superficie de los núcleos prioritarios es de 9,65 km<sup>2</sup>.

Las áreas prioritarias para conservar identificadas por el análisis de cuellos de botella, se distribuyen principalmente en los márgenes de la ciudad, insertos en los cordones montañosos y en áreas silvoagropecuarias. En promedio, la superficie de estas áreas prioritarias para la conservación es de 0,013 km<sup>2</sup>, comunas como Pirque, San Bernardo, Maipú, Puente Alto y Lo Barnechea concentran estos espacios verdes prioritarios dentro de sus límites.

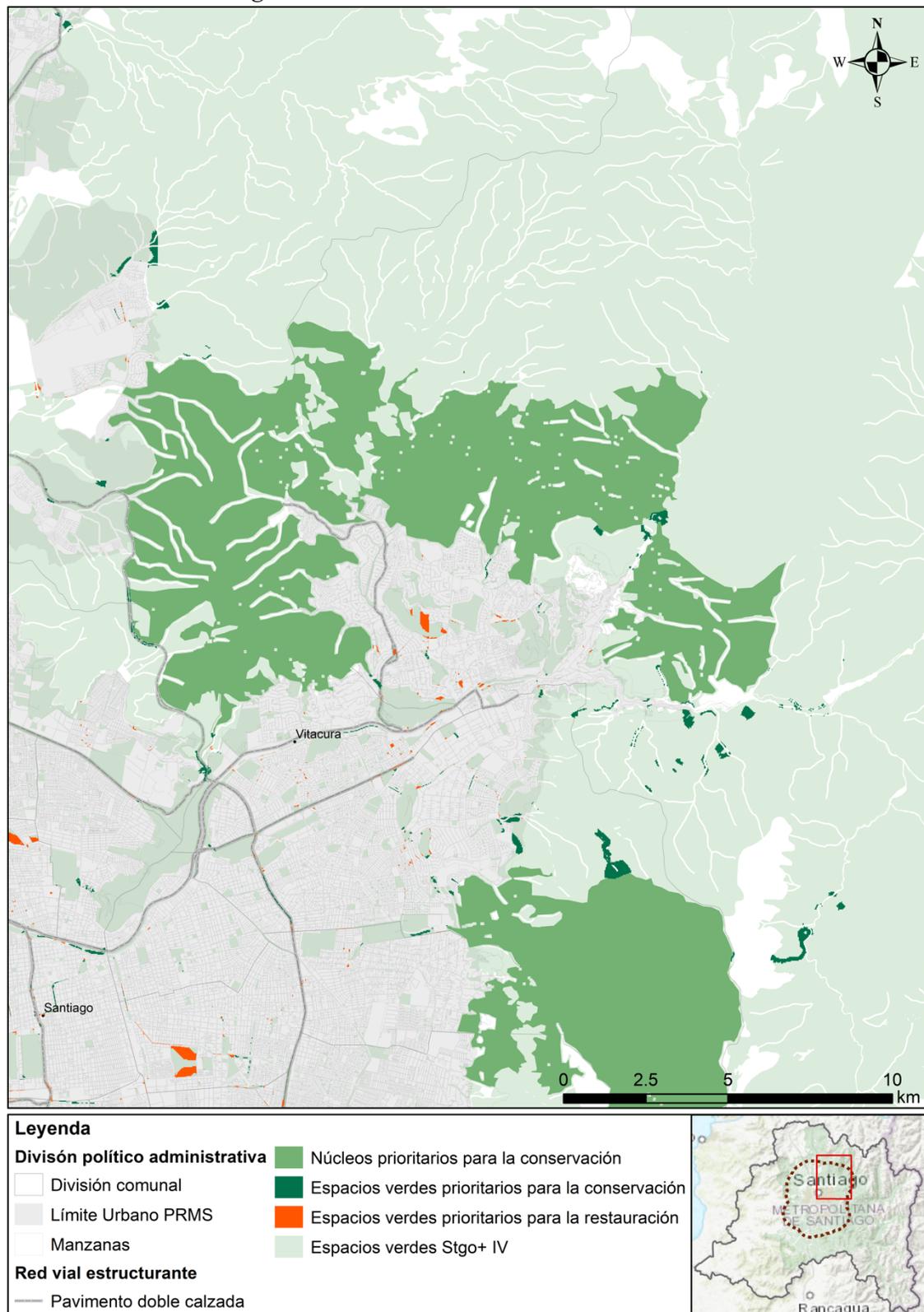
Los espacios verdes de la IV asociados a las barreras, que constituyen áreas prioritarias para restaurar la conectividad del paisaje, se distribuyen principalmente en el sector surponiente y suroriente de la ciudad, predominando en las comunas de Puente Alto, La Florida, San Bernardo, La Granja y Maipú. Las barreras no solo constituyen elementos impermeables como carreteras, zonas residenciales, edificaciones, también pueden ser elementos del paisaje como espacios verdes que se encuentran deteriorados o que sus cubiertas de suelo se encuentran en constante degradación, dificulta el flujo energético y provocando que se la conectividad se encuentre comprometida, no obstante, estos espacios verdes siguen aportando algún grado de valor a la conectividad y es por ello que la restauración de estos espacios puede mejorar considerablemente la conectividad del paisaje.

**Figura 21.** Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante norponiente.



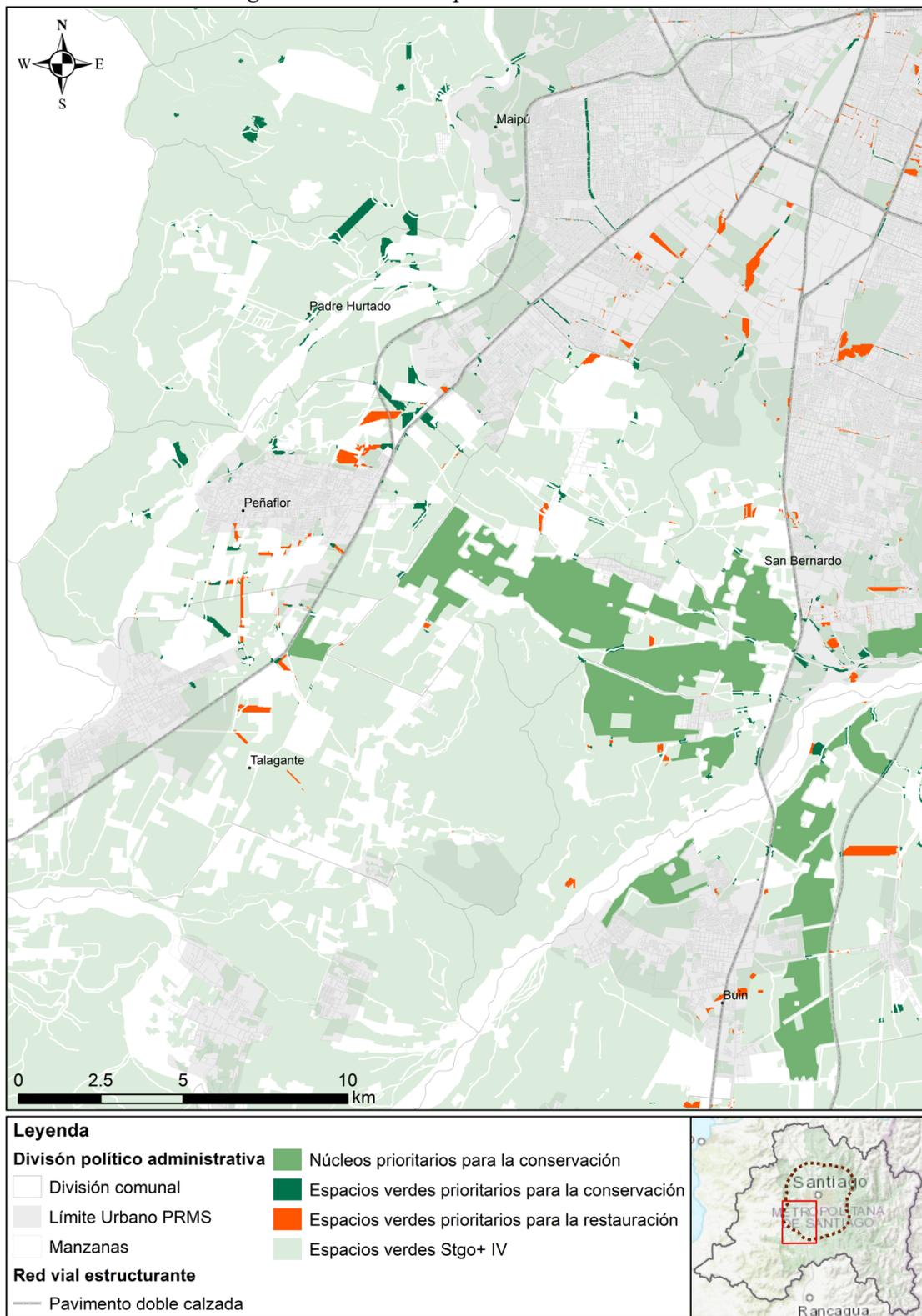
Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 22.** Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante nororiente.



