

Evaluación de la infraestructura verde y conectividad ecológica

en el cantón de Curridabat



Curridabat
CIUDAD DULCE



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Créditos

MUNICIPALIDAD DE CURRIDABAT

Planteamiento Estratégico

Alicia Borja- Alcaldesa 2018-2020

Irene García- Gerente de Despacho de Alcaldía

Consejo Municipal 2016-2018

Hernán Masis- Presidente

Carlos Mena- Vicepresidente

Elaboración técnica:

Lenin Corrales

Christian Brenes

Julie Betbeder

Emily Fung

Unidad de Modelado Ecosistémico

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)

Revisión técnica:

Irene García

Alejandro Muñoz

José Manuel Retana

Municipalidad de Curridabat

Fotografías:

Lenin Corrales

Citar como:

Municipalidad de Curridabat .2019. Evaluación de la infraestructura verde y conectividad ecológica en el cantón de Curridabat. Curridabat-Costa Rica

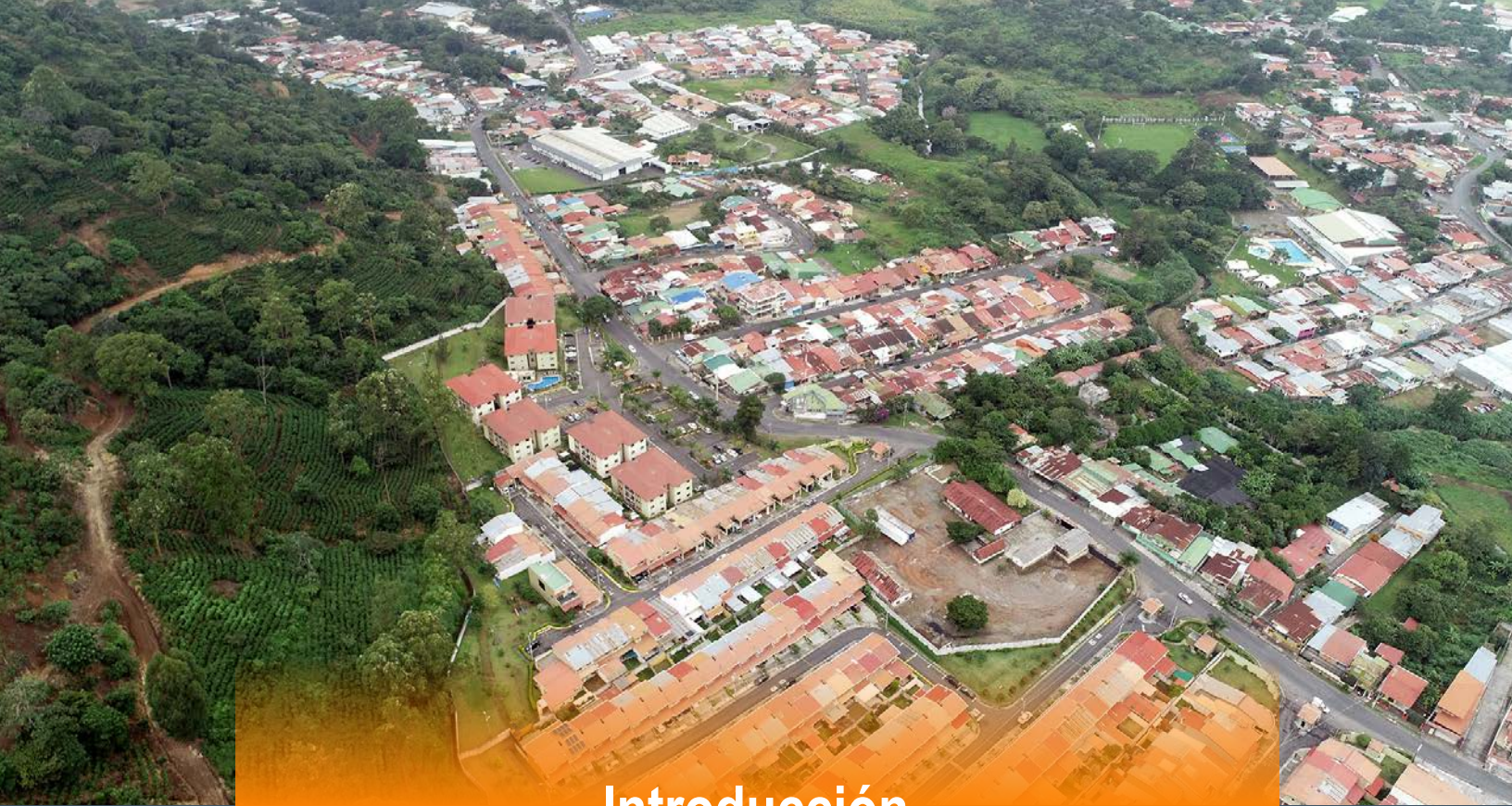
Esta investigación fue desarrollada por la Unidad de Modelado Ecosistémico del Programa de Bosques, Biodiversidad y Cambio Climático del CATIE en conjunto con el Centro de Inteligencia Territorial de la Municipalidad de Curridabat a través de la Gerencia de Despacho. La Unidad de Modelado está enfocada en la investigación y la asistencia técnica sobre el efecto del cambio global en los ecosistemas, servicios ecosistémicos e implicaciones para la sociedad latinoamericana, mediante el desarrollo y la aplicación de herramientas de modelado biofísico y socioeconómico dirigidas a apoyar la planificación de toma de decisiones y la gestión de proyectos para mitigación y adaptación a la variabilidad y el cambio climático.





Índice

Introducción	4
Vegetación urbana	6
Infraestructura verde	9
Análisis de conectividad ecológica funcional	18
Definición de las redes ecológicas	19
Contribución de la infraestructura verde a la conectividad ecológica en el cantón	22
Conclusiones	29
Referencias	30
Anexos	31



Introducción

A medida que ocurre el crecimiento de la población y los modelos económicos sirven como mecanismo de empuje de la migración rural a los centros urbanos, el proceso de urbanización plantea importantes presiones ambientales, sociales y ecológicas, que representan una gran amenaza para la biodiversidad. Sin embargo, las zonas urbanas son muy heterogéneas, con algunos espacios verdes (por ejemplo, bosques ribereños, bosques urbanos, parques, jardines privados, etc.) que proporcionan recursos y un refugio para las comunidades de vida silvestre¹.

Curridabat como cantón urbano comparte las características claves de cualquier ciudad del planeta; es el hogar de muchas personas, está cubierta por edificios, instalaciones productivas, infraestructura y tráfico, donde ocurren múltiples actividades económicas y culturales, pero a la vez los ciudadanos dependen del mismo capital natural presente para satisfacer las necesidades de aire fresco, agua potable, suelo y posibilidades de recreación, servicios que son obtenidos de los espacios naturales remanentes en la ciudad².

¹ MacGregor I., et al. (2016)

² Haase, D. (2015)

La presencia de vegetación urbana es esencial ya que cumple varias funciones, pero su papel principal está relacionado con el mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes ya que puede ajustar las condiciones microclimáticas, limpiar los contaminantes del aire, reducir el polvo, amortiguar el ruido y mantener el equilibrio ecológico, además de servir para fines estéticos, recreativos y educativos³ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Beneficios de la vegetación urbana

Categoría	Beneficio
Para los habitantes de la ciudad	Salud física
	Salud psicológica
	Cohesión social
Para el balance natural	Biodiversidad
	Regulación térmica
	Calidad del aire
	Drenaje del agua
Para la economía	Optimización construcción en la ciudad
	Turismo y atractivo urbano

Fuente: Laille P et al (2013)

La vegetación urbana se refiere a todos los tipos de plantas que crecen en ambientes urbanos, la cual puede ser clasificada de diversas formas, por ejemplo; comunidades naturales (o remanentes) las cuales existían antes de la urbanización, comunidades de plantas arvenses que ocupan nuevos hábitats urbanos y espacios verdes artificiales. Otra forma de ver la vegetación urbana es como plantas nativas, plantas naturalizadas o plantas introducidas⁴.

El presente reporte describe la vegetación urbana del cantón de Curridabat a partir de una interpretación de imágenes de sensores remotos a una resolución de 30 cm (WorldView-3®) basada en tres sistemas de clasificación; la primera como *vegetación urbana*; la segunda como *infraestructura verde*; y la tercera como *hábitats vegetales* para las aves. Además, el reporte presenta un análisis de conectividad ecológica en el cantón utilizando como base el paradigma ecológico mosaico-tesela-corredor.

3 Gaoming J. and Wenjing B. (2012)

4 Gaoming J. and Wenjing B. (2012)



Vegetación urbana

La vegetación urbana del cantón de Curridabat se definió como *la organización de elementos espaciales y nodales que se entrelazan entre sí con presencia de vegetación desarrollada por acción natural o creada por el ser humano que impulsa el cultivo de las plantas con algún fin, y que son parte de la estructura de la ciudad*. Sumado a lo anterior se estableció a la vez como **infraestructura gris** al conjunto de objetos no vivos construidos por el ser humano y visibles en un mapa⁵.

La Figura 1 muestra la distribución espacial de la vegetación urbana en el cantón de Curridabat. El 47,3% del cantón corresponde a vegetación (Cuadro 2). El distrito con la mayor cobertura de vegetación del cantón es Sánchez con un 37,3%, seguido de Curridabat y Granadilla con valores de 25,5% y 25,2% respectivamente, mientras que el distrito de Tirrases es el que presenta menor proporción de vegetación con 12,1% en relación a la extensión de total de vegetación en el cantón (Cuadro 3).