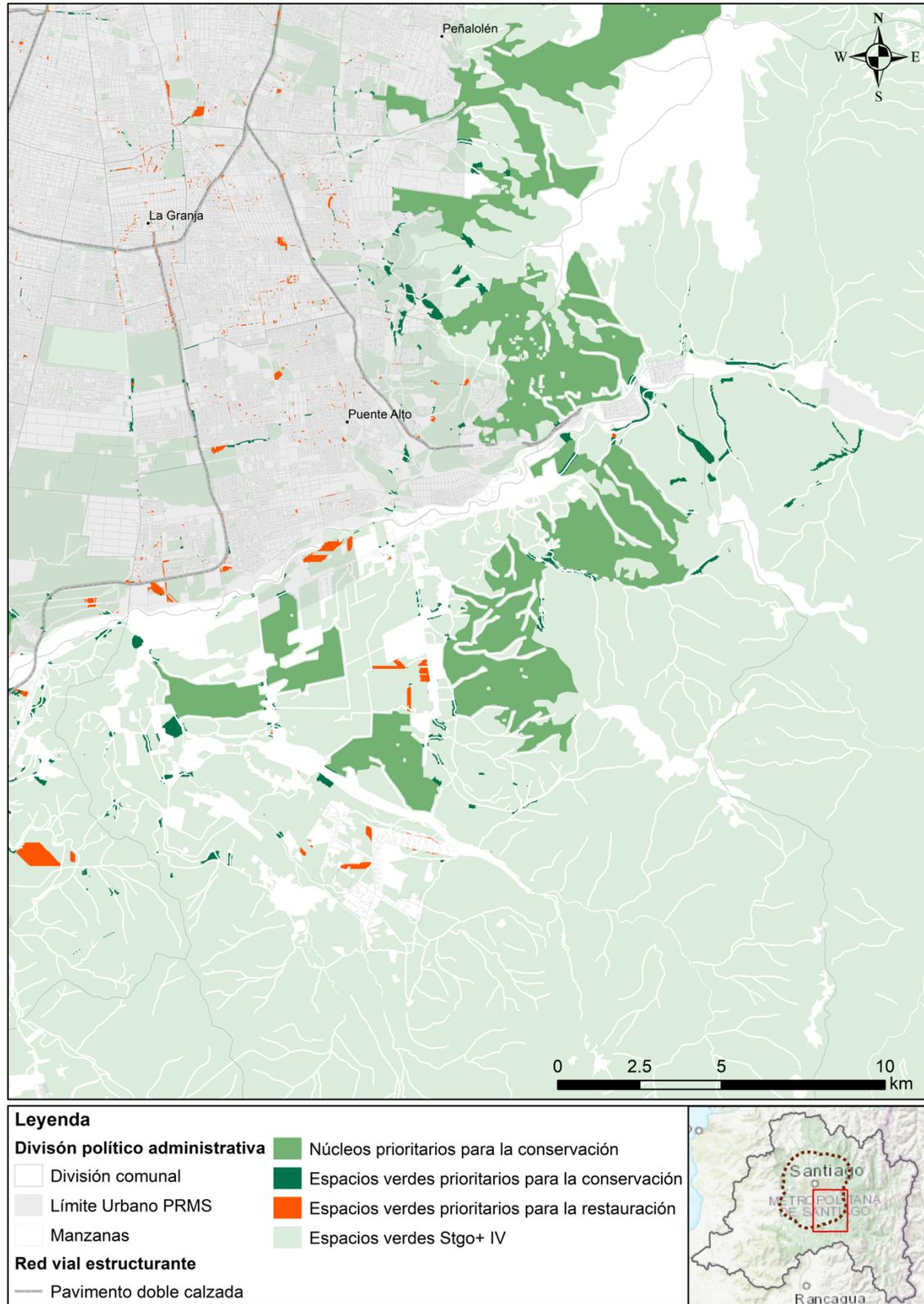
Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 23.** Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante surponiente.



Fuente: elaboración propia (2022).

**Figura 24.** Propuesta espacios verdes prioritarios para la conservación y restauración de la conectividad de Santiago. Cuadrante suroriente.



Fuente: elaboración propia (2022).

## CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El principal objetivo de la presente memoria consistió en identificar los espacios verdes prioritarios para ser conservados y restaurados para mejorar la conectividad de la infraestructura verde de Santiago.

Se encontraron múltiples espacios prioritarios donde se debe restaurar la conectividad, espacios que actualmente generan resistencia al movimiento y flujo de materia y energía, pero que con su restauración mejorarían la conectividad global del paisaje. Por otra parte, los espacios prioritarios para ser conservados son escasos dentro de la ciudad, mostrando la precariedad de la conectividad actual de la infraestructura verde intraurbana de Santiago. En general, los flujos del área de estudio se encuentra altamente restringidos y comprometidos en el área urbana consolidada de la ciudad de Santiago, especialmente por las coberturas del suelo impermeables y urbanas.

Los espacios naturales del paisaje metropolitano son sumamente importantes para la conectividad del área de estudio, no solo proporcionan los núcleos de mayor importancia para la conectividad estructural y funcional del paisaje según los índices dPC y la centralidad del flujo de corriente, sino que también proporcionan los corredores de menor costo de mejor calidad para el movimiento y flujos de materia y energía. En el caso de la modelación de infraestructura ecológica para una especie específica, Acuña (2020) modeló corredores potenciales para el *Puma concolor* en la Región Metropolitana y Región de Valparaíso, área de estudio de GEF Montaña, utilizando el método de corredores de menor costo. Los principales núcleos identificados para dicha especie se encuentran insertos en los cordones montañosos, principalmente en las comunas de San José de Maipo, Colina y Tiltil y los corredores potenciales en San Pedro, Alhué y Paine, territorios que se caracterizan por ser rurales y presentar cubiertas naturales principalmente de tipo matorral (Acuña, 2020).

Dentro de los límites urbanos establecidos por el PRMS, la presencia de espacios verdes prioritarios para la conservación es casi nula, estos se localizan principalmente fuera del límite urbano, concentrándose especialmente en el sector cordillerano andino. En dicho sector se ubican las dos áreas prioritarias para la conservación de la conectividad según el análisis de los cuellos de botella que corresponden a espacios naturales reconocidos a nivel metropolitano: el Parque Natural San Carlos de Apoquindo y el Bosque Panul.

El límite urbano marca un claro hito entre los puntos prioritarios de conservación y restauración encontrados en los análisis, dentro del límite urbano predominan las barreras y fricciones, y fuera los espacios importantes a nivel ecológico para la conectividad. La expansión del límite urbano es una amenaza constante para los espacios naturales de la ciudad, donde los procesos ecológicos aún perduran, porque cualquier ampliación de este se debe hacer con especial cuidado para minimizar los impactos negativos sobre la conectividad del paisaje.

En este sentido, la conectividad debe estar presente los procesos de ordenamiento territorial, conservación de la naturaleza y de planificación urbana. Es importante su consideración, pues una deficiente planificación urbana podría provocar un crecimiento urbano que dañe de manera irreversible la conectividad global del paisaje.

Los espacios silvoagropecuarios también son una de las tipologías más importante para la conectividad del paisaje. Por una parte, una gran cantidad y extensión de espacios prioritarios para la conservación de nivel medio son de esta tipología, y por otra parte es una de las tipologías con menos barreras en proporción a su totalidad de espacios. Si los espacios naturales no existiesen, serían los espacios silvoagropecuarios las de mayor importancia, concentrándose cerca del sector del Noviciado en la comuna de Pudahuel, en el sector de Quebrada La Plata en la comuna de Maipú y en Los Maitenes, cercano al Río Mapocho en la comuna de Padre Hurtado y sector céntrico de la misma comuna.

Las áreas verdes son una de las tipologías más frecuentes de IV dentro de la matriz urbana, y proporcionan espacios verdes importantes desde un punto de vista recreativo, de ocio, social y para los servicios ecosistémicos culturales, sin embargo, como se mostró en el análisis por escenario, su presencia no aporta significativamente a la conectividad ecológica, en tanto respecto a núcleos (conectividad estructural) como respecto a corredores de menor costo.

El paisaje de Santiago en general se encuentra fragmentado y disperso (Sandoval, 2016), principalmente al interior del área urbana consolidada de la ciudad. La red de espacios verdes presente en el área de estudio se encuentra segregada espacialmente en más de una red interconectada, por un lado se encuentra la red a nivel urbano, que se encuentra fragmentada, y las redes fuera de la ciudad: una red de espacios verdes marcadamente agrícola en el sector poniente y una red de espacios verdes esencialmente de espacios naturales en el sector oriente. En esta perspectiva, los espacios verdes prioritarios en una mayor medida serían aquellos que puedan permitir la conectividad entre las tres redes presentes en el área de estudio. Su identificación y análisis requiere de estudios adicionales en más a profundidad.

Además, las barreras para la conectividad funcional abundan y los cuellos de botella escasean dentro de la tipología de áreas verdes. Se encontraron para el escenario principal, que contempla todos los espacios verde de la IV, 1.249 áreas verdes que poseen barreras de alta puntuación de mejora y tan solo 292 áreas verdes como áreas prioritarias de conservación de nivel medio. No obstante, si las áreas verdes no existiesen, dejaría casi por completo desconectado el área urbana consolidada, como se observó en el escenario de espacios naturales y silvoagropecuarios, existiendo en ese caso tan solo dos corredores principales que atraviesan la ciudad.

Los espacios verdes prioritarios para restaurar la conectividad de mayor superficie fueron los espacios verdes ligados a equipamientos asociados a establecimientos que prestan servicios,

ya sea educacional, salud, cementerio, recreativo y deportivo, consistorial o seguridad, donde los espacios verdes no son el destino de principal del predio, por lo que su mantención depende principalmente de privados. Entre ellos se encuentran: Estadio Monumental, Estadio Nacional Julio Martínez Prádanos, Complejo Deportivo La Cisterna, Base Área El Bosque, Hipódromo de Chile y Hospital Sotero del Río, entre otros.

Además, gran parte de las barreras entre los corredores de menor costo las constituyen las áreas residenciales que se encuentran entre núcleos a conectar, como los asociados al sector de Rojas Magallanes entre el Parque Brasil y espacios naturales del piedmonte andino, las áreas residenciales entre el Parque Mapocho y Parque Quinta Normal, y el tramo entre el Parque Castrina y el Parque André Jarlán.

Destacan los espacios verdes lineales como los principales aportantes a la conectividad del paisaje en la matriz urbana. Los principales parques de características lineales de gran tamaño como el Parque Tres poniente, Parque Forestal, Parque Almagro, o incluso un poco más pequeño como el Paseo Bulnes, representan áreas prioritarias para la conservar ya que actualmente contribuyen significativamente a la conectividad de la infraestructura verde. Por al contrario, las áreas residenciales representan barreras al flujo de materias y energía, pero con la acción para el desarrollo de espacios verdes y sobre todo corredores podrían tener una contribución significativa a la conectividad. Desarrollar y potenciar espacios verdes lineales podría contribuir significativamente a la conectividad en dichas áreas de barreras, proporcionando corredores verdes que utilicen como elementos de transición entre los parques urbanos y a las áreas ambientales protegidas, de valor natural.

Este trabajo contribuye con información significativa para el diseño de planes y proyectos para asegurar la conectividad e integridad espacial de la red de infraestructura verdes en Santiago.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, R. (2020). *Corredores potenciales y zonas de mayor importancia en la conectividad para el puma (Puma concolor) en la zona central de Chile*. Santiago: Memoria de Geografía, Universidad de Chile.
- Ahern, J. (1995). Greenways as a planning strategy. *Landscape and urban planning*, 33(1-3), 131-155.
- An, Y., Liu, S., Sun, Y., Shi, F., & Beazley, R. (2021). Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory. *Landscape Ecology*, 36, 2059-2076. doi:<https://doi.org/h63z>
- Arias, S. (2019). La infraestructura verde como estrategia de transformación hacia el urbanismo sustentable. *Vivienda y Comunidades Sustentables*.
- Ayuntamiento de Barcelona. (2013). *Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020*.
- Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. (2014). *La Infraestructura Verde Urbana de Vitoria-Gasteiz*. Centro de Estudios Ambientales.
- Barsky, A. (2005). El periurbano productivo, un espacio en constante transformación. Introducción al estado del debate, con referencias al caso de Buenos Aires. *Scripta Nova*, 194.
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., & Peters, A. (2017). Towards a comprehensive green. *Urban Ecosystems*, 15-35. doi:<https://doi.org/f9w32f>
- Beier, P., Majka, D., & Spencer, W. (2008). Conceptual steps for designing wildlife corridors.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington, D.C.: The Conservation Fund. Urban Land Institute. Obtenido de <http://www.michellevanstrom.com/images/greeninfrastructure.pdf>
- Cannas, I., Lai, S., Leone, F., & Zoppi, C. (2018). Green Infrastructure and Ecological Corridors: A Regional Study Concerning Sardinia. *Sustainability*, 1265.
- Chandra, A. K., Raghavan, P., Ruzzo, W. L., Smolensky, R., & Tiwari, P. (1997). *The electrical resistance of a graph captures its commute and cover times*. computational complexity. Obtenido de <https://homes.cs.washington.edu/~ruzzo/papers/resist.pdf>
- Chávez, E., & Puebla, A. (2013). Propuesta metodológica para la delimitación semiautomatizada de unidades de paisaje de nivel local. *Geography Department, University of Sao Paulo*, 1-19. doi:10.7154/RDG.2013.0025.0101.
- CONAF. (2021). *Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile al año 2020*. Santiago: Departamento de Monitoreo de Ecosistemas Forestales.
- DGA. (2004). *CUENCA DEL RIO MAIPO: DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.