5 Kappelle et al. 2003

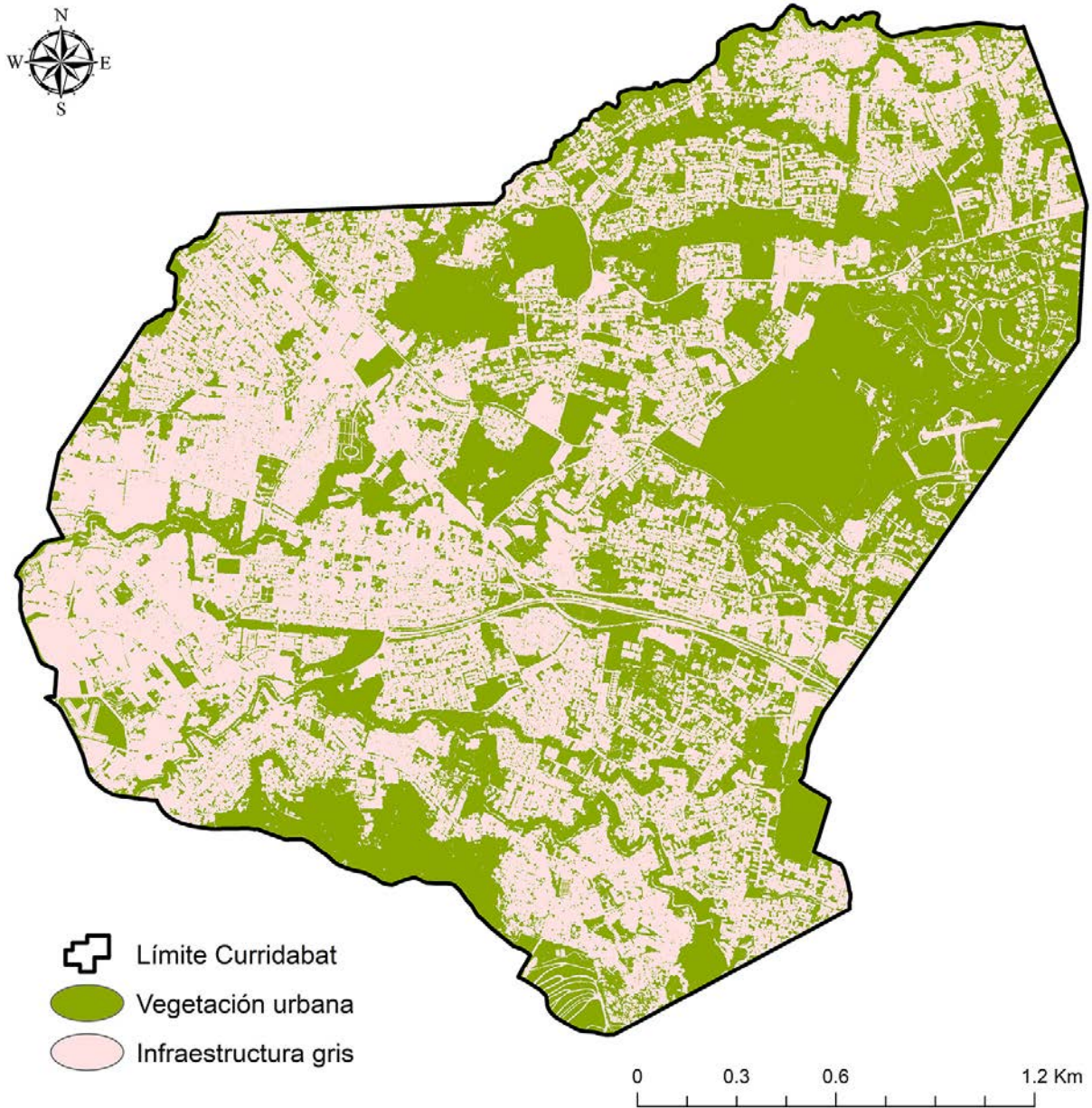


Figura 1. Vegetación urbana del cantón de Curridabat (2019)

Cuadro 2. Cobertura de trama gris y verde en el cantón de Curridabat 2019

Cobertura	Superficie (has)	%
Infraestructura gris	854,1	52,7
Vegetación urbana	765,3	47,3
	1.619,4	100,0

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3. Cobertura de infraestructura gris y vegetación por distrito en el cantón de Curridabat 2019

Cobertura	Superficie (has)				%			
	Curridabat	Granadilla	Sánchez	Tirrases	Curridabat	Granadilla	Sánchez	Tirrases
Infraestructura gris	418,9	168,1	171,9	95,2	68,2	46,6	37,6	50,7
Vegetación	195,0	192,6	285,2	92,5	31,8	53,4	62,4	49,2
% V/cantón	25,5	25,2	37,3	12,1				

Fuente: Elaboración propia





Infraestructura verde

Tradicionalmente la infraestructura en una ciudad incluía solo los activos artificiales, sin embargo, fue a partir de los años ochenta que empezaron a surgir movimientos para que los ecosistemas naturales también fueran considerados como un tipo de infraestructura. El objetivo de este enfoque consiste en que los ecosistemas sanos, además de mantener la biodiversidad, proporcionan bienes y servicios esenciales para permitir, mantener o mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la ciudad⁶.

El primer término utilizado para referirse a los ecosistemas como infraestructura fue “infraestructura ecológica” y fue propuesto en 1984 por 59 científicos de 24 países participantes en una de las reuniones técnicas del Programa Hombre y la Biosfera (MAP) sobre planificación urbana. Más tarde en los años noventa, el término infraestructura ecológica se utilizó de manera intercambiable con otros términos, tales como vías verdes, redes ecológicas, corredores, corredores de conservación y módulos de uso múltiple, para representar la planificación de la conservación a nivel de paisaje.

6 Da Silva J., Wheeler E. (2017)

No obstante, el término de “infraestructura verde” fue utilizado por primera vez en 2004 por la Comisión de Vías Verdes de Florida, el cual en un informe al gobernador de Florida se enfatizó que la integración de las áreas de conservación del estado en un sistema interconectado que forma una infraestructura verde es tan importante para la conservación y la gestión como la infraestructura construida⁷.

En la actualidad el concepto de infraestructura verde se encuentra adoptado en la literatura científica y en las políticas de países como los Estados Unidos y la Comunidad Europea. Estos Gobiernos toman el concepto de ecosistema como infraestructura, convirtiéndolo en una poderosa metáfora para integrar los a las diferentes agendas políticas (por ejemplo, mitigación y adaptación al clima, conservación de la biodiversidad, planificación urbana, producción y consumo sostenible) en todas las escalas espaciales y de gobierno e integrar la conservación de la naturaleza en los esfuerzos de desarrollo humano⁸.

La infraestructura verde como principio de diseño en una ciudad, puede ser utilizada en cualquier escala espacial ya que: (a) permite el diseño holístico con participación activa y presentada estratégicamente; (b) estar conectada y gestionada de manera integrada; (c) ser representativa, persistente, eficiente y flexible; (d) ser multifuncional; y (e) ser financiado por adelantado como inversión pública⁹.

Desde otra óptica la infraestructura verde es una herramienta integradora de soluciones basadas en la naturaleza orientada a la protección del capital natural. Se trata de “evitar la dependencia de infraestructuras cuya construcción es costosa cuando a menudo la naturaleza puede aportar soluciones más económicas y durables, muchas de las cuales crean oportunidades de empleo local.”¹⁰.

En atención al alto crecimiento urbano en Curridabat y al objetivo de recuperación de servicios ecosistémicos a través del establecimiento de redes verdes urbanas, incorporamos en la interpretación de los espacios verdes del cantón el concepto de infraestructura verde. El concepto de infraestructura verde se entiende como *una red capaz de dotar al sistema urbano de elementos e ingredientes capaces de resolver los problemas urbanos abordando los desafíos del cambio climático, mediante la interacción activa del medio construido con lo natural, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad.*

La interpretación de la infraestructura verde del cantón busca como objetivos:

- Reducir la fragmentación y la vulnerabilidad de los hábitats naturales y de los hábitats de las especies
- Identificar y conectar los espacios importantes para la preservación de la biodiversidad
- Promover la conservación de las especies migratorias
- Contribuir a enfrentar los desafíos del cambio climático
- Mejorar la calidad de la diversidad del paisaje urbano para lograr mayor bienestar de los habitantes del cantón

7 Da Silva J., Wheeler E. (2017)





8 Da Silva J., Wheeler E. (2017) y Comisión Europea (2013)

9 Da Silva J., Wheeler E. (2017)


10 Comisión Europea. (2013)


Como parte del proceso de definición y posteriormente la identificación de la infraestructura verde del cantón, se definieron 19 tipos (Cuadro 4) de los cuales 11 pudieron ser interpretados en un mapa a partir de imágenes de sensores remotos (Figura 2).

Cuadro 4. Componentes de la infraestructura verde definidos para el cantón de Curridabat.

Componentes	Definición	Foto
Espacios públicos y otros elementos ligados al tejido urbano		
Parques municipales y bosques urbanos (≥ 3 ha-75 has)	Grandes parques urbanos o municipales con una variedad de cubierta terrestre y, al menos, parcialmente equipados con instalaciones para el tiempo libre y la recreación.	
Parques municipales y bosques urbanos (> 0.5 ha < 3 has)	Parques municipales con tamaño de 0,5 a 3,0 has equipados con instalaciones para la recreación/tiempo libre	
Parques y jardines pequeños con árboles (< 0.5 has)	Parques municipales con tamaños menores a 0,5 has equipados con instalaciones para la recreación/tiempo libre y jardines y áreas verdes privados	
Espacios naturales / forestales		
Bosques y arbolados periurbanos	Masas boscosas que se encuentran o rodean la ciudad y que pueden suministrar beneficios provenientes de la naturaleza	

Componentes	Definición	Foto
Bosques y arbolados en la ribera de los ríos	Masas ocupadas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de los cursos de agua permanentes o temporales	
Espacios agrícolas		
Huertos urbanos	Espacios diversos destinados a la práctica de la agricultura, la siembra de flores, hortaliza, plantas aromáticas, hierbas medicinales y frutales a nivel habitacional y comunitario.	
Cafetales arbolados	Finca agrícola con una estructura vegetativa variada tomando en cuenta diversos estratos arbóreos (Por ejem: cafetales arbolados)	
Elementos lineales y de conexión		
Árboles en las calles o espacios lineales	Avenidas, calles y líneas férreas arboladas a lo largo de sus orillas	
Aceras Dulces	Superficie a la orilla de la calle para uso de las personas que se desplazan andando donde se ha sembrado vegetación con planes definidos dándole énfasis a especies de flora que atraigan polinizadores	

Componentes	Definición	Foto
Cercas vivas	Líneas de vegetación que delimitan una propiedad	
Elementos puntuales		
Campos deportivos y recreativos	Recinto o construcción provista de los medios necesarios para el aprendizaje, la práctica y la competición de uno o más deportes con sustrato verde	
Cementerios verdes	Lugar utilizado para depositar los restos mortales con amplias zonas verdes	
Isletas de carreteras	Zonas en las carreteras para encausar o canalizar las corrientes de tráfico vehicular cubiertas de vegetación	
Jardines botánicos	Lugar donde se cultivan plantas para realizar estudios botánicos y para ser mostradas al público	

Componentes	Definición	Foto
Jardines de lluvia	Componentes de paisaje diseñadas para eliminar la contaminación, retener e infiltrar las aguas superficiales de escorrentía.	
Paredes verdes o jardín vertical	Instalación vertical cubierta de plantas de diversas especies que son cultivadas en una estructura o pared especial	
Pérgolas verdes	Armazón formado por hileras paralelas de columnas o pilares que soportan un techo de vigas y/o correas transversales o un enrejado, sobre el que se entrelazan plantas trepadoras	
Techos verdes	Cubierta ajardinada de un edificio que está parcial o totalmente cubierto de vegetación	
Terrenos baldíos	Terreno sin edificar o cultivar con o sin cobertura de vegetación tipo pasto	

La Figura 2 muestra la distribución espacial de la infraestructura verde en el cantón de Curridabat.

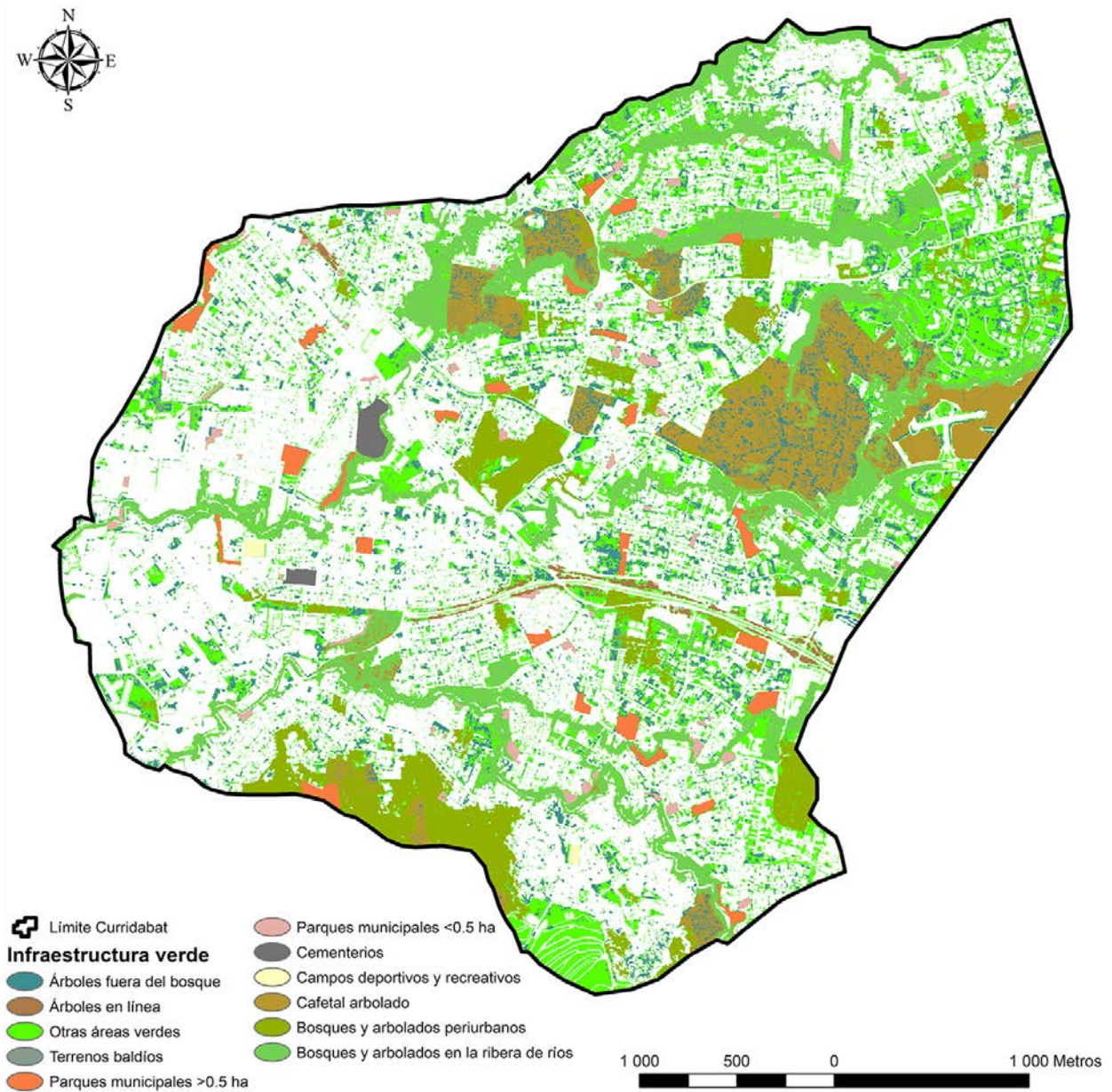


Figura 2. Infraestructura verde del cantón de Curridabat (2019)

La cobertura de infraestructura verde de mayor extensión en el cantón la constituyen la clase otras áreas verdes (15,9%), en segunda instancia se ubican los bosques y arbolados de la ribera de los ríos (10,0%) (Cuadro 5). Se reviste de importancia tomar en cuenta que los árboles aislados los cuales pueden ser componentes de varios tipos de infraestructura verde representados en la figura 2 representan una extensión de 110,4 hectáreas y que en el cantón todavía hay un remanente de vegetación con características ecológicas de bosque cercano a las 100 hectáreas, extensión que es igualada por los cafetales arbolados que aún permanecen en el cantón. A la vez, es importante destacar la importancia que tiene la infraestructura verde para el cantón como base de los servicios ecosistémicos para la población en general, en vista de que solamente 34 hectáreas de las 772,2 hectáreas totales son Parques de uso público.

En el Cuadro 6 se puede observar la extensión de la infraestructura verde por distrito, del cual se obtienen las siguientes conclusiones:

- a. El distrito Sánchez es el que presenta la mayor extensión en árboles aislados
- b. El distrito de Granadilla es el que presenta mayor cobertura en bosques y arbolados en la ribera de los ríos
- c. El distrito de Tirrasas es el que presenta la mayor extensión de la cobertura bosques y arbolados periurbanos
- d. El distrito de Curridabat es el que presenta mayor área en parques
- e. El distrito de Sánchez es el que presenta la mayor extensión de otras áreas verdes

Cuadro 5. Cobertura de infraestructura verde en el cantón de Curridabat (2019) -hectáreas-

Cobertura	Superficie	%
Otras áreas verdes	256,76	15,86
Bosques y arbolados en la ribera de ríos	162,39	10,03
Arboles aislados	110,36	6,81
Cafetal arbolado	93,82	5,79
Bosques y arbolados periurbanos	93,04	5,75
Parques municipales >0.5 ha	22,23	1,37
Parques municipales <0.5 ha	12,06	0,74
Terrenos baldíos	9,02	0,56
Árboles en línea	5,76	0,36
Cementerios	4,84	0,30
Campos deportivos y recreativos	1,95	0,12
TOTAL	772,2	47,7

Otras áreas verdes: isletas de carreteras, jardines, pérgolas verdes, aceras, relleno sanitario, áreas verdes de edificios, orillas de carreteras,

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6.

Cobertura infraestructura verde en el cantón de Curridabat por distrito (2019) –hectáreas–

Infraestructura verde	Curridabat	Sánchez	Granadilla	Tirrases
Árboles en línea	1,85	3,65	0,26	-
Árboles fuera del bosque	33,35	42,12	24,96	9,93
Bosques y arbolados en la ribera de ríos	38,56	49,02	66,29	8,52
Bosques y arbolados periurbanos	24,53	20,74	9,93	37,84
Cafetal arbolado	6,29	63,52	17,64	6,37
Campos deportivos y recreativos	0,98	0,34	0,09	0,55
Parques municipales <0.5 ha	6,26	2,10	3,06	0,64
Parques municipales >0.5 ha	10,35	7,88	2,37	1,65
Terrenos baldíos	2,56	2,61	3,07	0,78
Otras áreas verdes	69,67	95,02	65,33	26,74
Cementerios	4,84	-	-	-

Otras áreas verdes: isletas de carreteras, jardines, pérgolas verdes, aceras, relleno sanitario, áreas verdes de edificios, orillas de carreteras.

Fuente: *Elaboración propia*





Análisis de conectividad ecológica funcional

En el ambiente urbano la biodiversidad se encuentra bajo presión constante por parte de las actividades humanas ya sea debido a los procesos de expansión urbana o por la densificación de las redes de transporte. Estos procesos contribuyen a la reducción y fragmentación de los ya de por sí limitados hábitats naturales¹¹ remanentes en la ciudad. Por lo que conservar los flujos biológicos que aseguren la diversidad genética, y que permitan a las poblaciones mantener su capacidad de supervivencia frente a las presiones ambientales, se vuelve una tarea fundamental cuya respuesta consiste en lograr mantener la conectividad del paisaje como factor clave para la viabilidad de las poblaciones.

La necesidad de planificar el uso del suelo tomando en cuenta los flujos biológicos de las especies presentes en el paisaje ha llevado a la aparición del concepto de “redes ecológicas”, el cual es definido como *el conjunto espacial formado de núcleos de biodiversidad unidos por conexión biológica*¹². El concepto se liga estrechamente con la noción de conectividad paisajística, ya que la red simboliza la configuración espacial deseable para mantener los flujos biológicos, mientras que la conectividad es una *propiedad mensurable en un lugar determinado, esté o no presente una red*¹³.

¹¹ Forman, 1995

¹² Opdam et al., 2006

¹³ Girardet X. et Clauzel C.2018

Ante la imposibilidad de contener el proceso de crecimiento urbano, una de las preocupaciones fundamentales que surge en el campo de la planificación urbana y de la gestión de la ordenación del territorio es buscar el mejor balance entre el desarrollo residencial y el mantenimiento de la funcionalidad de las redes ecológicas. Para lograrlo, se deben implementar políticas de desarrollo del territorio tomando en consideración el patrimonio natural y la biodiversidad presentes en el cantón. Sin embargo, la literatura científica muestra que las relaciones entre lo urbano y los procesos ecológicos son complejas¹⁴.

Con el objetivo de ir incursionando en este tema, en Curridabat se implementó una metodología de análisis de conectividad utilizando los registros de las aves conocidas hasta ahora en el cantón (2019). Se siguieron las recomendaciones de Blair (1996) el cual establece que en estudios de conectividad en ciudades nos debemos centrar en las aves silvestres ya que son un taxón altamente móvil capaz de penetrar toda la matriz urbana.

Aunque en el presente trabajo solo se muestran los resultados de un análisis de conectividad con la cobertura ecológica actual, en un futuro es posible simular diferentes escenarios de urbanización probable para lograr medir su contribución al mantenimiento de las redes ecológicas de las especies objetivo.

Definición de las Redes Ecológicas

En la última década, se ha vuelto común modelar redes ecológicas y medir conectividad del paisaje desde una perspectiva operativa a través de la construcción de gráficos de paisaje¹⁵. Los gráficos de paisaje han sido uno de los enfoques más utilizados para modelar redes ecológicas y medir la conectividad del paisaje. Un gráfico de paisaje consiste en un conjunto de nodos (lugares de hábitat para una especie o grupo de especies) conectados por enlaces que representan caminos potenciales de viaje¹⁶.

Las interacciones entre organismos, estructuras construidas y el resto de ambiente físico en lugares donde la población humana se encuentra concentrada, como es el caso típico de ciudades, sigue un patrón de ordenamiento de mosaicos, teselas y corredores. En ella ocurren los flujos biofísicos, que comprenden procesos de distribución y dispersión de espacios, razón por la cual el análisis presentado en este reporte se apoya en el paradigma ecológico de *mosaico-tesela-corredor* y que utiliza la noción de infraestructura verde como herramienta para organizar el cuidado del capital natural y consecuentemente garantizar la provisión de bienes ecosistémicos en la ciudad¹⁷.