- Dickson, B. G., Albano, C. M., Anantharaman, R., Beier, P., Fargione, J., Graves, T. A., . . . Theobald, D. M. (2018). Circuit-theory applications to connectivity science and conservation. *Conservation Biology*, 0(0), 1-11. doi:<https://doi.org/gfc5hh>
- Doyle, P. G., & Snell, J. L. (1984). *Random Walks and Electric Networks*. The Mathematical Association of America. Obtenido de <https://www.ams.org/books/car/022/car022-endmatter.pdf>
- Dutta, T., Sharma, S., McRae, B. H., Roy, P. S., & DeFries, R. (2016). Connecting the dots: mapping habitat connectivity for tigers in central India. *Reg Environ Change*, 53-67. doi:<https://doi.org/f8zbwd>
- ESRI. (2022). *Métodos de clasificación de datos*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- European Environment Agency. (2011). *Green infrastructure and territorial cohesion: The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems*. EEA Technical report. European Environment Agency.
- Forman, R. T. (1995). Land Mosaics: The Ecology of landscapes and regions. *The ecological design and planning reader*. Obtenido de <https://link.springer.com/content/pdf/10.5822/978-1-61091-491-8.pdf#page=239>
- Galindo, R. E., Pérez, M. J., Reynoso, R., Rosas-Rosas, O., & González, C. (2019). Cambio de uso de suelo, fragmentación del paisaje y la conservación de *Leopardus pardalis* Linnaeus, 1758. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(52), 149-169. doi:<https://doi.org/hgvb>
- García, F., & Abad, J. (2014). Los corredores ecológicos y su importancia ambiental: Propuestas de actuación para fomentar la permeabilidad y conectividad aplicadas al entorno del río Cardeña (Ávila y Segovia). *Observatorio Medioambiental*, 253-298. doi:<https://doi.org/h633>
- GORE-RMS. (2012). *Estrategia Regional para la Conservación de la Biodiversidad en la Región Metropolitana de Santiago*. Gobierno Regional Metropolitano de Santiago y Secretaría Regional Ministerial del Ministerio del Medio Ambiente, Región Metropolitana de Santiago.
- Gou, M., Li, L., Ouyang, S., Chang, S., Xiao, W., Wang, N., . . . Liu, C. (2022). Integrating ecosystem service trade-offs and rocky desertification into ecological security pattern construction in the Daning river basin of southwest China. *Ecological Indicators*, 138. doi:<https://doi.org/h634>
- Gurrutxaga, M. (2004). *Conectividad ecológica del territorio y conservación de la biodiversidad. Nuevas perspectivas en ecología del paisaje y ordenación territorial*. EuskoJaurilaritzaren Argitalpen Zerbitzu Nagusia = Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- Gurrutxaga, M., & Lozano, P. J. (2006). Efectos de la fragmentación de hábitats y pérdida de conectividad ecológica dentro de la dinámica territorial. *Polígonos. Revista de geografía*(16), 35-54. doi:<https://doi.org/h635>

- Hansen, R., Werner, R., Santos, A., Luz, A., Száraz, L., Tosics, I., . . . Pauleit, S. (2016). Advanced Urban Green Infrastructure Planning and Implementation - Innovative Approaches and Strategies from European Cities: Deliverable 5.2. Technical Report of the Green Surge Project. *Green surge*, 205. doi:<https://doi.org/h636>
- Huang, J., Hu, Y., & Zheng, F. (2020). Research on recognition and protection of ecological security patterns based on circuit theory: a case study of Jinan City. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12414-12427. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-07764-x>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). *Censos de Población y Vivienda*. Obtenido de <http://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>
- Lin, J., Huang, C., Wen, Y., & Liu, X. (2021). An assessment framework for improving protected areas based on morphological spatial pattern analysis and graph-based indicators. *Ecological Indicators*, 130, 108138. doi:<https://doi.org/gmr6kt>
- Liu, Y., Huang, T.-T., & Zheng, X. (2022). A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction. *Urban Ecosystems*, 25, 909–925. doi:<https://doi.org/h637>
- Liu, Z., Xiu, C., & Ye, C. (2020). Improving Urban Resilience through Green Infrastructure: An Integrated Approach for Connectivity Conservation in the Central City of Shenyang, China. *Complexity*, 15. doi:<https://doi.org/h638>
- Martínez, J. L., & Sainz, J. (2016). *Evaluación de la Conectividad Ecológica en el Área Metropolitana de La Bahía de Santander*. Informe final elaborado para la Fundación Naturaleza y Hombre en el marco del proyecto LIFE14 NAT/ES/000699 Anillo Verde de la Bahía de Santander: conectando la naturaleza y la ciudad. Obtenido de <https://bit.ly/3bqLbW7>
- McRae, B. H. (2006). ISOLATION BY RESISTANCE. *Evolution*, 60(8), 1551-1561. doi:<https://doi.org/10.1554/05-321.1>
- McRae, B. H. (2012a). *Barrier Mapper Connectivity Analysis Software*. Seattle WA: The Nature Conservancy. Obtenido de <https://circuitscape.org/linkagemapper/>
- McRae, B. H. (2012b). *Pinchpoint Mapper Connectivity Analysis Software*. Seattle WA: The Nature Conservancy. Obtenido de <https://circuitscape.org/linkagemapper/>
- McRae, B. H., & Kavanagh, D. (2011). *Linkage Mapper Connectivity Analysis Software*. Seattle WA: The Nature Conservancy. Obtenido de <https://circuitscape.org/linkagemapper/>
- McRae, B. H., Dickson, B. G., Keitt, T. H., & Shah, V. B. (2008). Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 89(10), 2712-2724. doi:<https://doi.org/b4ff5k>
- McRae, B. H., Hall, S. a., Beier, P., & Theobald, D. M. (2012). Where to restore ecological connectivity? Detecting barriers and quantifying restoration benefits. *PLoS ONE*, 7(12), e52604. doi:<https://doi.org/f4hd9z>
- Mell, I. (2016). *Global Green Infrastructure. Lessons for successful policy-making, investment and management*. Routledge. doi:<https://doi.org/10.4324/9781315720968>

- Mendenhall, C. D., Daily, G. C., & Ehrlich, P. R. (2012). Improving estimates of biodiversity loss. *Biological Conservation*, 151(1), 32-34. doi:<https://doi.org/f34mgp>
- Merriam, G. (1984). Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. En J. Brandt, & P. Agger (Ed.), *Proceedings of the 1st International Seminar on Methodology in Landscape Ecological Research and Planning Denmark: Roskilde University*. Roskilde, Denmark.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1975). *D.F.L N° 458*. . Ley General de Vivienda y Urbanismo.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2020). *Resumen del Estado del Medio Ambiente para la ciudadanía*. Santiago de Chile: Gobierno de Chile. Obtenido de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/01/Resumen-Ejecutivo-IEMA2020.pdf>
- MMA - ONU Medio Ambiente. (2020). *Planificación Ecológica a escala local 1:25.000, para todos los municipios pertenecientes al área del proyecto GEF Montaña*. (Dr. Alexis Vásquez, Dr. Emanuel Giannotti, Dr. Álvaro G. Gutiérrez, Dr. Ezio Costa, Elizabeth Galdámez, Ms. Ignacio Núñez, . . . Universidad de Chile, Edits.) Santiago, Chile: Financiado en el marco del proyecto GEFSEC ID 5135 Ministerio del Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente. Obtenido de <https://gefmontana.mma.gob.cl/libro-planificacion-ecologica-a-escala-local/>
- Molina Holgado, P., Berrocal, A. B., Zapata Bastidas, Á., & Jendryczkowski Rieth, L. (2017). La importancia de las zonas verdes urbanas en la conservación de la biodiversidad en la ciudad de Madrid. El caso de algunas aves en declive. En A. d. Españoles, *aturaleza, territorio y ciudad en un mundo global. Actas del XXV Congreso de la Asociación de Geógrafos Españoles*. Madrid.
- Morera, C., Pintó, J., & Romero, M. (2007). PAISAJE, PROCESOS DE FRAGMENTACIÓN Y REDES ECOLÓGICAS: APROXIMACIÓN CONCEPTUAL. *Corredores biológicos: acercamiento conceptual y experiencia en America*, 11-47. Obtenido de <https://bit.ly/3zOthv5>
- Música de la Guerra, M., Lucio, J. V., Martínez, C., Sastre, P., Atauri-Mezquida, J. A., & Montes del Olmo, C. (2002). *Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos*. (Dirección General de la RENP y Servicios Ambiental, Consejería de Medio Ambiente, & Junta de Andalucía, Edits.) Andalucía. Obtenido de <https://bit.ly/3BGxnBC>
- Naciones Unidas. (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. Obtenido de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- ODEPA. (2012). *Impacto de la expansión urbana sobre el sector agrícola en la Región Metropolitana de Santiago*. Santiago: Ministerio de Agricultura.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (2022). *Informativo regional Región Metropolitana*. Ministerio de Agricultura.