¹⁴ Czamanski et al., 2008; Tannier et al, 2012

¹⁵ Urban et al., 2009

¹⁶ Girardet X. et Clauzel C.2018

¹⁷ Lucio.2016

El análisis de conectividad inicia con la preparación de un mapa de hábitat ecológico (Figura 3-Cuadro 7) derivado del mapa de infraestructura verde (Figura 2). Como grupo de especies objetivo, se utiliza un inventario de aves del cantón de 179 especies y 4.643 registros. Cada especie de aves es caracterizada según su estado de conservación (Lista roja de la UICN. 2019; Lista de especies amenazadas de SINAC. 2017); distribución, tipo de migración que realiza, tipo de hábitat preferencial, dieta y peso, datos que son utilizados para calcular la capacidad de dispersión media¹⁸.

Cada categoría de hábitat es asociada con un valor de resistencia que representa el grado de dificultad que tienen los individuos para moverse libremente a través del espacio. De tal modo, el hábitat preferencial identificado según la especie y otras categorías que favorezcan el movimiento tiene valores mínimos de resistencia. Por otra parte, hábitats que presentan dificultad para que la especie se mueva presentan valores máximos de resistencia.

Una vez sistematizados todos los datos anteriores se utilizó el software Graphab®¹⁹ para realizar las corridas del modelo y obtener una serie de resultados relacionados con la probabilidad de conectividad en el cantón. La probabilidad de conectividad es la probabilidad de que dos individuos de la misma especie seleccionados al azar en el área de estudio se encuentren para hacer contacto.

El anexo 2 muestra los parámetros utilizados en la modelación de la conectividad con Graphab®.

Cuadro 7. Cobertura de hábitat ecológico para aves en el cantón de Curridabat –hectáreas y porcentaje-

Cobertura	Superficie	%
Infraestructura gris	854,1	52,7
Otras áreas verdes	272,2	16,8
Bosque ribereño	171,1	10,6
Árboles fuera del bosque	120,4	7,4
Bosque	98,3	6,1
Cafetales arbolados	93,9	5,8
Matorrales	9,4	0,6
Total	1.619,4	100,0

Fuente: Elaboración propia

18 Sutherland et al. 2000

19 Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., 2012

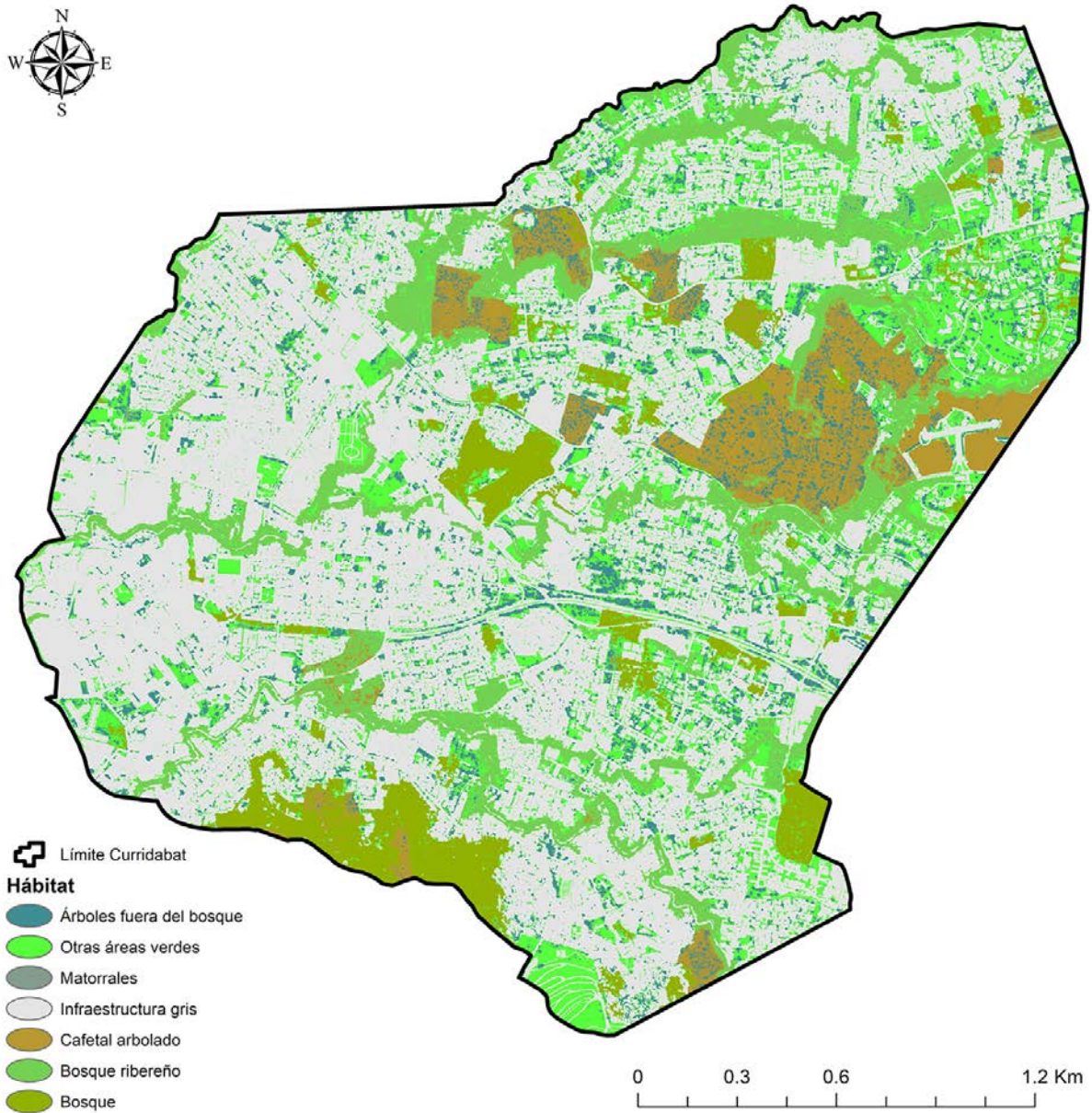


Figura 3. Hábitat ecológico del cantón de Curridabat (2019)

Contribución de la Infraestructura verde a la conectividad ecológica en el cantón

El resultado cartográfico de la probabilidad de conectividad global del cantón (Figura 4) muestra que los valores más altos de conectividad se observan hacia el este del cantón principalmente en los distritos de Sánchez y Granadilla, disminuyendo hacia el sur donde se encuentra el distrito de Tirrasés. En la parte oeste del cantón, principalmente lo cubierto por el distrito de Curridabat, presenta los valores más bajo de probabilidad de conectividad. Es importante notar que a pesar de que al sur del cantón se encuentra un importante remanente de bosque en el cerro La Colina, la conectividad en relación con el resto del cantón presenta valores más bajos.

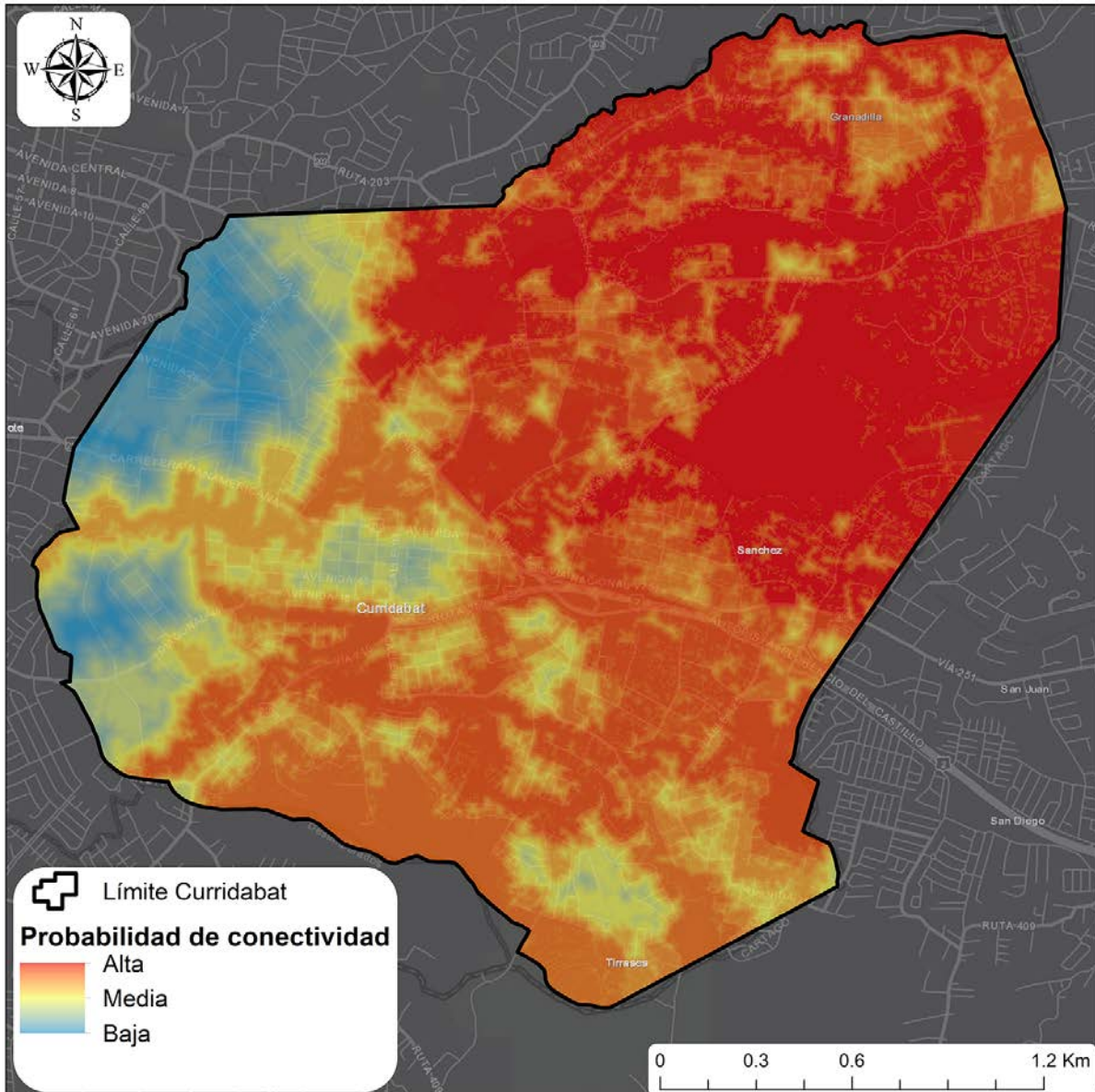


Figura 4. Probabilidad global de conectividad ecológica del cantón de Curridabat (2019).

La Figura 5 muestra la probabilidad de la conectividad de las especies que dependen principalmente de los bosques riparios. La mayor conectividad se presenta en la Quebrada Granadilla y en el área donde confluyen las Quebradas Granadilla, Mina y Poró. A nivel del río María Aguilar este presenta una conectividad media hacia el este del cantón y de media a baja hacia el oeste cuando el río recorre principalmente el distrito de Curridabat. El cuerpo de agua que presenta los valores más bajos de probabilidad de conectividad riparia es el río Tiribí prácticamente en todo su recorrido por el cantón.

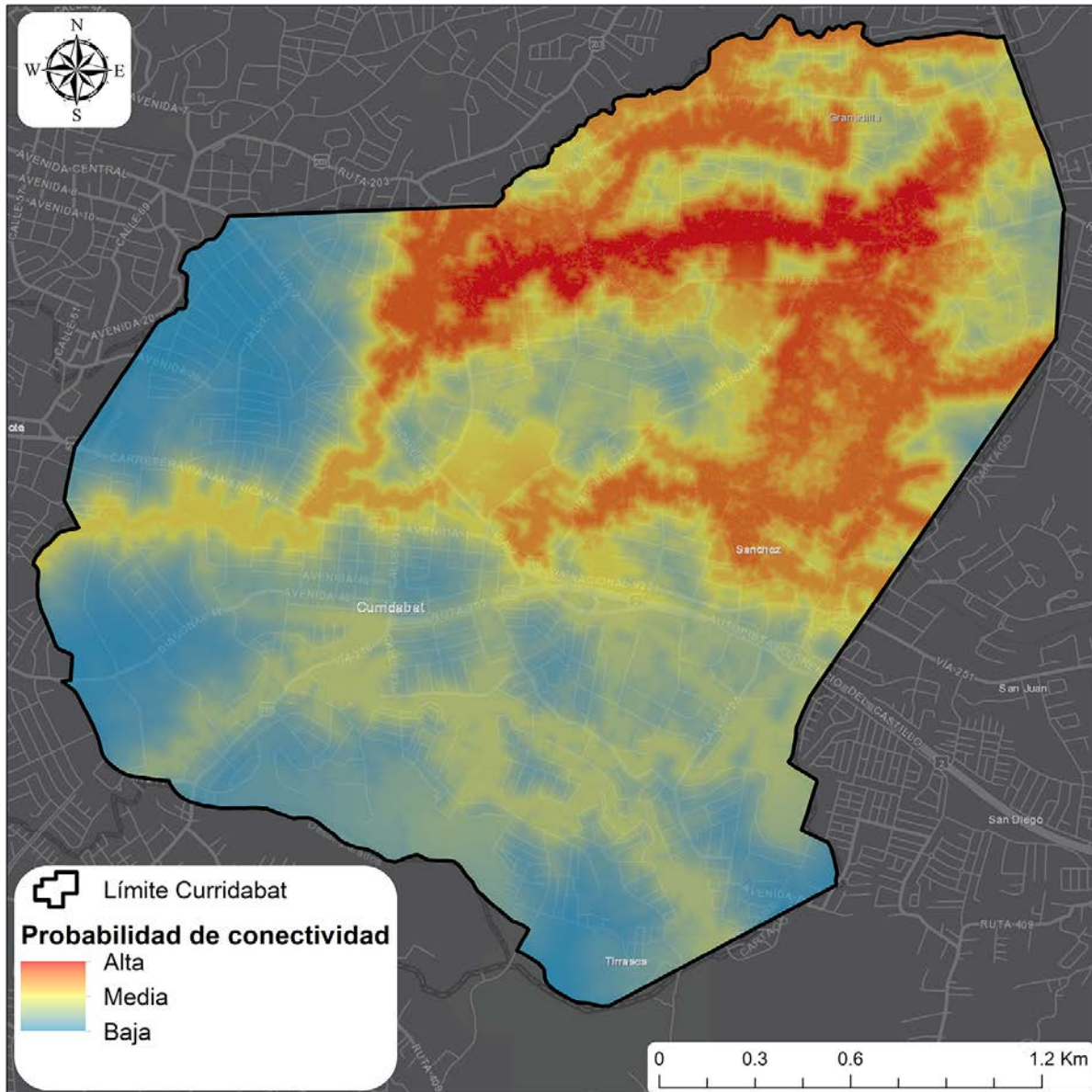


Figura 5. Probabilidad global de conectividad ecológica de las especies dependientes de bosque ripario del cantón de Curridabat (2019).

Con relación a las teselas remanentes de infraestructura verde, principalmente arbórea, y su importancia en la probabilidad de la conectividad a nivel de todo el cantón, se observa que el Cerro La Colina, la tesela en el centro del cantón cerca de La Galera y algunas teselas hacia el suroeste y en el distrito de Granadilla, constituyen lo que podemos denominar las “esmeraldas” o nodos centrales de la conectividad del cantón, por su importancia de acuerdo a los resultados del análisis lo anterior coincide con un trabajo anterior realizado por la Escuela de Diseño de la Universidad de Harvard GSD en 2018²⁰ (Figura 6).

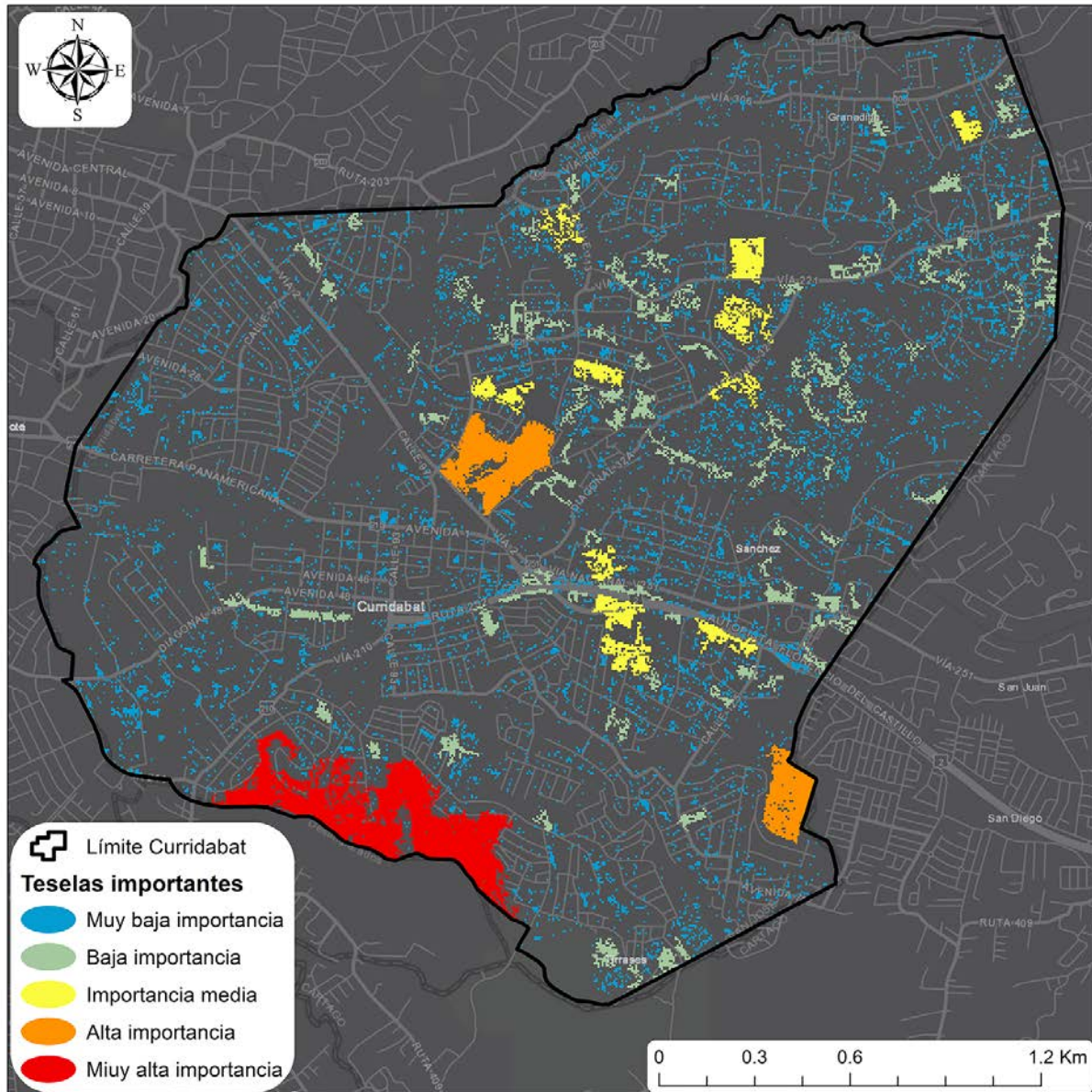


Figura 6. Teselas importantes con mayor cobertura de árboles en la probabilidad de conectividad ecológica de las especies que dependen de algún tipo de cobertura arbórea en el cantón de Curridabat (2019).

20 Berrizbeitia A., et-al.2018

Algunas teselas juegan un papel esencial en la conectividad, esto quiere decir que si las mismas fueran eliminadas se compromete la conectividad global actual. La Figura 7 muestra la distribución de las teselas de cobertura arbórea que son esenciales para garantizar la conectividad global. Los resultados muestran que en los distritos de Sánchez y Granadilla concurren la mayoría de estas teselas esenciales.