- Organismo Autónomo Parques Nacionales. (2020). *Análisis de la conectividad y fragmentación ecológica en el Parque Nacional de Cabañeros*. Conama.
- Ostapowicz, K., Vogt, P., Riitters, K. H., Kozak, J., & Estreguil, C. (2008). Impact of scale on morphological spatial pattern of forest. *Landscape Ecology*, 23, 1107–1117. doi:<https://doi.org/bhsm5t>
- Pauleit, S., Vásquez, A., Maruthaveeran, S., Liu, L., & Cilliers, S. S. (2021). Urban Green Infrastructure in the Global South. En C. M. Shackleton, S. S. Cilliers, E. Davoren, & M. J. du Toit (Edits.), *Urban Ecology in the Global South* (págs. 107-143). Springer International Publishing. doi:<https://doi.org/h64g>
- Prieto-Torres, D. A. (2020). Conectividad ecológica como detonador de la sustentabilidad en la Ciudad de México. *Seminario en el marco del proyecto FORDECyT - CONACyT 308905: Áreas para incrementar la conectividad ecológica en el sur de la Ciudad de México*. COUS. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <https://educacioncontinua.unam.mx/index.php/actividad/ver/1362>
- Red Santuarios de la Naturaleza RM. (2022). *Red Santuarios de la Naturaleza RM*. Obtenido de <https://www.redsantuariosrm.cl/>
- Reyes, S., & Figueroa, I. M. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. *EURE*, 36(109), 89-110. doi:<https://doi.org/gjv7xt>
- Rolf, W., Peters, D., Lenz, R., & Pauleit, S. (2018). Farmland – an Elephant in the Room of Green Infrastructure? Lessons learned from connectivity analysis in three German cities. *Ecological Indicators*, 94(2), 151-163. doi:<https://doi.org/gm924q>
- Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE*, 36(109), 35-62.
- Rueda, I. (2020). *Un anillo verde para el Área Metropolitana de Concepción. Propuesta de infraestructura verde en base a criterios geográficos*. Concepción, Chile: Tesis para optar al grado de Magíster en Análisis Geográfico. Universidad de Concepción, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Departamento de Geografía. Obtenido de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/6210>
- Sandoval, G. (2016). *Propuesta de corredores verdes potenciales en el paisaje metropolitano de Santiago de Chile mediante una modelación en sistemas de información geográfica*. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.
- Saura Martínez de Toda, S. (2013). Métodos y herramientas para el análisis de la conectividad del paisaje y su integración en los planes de conservación. En M. De la Cruz, & F. T. Maestre, *Avances en el Análisis Espacial de Datos Ecológicos: Aspectos Metodológicos y Aplicados* (págs. 1-45). Móstoles: ECESPA- Asociación Española de Ecología Terrestre. Obtenido de <https://bit.ly/3QfIGFL>
- Schuett-Hames, J., Robb, L., & McRae, B. (2013). Addendum Overview: Centrality, Pinch-Point, and Barrier and Restoration Analyses. En *Columbia plateau Ecoregion connectivity analysis addendum: Habitat connectivity centrality, pinch-points, and barriers / restoration Analyses*. Obtenido de [https://wacconnected.org/cp\\_addendumanalyses/](https://wacconnected.org/cp_addendumanalyses/)

- Shen, Z., Wu, W., Chen, M., Tian, S., & Wang, J. (2021). Linking Greenspace Ecological Networks Optimization into Urban Expansion Planning: Insights from China's Total Built Land Control Policy. *Land*, *10*, 1046. doi:<https://doi.org/gnk8mt>
- Shi, X., & Qin, M. (2018). Research on the Optimization of Regional Green Infrastructure Network. *Sustainability*, *10*(12), 4649. doi:<https://doi.org/h64h>
- Shi, X., Qin, M., Li, B., & Zhang, D. (2021). A Framework for Optimizing Green Infrastructure Networks Based on Landscape Connectivity and Ecosystem Services. *Sustainability*, *13*(18), 10053. doi:<https://doi.org/h64j>
- Sierralta, L., Serrano, R., Rovira, J., & Cortés, C. (2011). *Las áreas protegidas de Chile*. Santiago: División de Recursos Naturales Renovables y Biodiversidad Ministerio del Medio Ambiente.
- Soille, P., & Vogt, P. (2008). Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, *30*, 546-459. doi:<https://doi.org/dvgwpm>
- Sütüncü, H. S. (2021). Detecting Barriers Between Protected Areas to Restore Ecological Connectivity. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, *11*(2), 355-369. doi:<https://doi.org/h665>
- Taylor, P., Fahrig, L., & With, K. (2006). Landscape connectivity: A return to the basics. En K. R. Crooks, & M. Sanjayan, *Connectivity Conservation* (págs. 29-43). Cambridge: Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/d7rr8t>
- Tischendorf, L., & Fahrig, L. (2000). On the Usage and Measurement of Landscape. *Oikos*, 7-19. doi:<https://doi.org/c2t59h>
- Ubilla, G., Sepúlveda, N., Robles, R., & Núñez, C. (2014). *Política Pública Regional de Áreas Verdes, Región Metropolitana de Santiago*. Santiago: Gobierno Regional Metropolitano de Santiago.
- Unesco. (1985). *La Ciudad del año 2.000*.
- Urban, D., & Keitt, T. (2001). Landscape connectivity: A Graph-Theoretic Perspective. *Ecology*, *82*(5), 1205-1218. doi:<https://doi.org/fk57sf>
- Valdés, A. (2011). Modelos de paisaje y análisis de fragmentación: de la biogeografía de islas a la aproximación de paisaje continuo. *Ecosistema*, 11-20. Obtenido de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/19/13>
- Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 63-86. doi:<https://doi.org/gg3rfx>
- Vera, L., Silva, A., Parada, F., Cattaneo, F., Cartoni, S., & Cosio, F. (2012). Bases territoriales para el diseño y construcción del Parque Ecocultural Quebrada Verde. Valparaíso, Chile. *Proyección*, *12*. Obtenido de <https://bdigital.uncu.edu.ar/fichas.php?idobjeto=13475>
- Vila, J., Varga, D., Llausàs, A., & Ribas, A. (2006). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía.