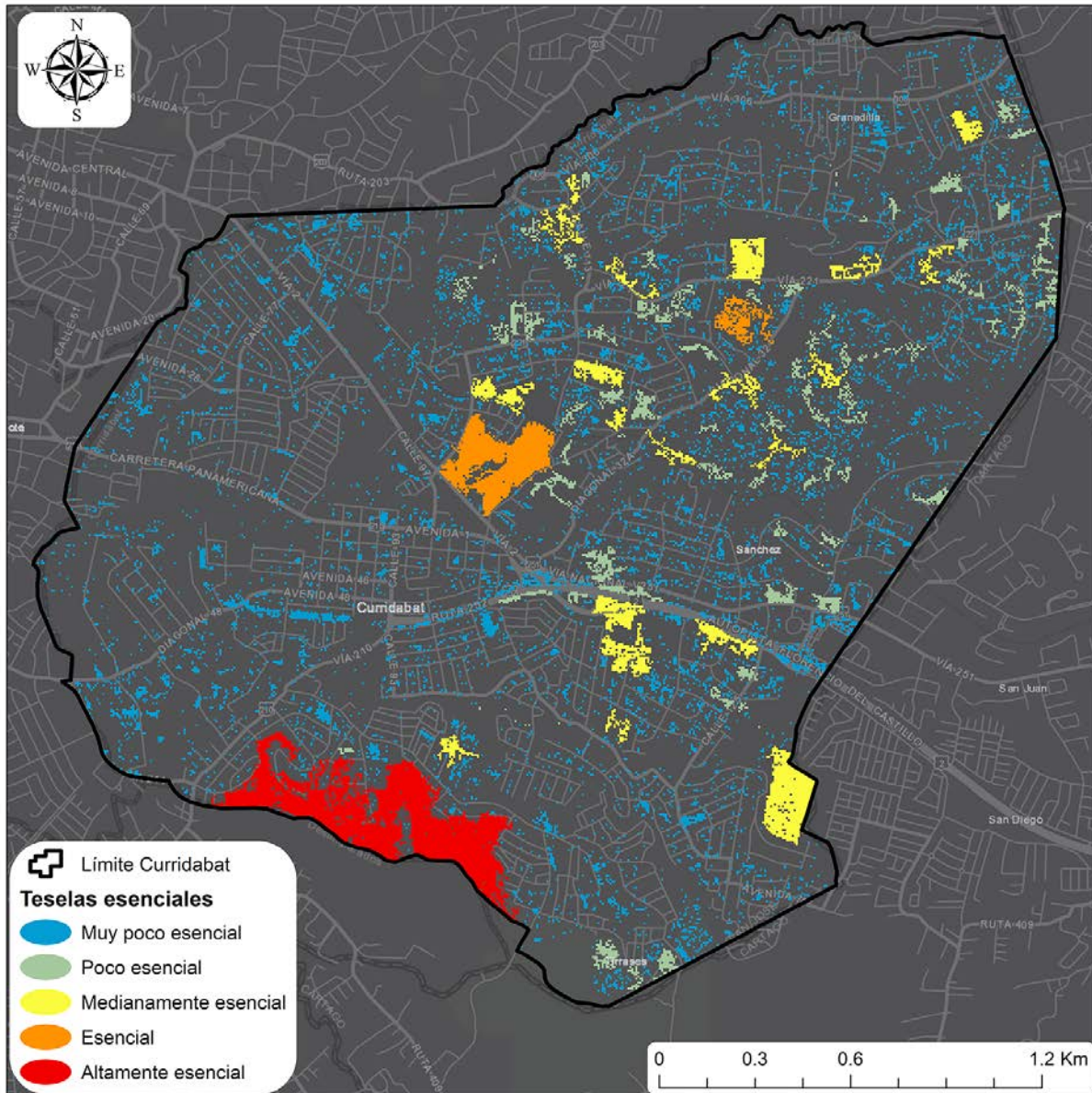


Figura 7. Teselas esenciales en la probabilidad de conectividad ecológica de las especies que dependen de algún tipo de cobertura arbórea en el cantón de Curridabat (2019).

Las teselas que corresponden a jardines y patios individuales (Figuras 8 y 9) constituyen las partes o piezas más elementales de la conectividad en las ciudades, y que se pueden entender como la contribución de los hábitats presentes a los elementos de biodiversidad urbana de tamaño pequeño, tales como abejas, colibríes, mariposas, etc. Además, representan el aporte ciudadano en el nivel más individual a la conservación de los bienes y servicios que aporta la biodiversidad a la ciudad ya que muchas de estas representan los jardines o patios de las casas. Las figuras 8 y 9 muestran las

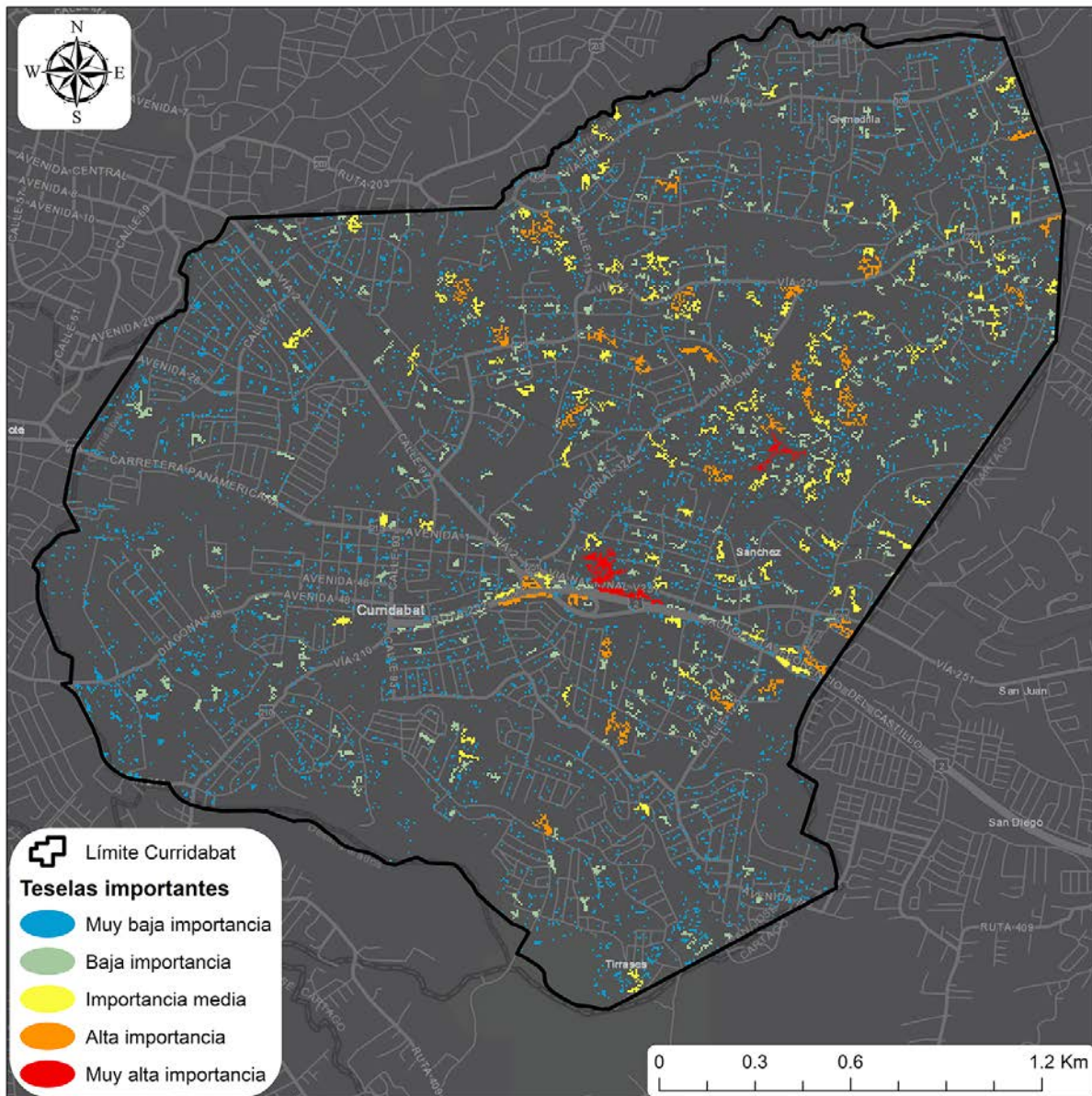


Figura 8. Teselas importantes (Jardines y patios) en la probabilidad de conectividad ecológica de las especies en el cantón de Curridabat (2019).

teselas importantes y las teselas esenciales, respectivamente, en relación al aporte de cada una a la probabilidad de conectividad ecológica. Los resultados muestran que tanto las teselas importantes como esenciales se encuentran distribuidas a lo largo de todo el paisaje del cantón, mostrando algunos lugares con importancia más alta o nivel esencial.

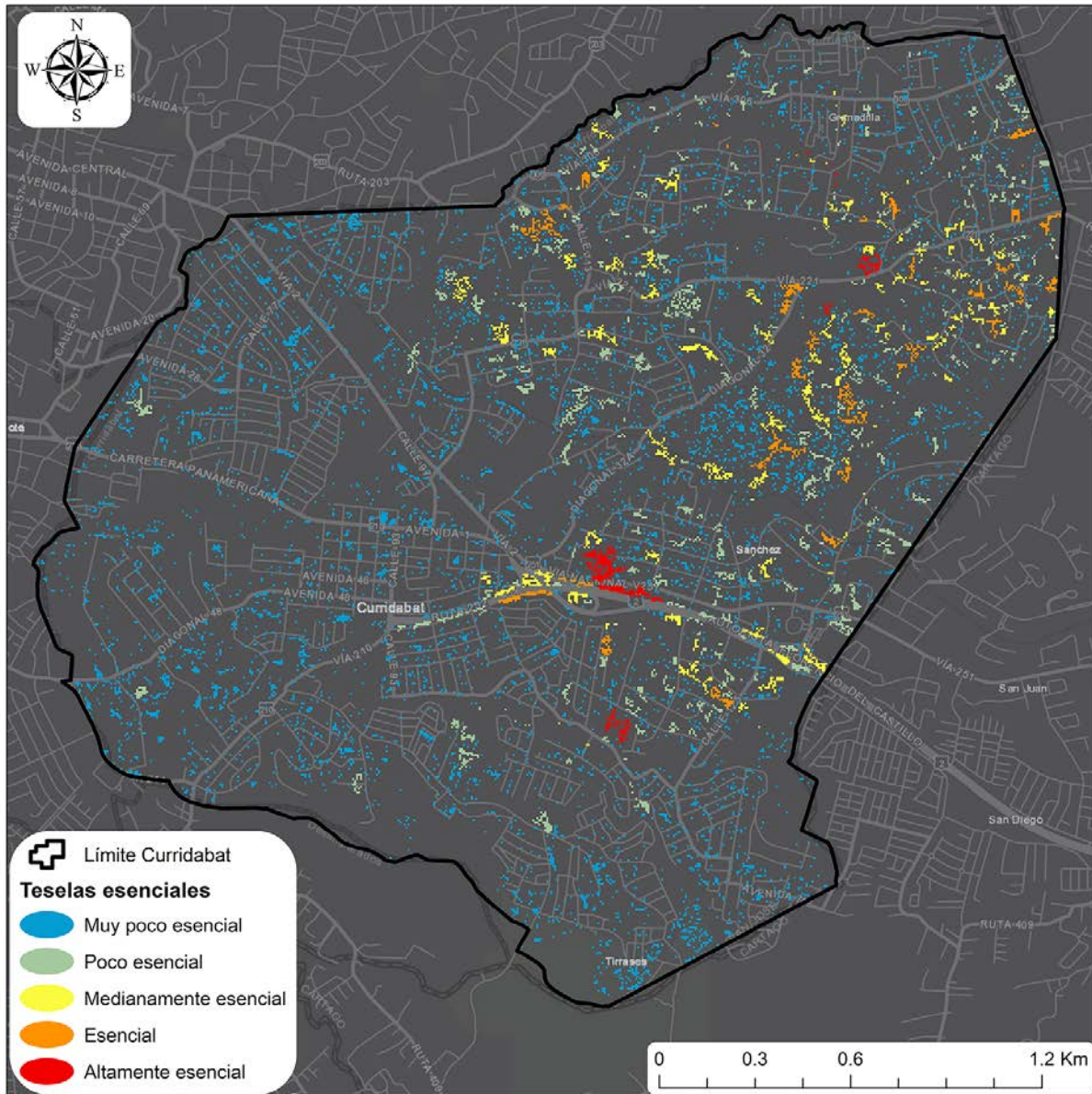


Figura 9. Teselas esenciales (Jardines y patios) en la probabilidad de conectividad ecológica de las especies en el cantón de Curridabat (2019).