- Documents d'anàlisi geogràfica*, 151-166. Obtenido de <https://raco.cat/index.php/DocumentsAnalisi/article/view/72657/82967>
- Vogt, P. (2022). MSPA Guide. EUROPEAN COMMISSION. Obtenido de [https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/gtb/GTB/MSPA\\_Guide.pdf](https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/gtb/GTB/MSPA_Guide.pdf)
- Vogt, P., & Riitters, K. (2017). GuidosToolbox: universal digital image object analysis. *European Journal of Remote Sensing*. Obtenido de <https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/activities/lpa/gtb/>
- Washington Wildlife Habitat Connectivity Working Group. (s.f.). Chapter 3. Network Centrality, Pinch.
- Xu, F., Yin, H. W., Kong, F. H., & Xu, J. G. (2015). Developing ecological networks based on mspa and the least-cost path method: A case study in bazhong western new district. *Acta Ecologica Sinica*, 35. doi:<https://doi.org/gqbtmd>
- Xu, J., Wang, J., Xiong, N., Chen, Y., Sun, L., Wang, Y., & An, L. (2022). Analysis of Ecological Blockage Pattern in Beijing Important Ecological Function Area. *Remote Sensing*, 14(5), 1151. doi:<http://dx.doi.org/10.3390/rs14051151>

## ANEXOS

*Anexo 1. Significado de la segmentación del Análisis morfológico de patrones espaciales a nivel ecológico y de píxel.*

| <b>Clase de patrón</b>           | <b>Significado ecológico</b>  | <b>Descripción píxeles</b>  |
|----------------------------------|---|---|
| <b>Parche central/ Core</b>      | Grandes parches de hábitat que pueden servir como áreas de origen y proporcionar hábitats o lugares de migración para la vida silvestre   | Los píxeles cuya distancia al fondo es mayor que un umbral predefinido  |
| <b>Islote / Islet</b>            | Pequeñas manchas que están débilmente conectadas entre sí, proporcionando un lugar para que las especies se extiendan y se comuniquen y promoviendo el flujo de materia y energía       | Los pequeños componentes aislados que no contienen ningún píxel central   |
| <b>Perforación / Perforation</b> | Zona de transición entre la zona central y la zona de paisaje no verde: el borde de la mancha interna, que tiene efectos de borde   | Los píxeles del límite interior cuya distancia a los píxeles del núcleo es inferior o igual al umbral predefinido |
| <b>Borde/ Edge</b>               | Zona de transición entre la zona central y la zona de paisaje no verde: tiene un efecto de borde y protege el proceso ecológico de la zona central                                      | Los píxeles del límite exterior cuya distancia a los píxeles del núcleo es inferior o igual al umbral predefinido |
| <b>Puente/ Bridge</b>            | Corredor de conexión de la zona central adyacente; proporciona las vías necesarias para la difusión de especies y el intercambio de energía entre parches adyacentes de zonas centrales | Los píxeles que emanan de dos o más componentes conectados al núcleo  |
| <b>Bucle/ Loop</b>               | Conecta corredores dentro de la misma zona del núcleo para dar acceso a la difusión de especies tal intercambio de energía dentro de la misma mancha de núcleo                          | Los píxeles que emanan del mismo componente conectados al núcleo  |
| <b>Rama / Branch</b>             | Sólo un lado está conectado a un borde, puente, bucle o perforación   | Los píxeles que emanan de los límites (borde o perforación) o de los conectores (puente o bucle)                  |

Fuente: elaborado a partir de An et al. (2021) y Lin et al. (2021).

*Anexo 2. Representatividad de los parches centrales seleccionados*

| <b>Parches<br/>centrales</b>                            | <b>Todos los espacios</b>     |           |                 |                |
|---|-------------------------------|-----------|-----------------|----------------|
|   | Superficie<br>km <sup>2</sup> | Polígonos | %<br>superficie | %<br>polígonos |
| <b>Core<br/>seleccionados</b>                           | 765,54                        | 570,00    | 99,1            | 36,6           |
| <b>Core iniciales</b>                                   | 772,84                        | 1556,00   |                 |                |
| <b>Áreas verdes y espacios naturales</b>                |                               |           |                 |                |
|   | Superficie<br>km <sup>2</sup> | Polígonos | %<br>superficie | %<br>polígonos |
| <b>Core<br/>seleccionados</b>                           | 484,03                        | 246       | 99,1            | 26,5           |
| <b>Core iniciales</b>                                   | 488,33                        | 927       |                 |                |
| <b>Áreas verdes y espacios silvoagropecuarios</b>       |                               |           |                 |                |
|   | Superficie<br>km <sup>2</sup> | Polígonos | %<br>superficie | %<br>polígonos |
| <b>Core<br/>seleccionados</b>                           | 279,39                        | 331       | 98,9            | 48,1           |
| <b>Core iniciales</b>                                   | 282,50                        | 688       |                 |                |
| <b>Espacios naturales y espacios silvoagropecuarios</b> |                               |           |                 |                |
|   | Superficie<br>km <sup>2</sup> | Polígonos | %<br>superficie | %<br>polígonos |
| <b>Core<br/>seleccionados</b>                           | 744,05                        | 508       | 99,2            | 37,5           |
| <b>Core iniciales</b>                                   | 750,04                        | 1356      |                 |                |

Fuente: elaboración propia (2022).

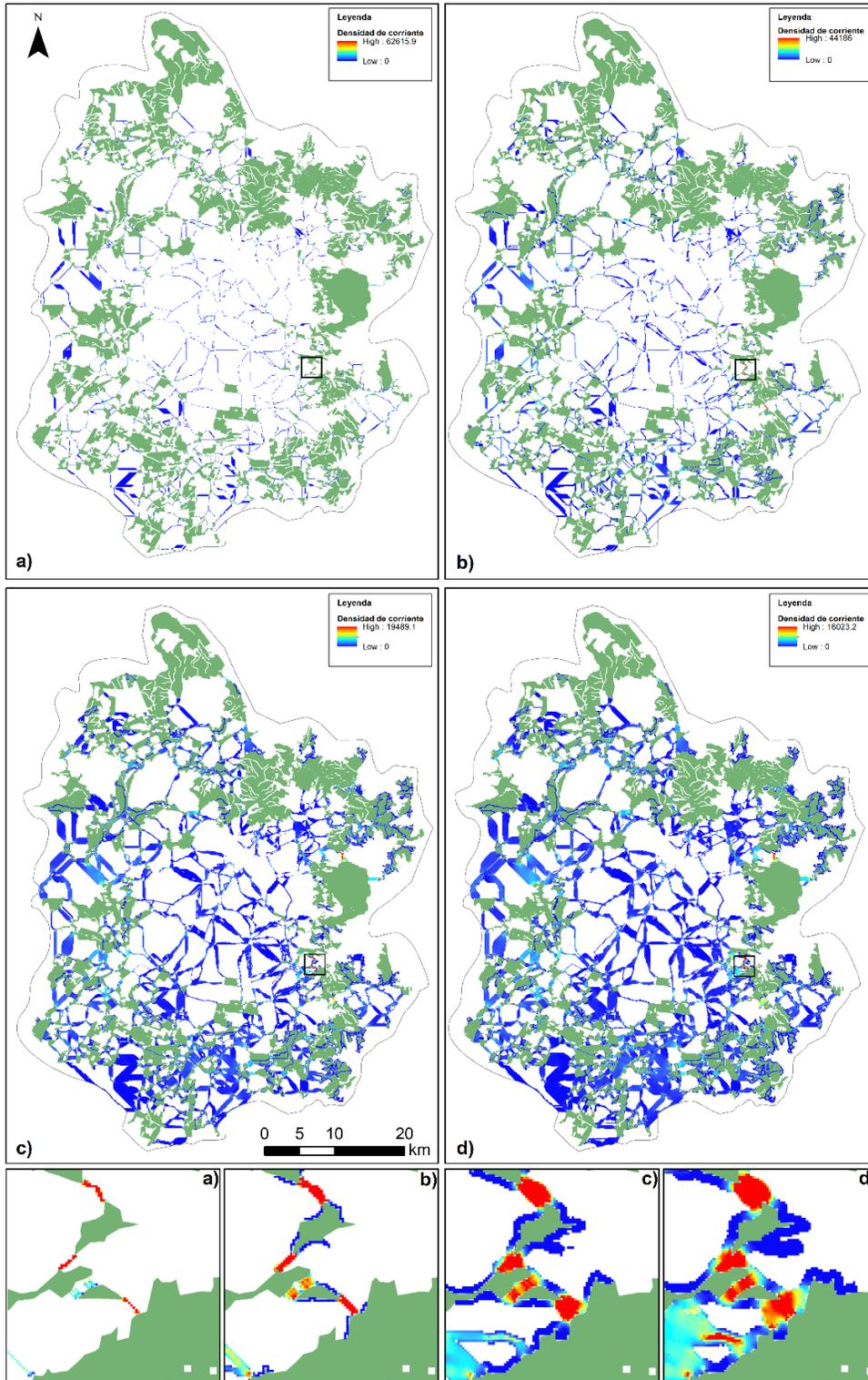
*Anexo 3. Valores de superficie de costo para las capas de resistencia.*

| <b>Capa de resistencia</b>        | <b>Descripción</b>                             | <b>Valor de resistencia (1-100)</b> |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| <b>MSPA</b>                       | Core   | 1                                   |
|                                   | Islet  | 15                                  |
|                                   | Perforation                                    | 80                                  |
|                                   | Edge   | 30                                  |
|                                   | Loop   | 30                                  |
|                                   | Bridge   | 10                                  |
|                                   | Branch   | 30                                  |
|                                   | Background                                     | 100                                 |
| <b>Espacios verdes existentes</b> | No hay espacios verdes                         | 90                                  |
|                                   | No consolidado                                 | 50                                  |
|                                   | Consolidado                                    | 5                                   |
|                                   | Muy consolidado                                | 1                                   |
|                                   | Sin información                                | 70                                  |
| <b>Densidad de viviendas</b>      | No hay viviendas                               | 1                                   |
|                                   | 0 - 25.2623                                    | 20                                  |
|                                   | 25.2623 - 73.5895                              | 40                                  |
|                                   | 73.5895 - 162.331696                           | 60                                  |
|                                   | 162.331696 - 427.342804                        | 80                                  |
|                                   | 427.342804 - 1556.9823                         | 100                                 |
| <b>Cobertura y usos de suelo</b>  | Vega   | 1                                   |
|                                   | Humedal  | 1                                   |
|                                   | Bosque y renoval nativo                        | 1                                   |
|                                   | Espacios abiertos con escasa a nula vegetación | 1                                   |
|                                   | Matorral                                       | 1                                   |
|                                   | Matorral arborescente                          | 1                                   |
|                                   | Matorral con suculentas                        | 1                                   |
|                                   | Matorral de espino                             | 1                                   |
|                                   | Río  | 1                                   |
|                                   | Matorral andino                                | 1                                   |
|                                   | Cuerpo de agua                                 | 3                                   |
|                                   | Embalse  | 3                                   |
|                                   | Laguna   | 3                                   |
|                                   | Glaciar  | 3                                   |
| Parque                            | 5  |                                     |

|   |     |
|---|-----|
| Cementerio                                    | 10  |
| Tierra vacante                                | 10  |
| Área deportiva                                | 50  |
| Asentamiento menor                            | 50  |
| Cultivos anuales                              | 50  |
| Frutales                                      | 50  |
| Otras plantaciones                            | 50  |
| Parcela de agrado                             | 50  |
| Parronal                                      | 50  |
| Plantación de eucaliptus                      | 50  |
| Vertedero                                     | 50  |
| Viñedo  | 50  |
| Centro nuclear                                | 50  |
| área de pastoreo intensivo                    | 75  |
| Actividad minera en superficie                | 100 |
| Aeropuerto y aeródromo                        | 100 |
| Área mayoritariamente residencial baja altura | 100 |
| Área mayoritariamente residencial gran altura | 100 |
| Autopista                                     | 100 |
| Centro comercial e hipermercado               | 100 |
| Extracción de áridos en cantera               | 100 |
| Extracción de áridos en pozo                  | 100 |
| Parque industrial                             | 100 |
| Planta de tratamiento de aguas                | 100 |
| Relleno sanitario                             | 100 |
| Tranque de relave                             | 100 |
| Sitio en construcción                         | 100 |
| Terminal de combustible                       | 100 |
| Zona de negocios y/o institucional            | 100 |

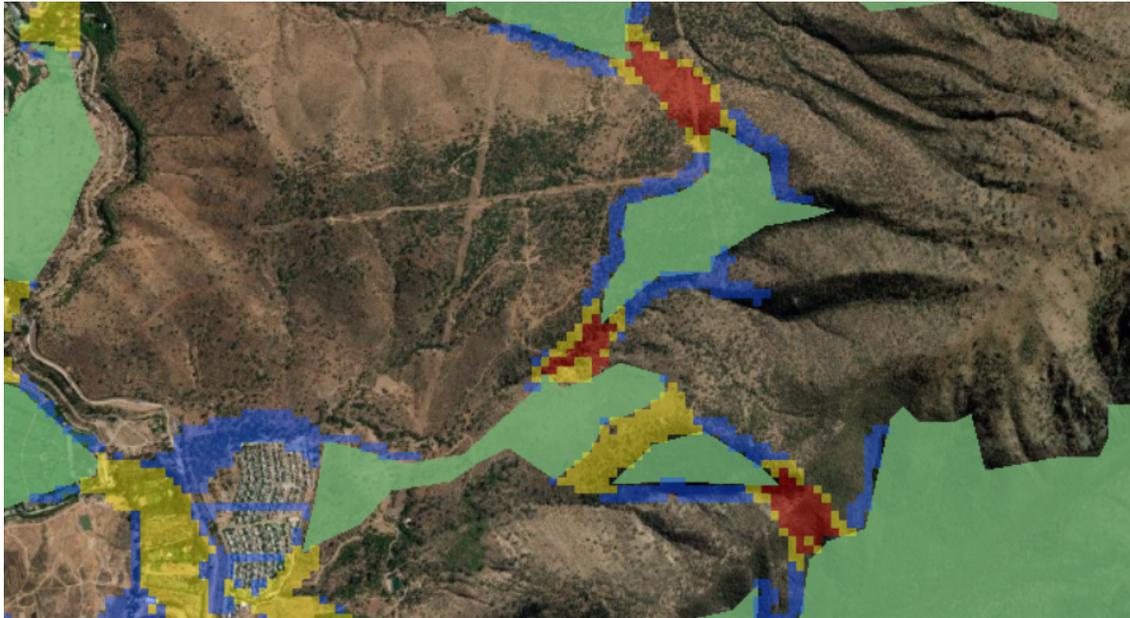
Fuente: elaboración propia a partir de Shi & Qin (2018); Liu, Z. et al. (2020); Liu, Y. et al. (2022) y MMA - ONU Medio Ambiente (2020).