La Figura 10 muestra las conexiones importantes para mantener la conectividad en el paisaje en el cantón. Este resultado es importante ya que visualiza los lugares del cantón con menor y mayor efectividad en la conectividad y los lugares donde actualmente hay vacíos de conectividad. A la vez visualiza las calles y avenidas donde es prioritario mantener la cobertura actual o implementar acciones de restauración de la cobertura vegetal a través de las diversas estrategias de promoción de la infraestructura verde. Es de especial atención el distrito de Curridabat donde se observa que existen el menor grado de conexiones lo cual está asociado a nivel de urbanización de presenta como fue establecido en la figura 1.

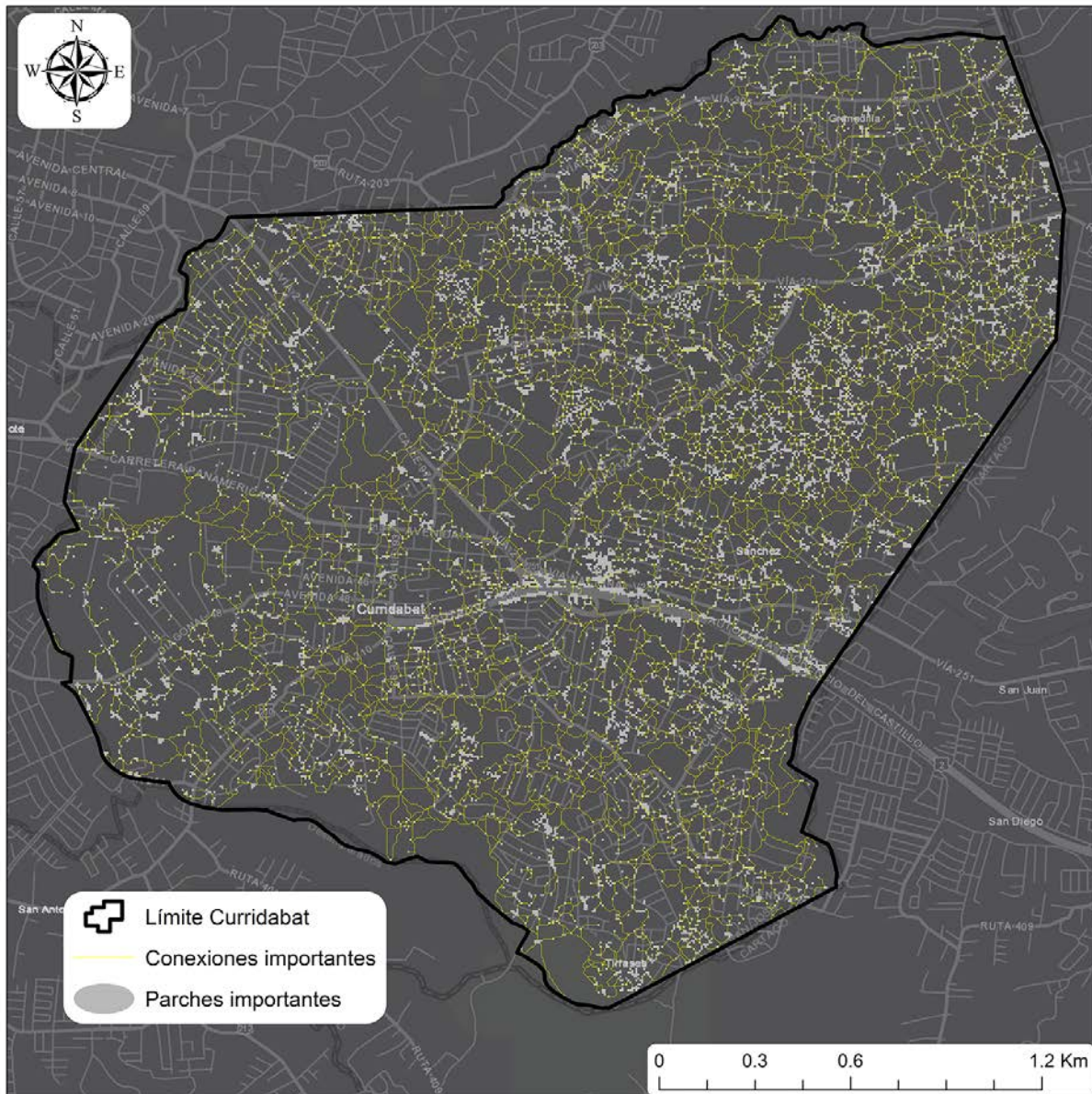
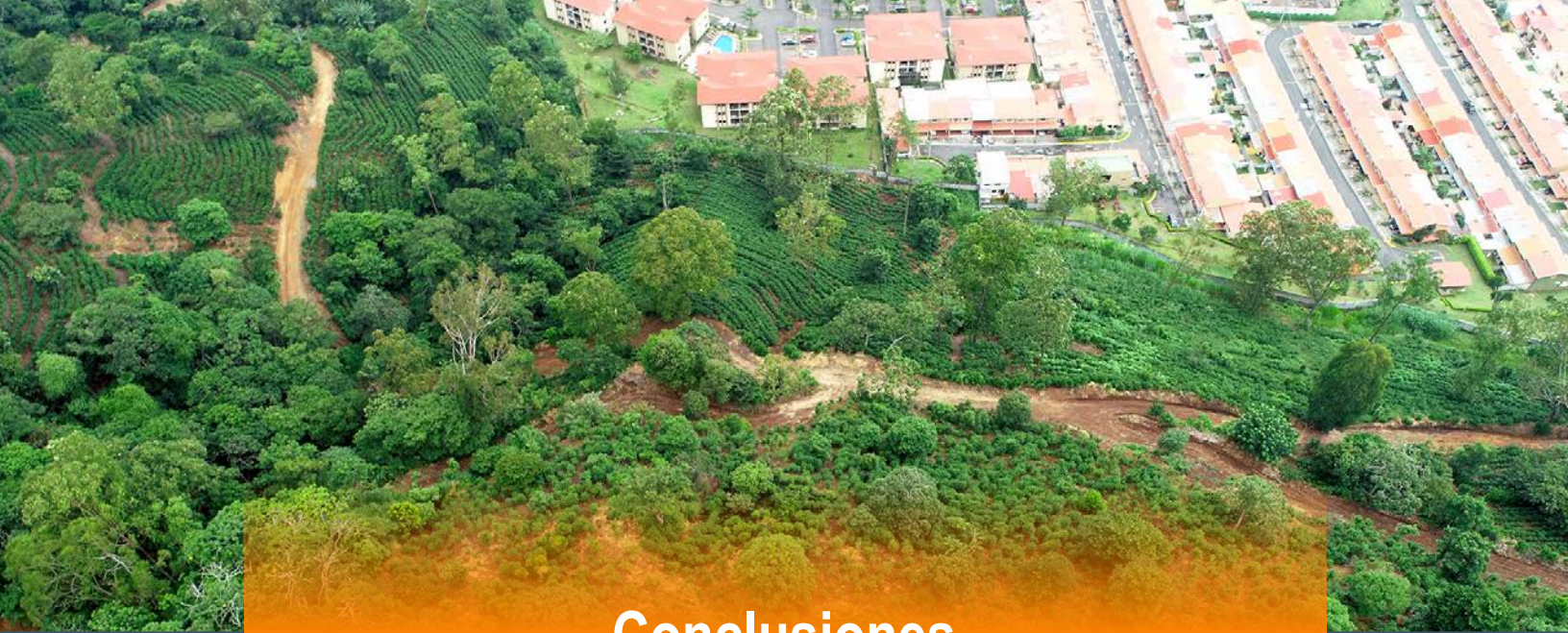


Figura 10. Conexiones importantes para mantener la probabilidad de conectividad ecológica de las especies en el cantón de Curridabat 2019.



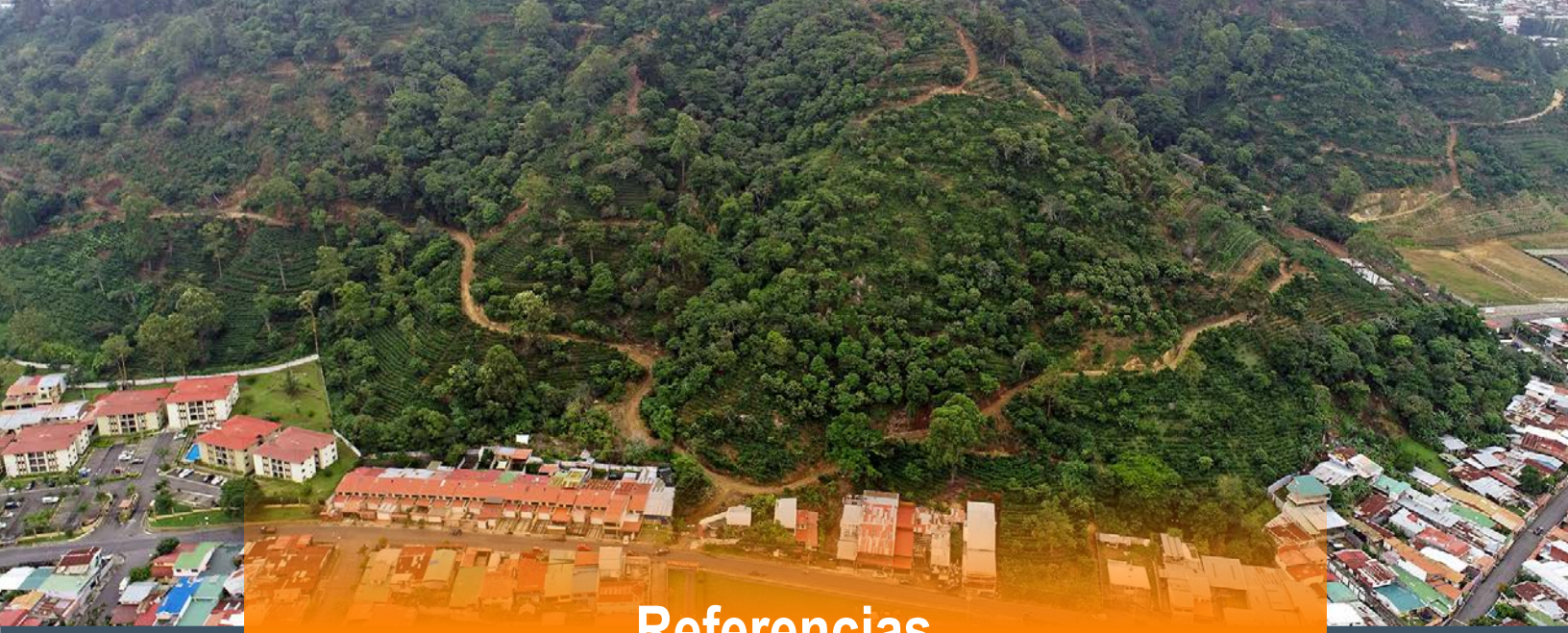
Conclusiones

El análisis muestra que el cantón de Curridabat presenta aún una importante proporción de vegetación urbana. No obstante, esta cobertura se encuentra fragmentada y distribuida con importantes señales de asimetría entre los distritos, y se debe mejorar para que cumpla su papel de aportar al bienestar de los habitantes y a la conservación de la biodiversidad de la ciudad.