**Anexo 4.** Pinch Point método "todo a uno" para anchura de corredor a) 1 km; b) 5 km; c) 20 km y d) 30 km.



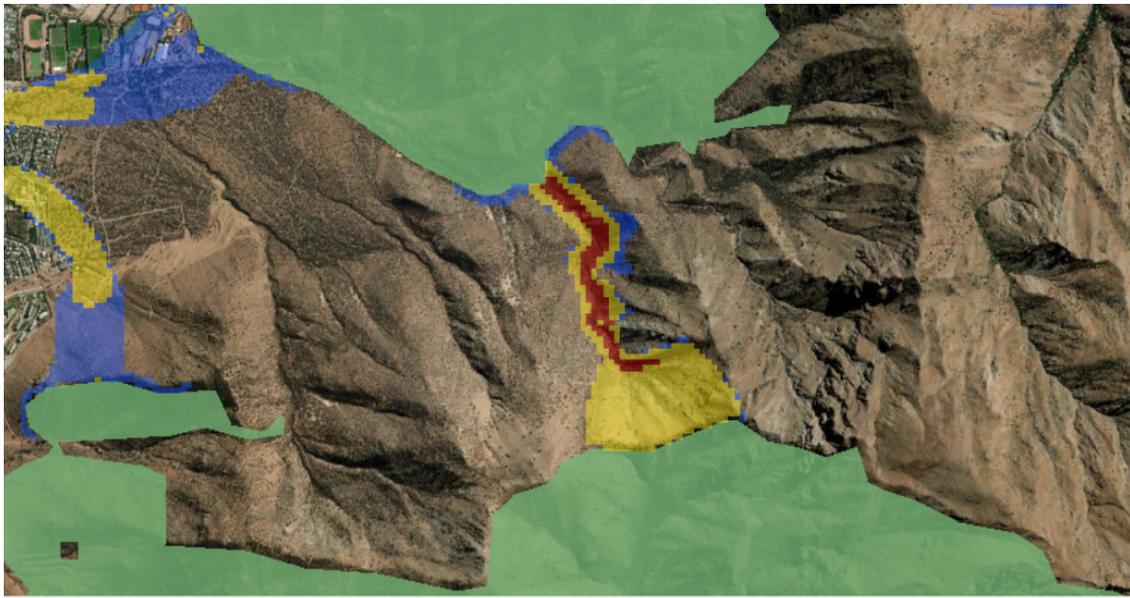
Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 5. Bosque Panul*



Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 6. Mirador la Roca de Parque Natural San Carlos de Apoquindo*



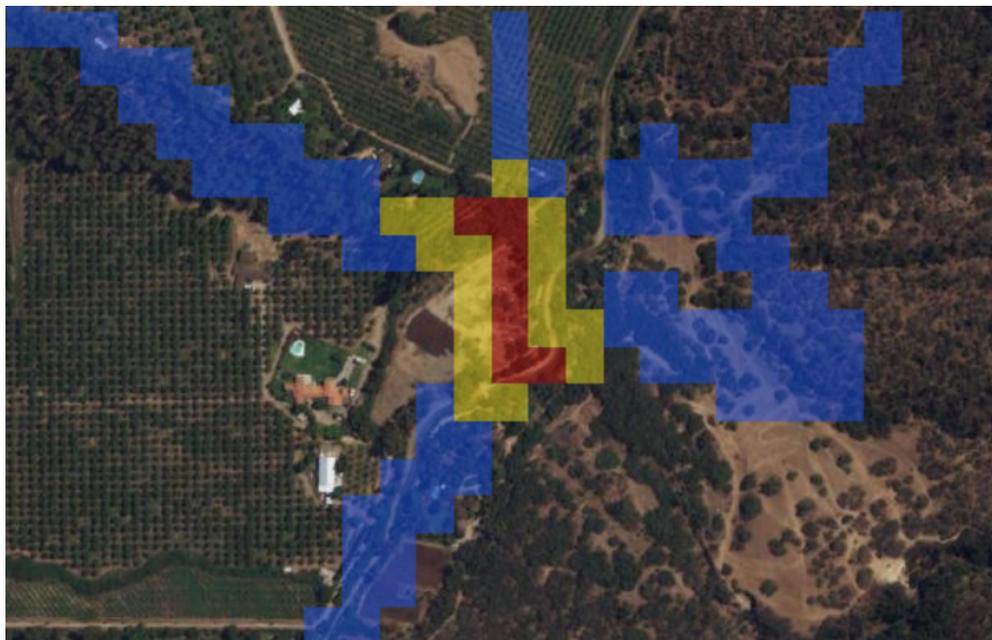
Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 7. Espacio silvoagropecuario cercano a Estero Colina, Lampa.*



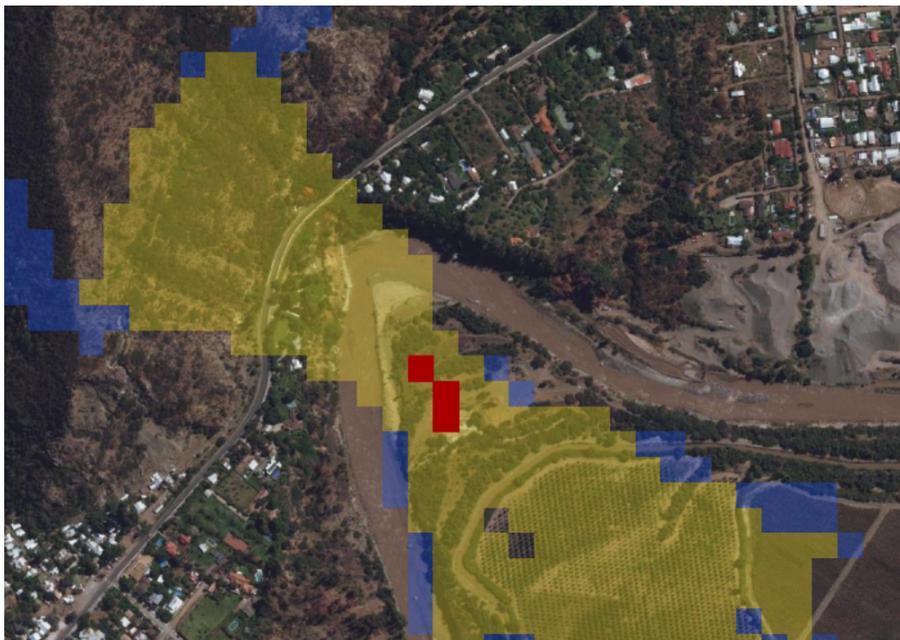
Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 8. Espacio natural en Pirque.*



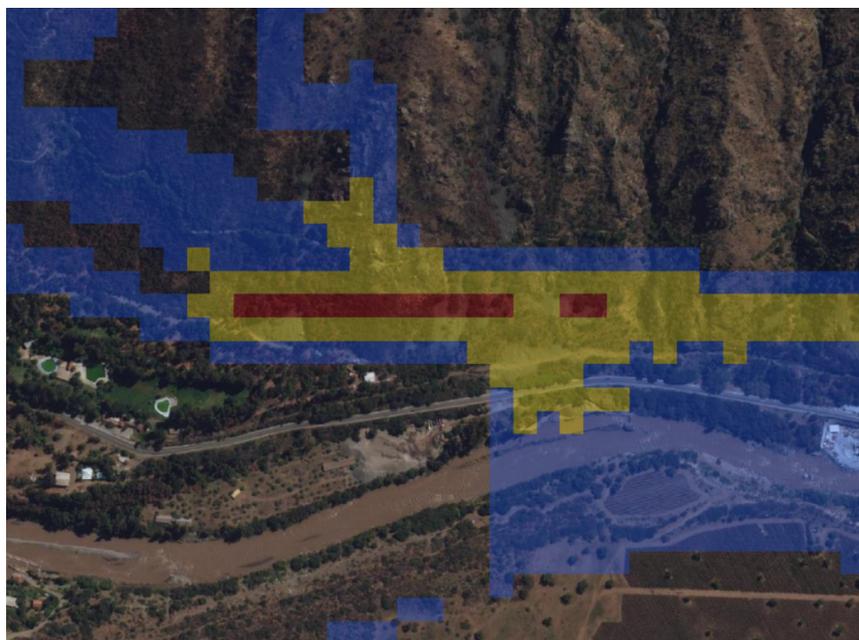
Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 9. Espacio natural, Río Maipo. Pirque.*



Fuente: elaboración propia (2022).

*Anexo 10. Espacio natural, Quebrada el Toro, Camino al Volcán, San José de Maipo.*



Fuente: elaboración propia (2022).