Reviste de especial atención que prácticamente tres distritos tienen una infraestructura verde cercana o superior al 50%, sin embargo, el distrito de Curridabat es el que presenta la menor cobertura, lo que indica la necesidad de ponerle atención para que en el futuro se convierta en un espacio más verde. A la vez, es importante observar que la extensión de la infraestructura verde tiene diferencias a nivel de distrito en cuanto a su distribución. El distrito de Sánchez presenta la mayor cobertura de árboles individuales, mientras que en Granadilla sobresalen los bosques ribereños, en Tirrases se presenta la mayor cobertura de bosque periurbano, mientras que la mayor cantidad de Parques como espacios públicos se ubica en el distrito de Curridabat.

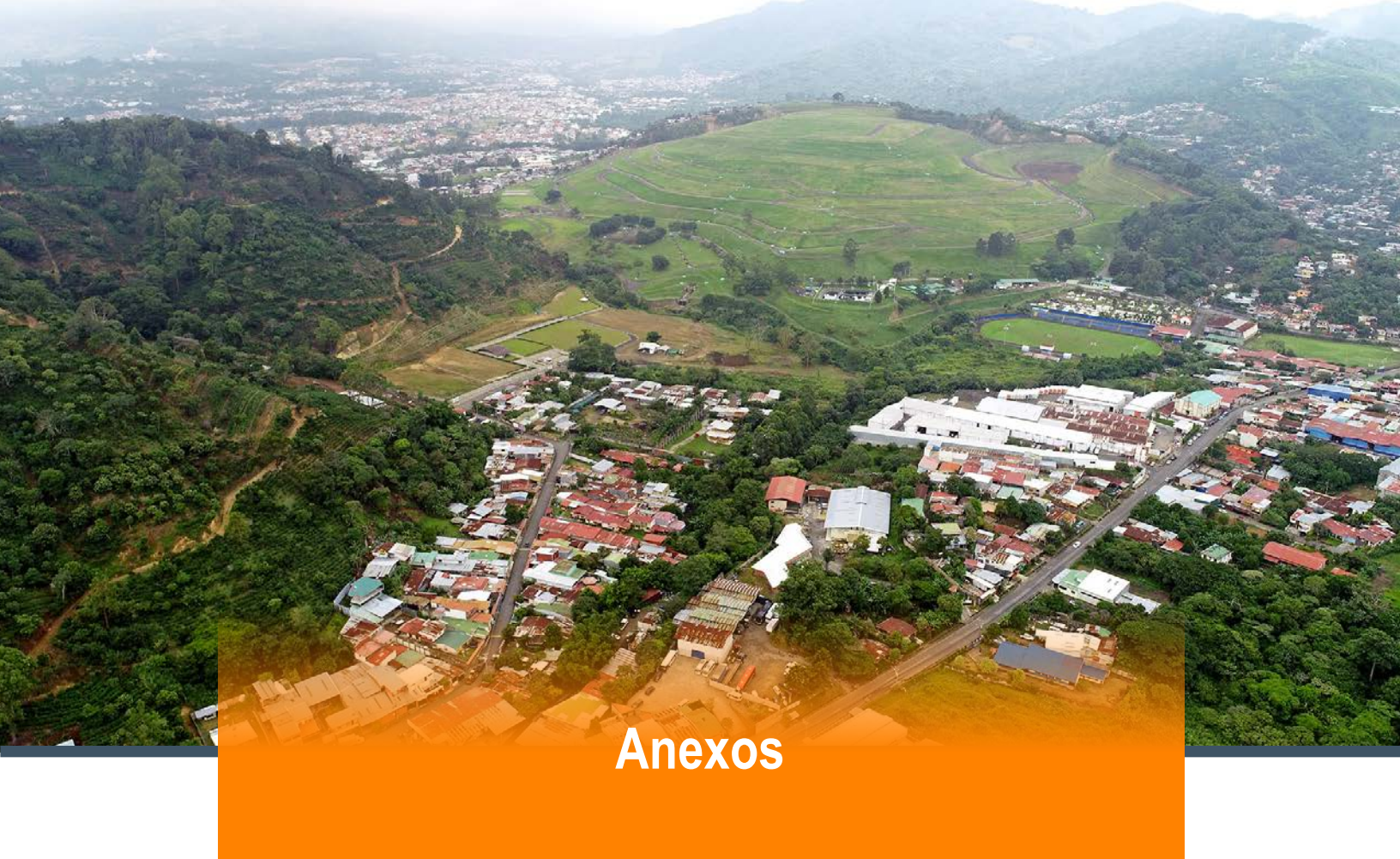
Los resultados del análisis de conectividad a la vez señalan la importancia de poner atención a la priorización de acciones de reverdecimiento de la parte sur y oeste del cantón. Por otro lado, en la parte norte y oeste se deben establecer estrategias de conservación de la infraestructura verde que ya está dando un importante aporte a la conectividad. Así mismo, en materia de conectividad a nivel de los sistemas de ríos, reviste de manera especial poner atención al río Tiribi y sus tributarios y a la parte oeste del río María Aguilar en materia de restauración de la conectividad.

La importancia de las teselas en la conectividad del cantón es fundamental, por lo que se sugiere fortalecer aquellas estrategias actualmente en ejecución, como es el caso de aceras dulces y jardines en las casas, condominios y edificaciones comerciales, con el objetivo de conservar esa conectividad y mejorarla hacia el futuro.



Referencias

- Blair (1996). Land use and Avian Species diversity along an urban gradient. *Ecological Applications*, 6(2), 1996, pp. 506-519
- Berrizbeitia A. et-al (2018). *Curridabat: An Atlas of its Landscape*. Harvard University, Graduate School of Design.
- CE. (2013). *Infraestructura verde: mejora del capital natural de Europa*. COM (2013) 249 final
- Czamanski D, Benenson I, Malkinson D, Marinov M, Roth R, Wittenberg L (2008) Urban Sprawl and Ecosystems – Can Nature Survive? *International Review of Environmental and Resource Economics* 2(4) 321366;
- Da Silva J., Wheeler E. (2017). Ecosystems as infrastructure. *Perspectives in Ecology and Conservation* 15 (2017) 32–35 <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2016.11.005>
- Forman RTT (1995) *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Unis, 632 p.
- Foltête J.C., Clauzel C., Vuidel G., (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks *Environmental Modelling & Software*, 38: 316-327.
- Gaoming J. and Wenjing B. (2012). Urban Vegetation. En *Berkshire Encyclopedia of Sustainability: Ecosystem Management and Sustainability (Vol.5)*. Berkshire Publishing Group
- Girardet X. et Clauzel C. (2018). *Graphab 14 Réalisations à Découvrir*. Laboratoire ThéMA- Université Paris.France
- Haase, D. (2015). Reflections about blue ecosystem services in cities. *Sustainability of Water Quality and Ecology* Vol 5, 77-83, [http:// dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.02.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.02.003)
- IUCN 2019. The IUCN Red List of Threatened Species. Version (2019-2). <http://www.iucnredlist.org>. Downloaded on 18 July 2019.
- Kappelle, M., Castro, M., Acevedo H., González L., Monge H. (2003). *Ecosistemas del Área de Conservación Osa. Ecosistemas de Costa Rica: Serie Técnica No. 1*. Santo Domingo de Heredia, C.R. Editorial INBio.
- Laille P., Provendier D., Colson F., Salanié J., (2013). Les bienfaits du végétal en ville: étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse. *Plante & Cité*, Angers, 31 p.
- Lucio J. (2016). *Infraestructura verde urbana*. *Ambienta*.115, 60-75
- MacGregor I., et al. (2016). City “Green” Contributions: The Role of Urban Greenspaces as Reservoirs for Biodiversity. *Forests* 2016, 7, 146; doi:10.3390/f7070146
- Opdam P, Steingröver E, Rooij S van (2006) Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning* 75(34) 322332
- SINAC. (2017). *Listado de especies de fauna silvestre en peligro de extinción*. R-SINAC-CONAC-092-2017
- Sutherland, G. D., A. S. Harestad, K. Price, and K. P. Lertzman. (2000). Scaling of natal dispersal distances in terrestrial birds and mammals. *Conservation Ecology* 4(1): 16. [online] URL: <http://www.consecol.org/vol4/iss1/art16>
- Tannier C, Foltête J-C, Girardet X (2012) Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning* 105(12) 128–139
- Urban DL, Minor ES, Tremi EA, Schick RS (2009) Graph models of habitat mosaics. *Ecology letters* 12(3) 260–73



Anexo 1. Metodología para la elaboración la cartografía de Trama Verde Urbana del cantón de Curridabat, San José, 2019

Adquisición de Imagen de Satélite de Base

Para la realización de este trabajo se utilizó una imagen de satélite del sensor World View 3²¹ (Cuadro 1). Cabe mencionar que previamente se llevó a cabo un proceso de selección en donde se valoraron otros productos, tales como World View 2, Sentinel 2, Spot 6/7, Rapideye, Geoeye. Al final se decidió por el uso de WorldView 3 debido a que este presenta una mejor relación entre resolución espectral y espacial, lo que facilita la detección de objetos a una escala de detalle fina.

La imagen adquirida cuenta con 4 bandas espectrales, 3 en el espectro visible y 1 en el infrarrojo cercano, además de banda pancromática a 0.3 metros de resolución. El uso de imágenes de alta resolución para la generación de mapas de cobertura arbórea en ciudades es ampliamente difundido, tal cual lo destacan, Moskal *et al.* (2011), Matikainen *et al.* (2011), Hoffman *et al.* (2011) y Harling *et al.* (2019).

21 <http://worldview3.digitalglobe.com/>

Cuadro 1. Características básicas del sensor WorldView 3

Sensor	Bandas	Resolución
WorldView-3 Fecha adquisición: Octubre 2018	Pancromática: 450 - 800 nm Multiespectral: Blue: 445 – 517 nm Green: 507 – 586 nm Red: 626 – 696 nm Near infrared 1: 780 – 920 nm	Pancromática: 0.31m Multiespectral: 1.24 m

Pre-procesamiento de la Imagen

Con el fin de asegurar la rigurosidad en el flujo de trabajo, se llevaron a cabo 2 procesos de corrección sobre la imagen cruda adquirida, los cuales fueron la corrección atmosférica y la corrección topográfica (orto-rectificación). Estos pasos son consistentes por los expuesto por Harley *et al.* (2019).

Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica de la imagen se realizó usando el módulo FLAASH del programa ENVI 5.5. Según HARRIS (2018), el análisis atmosférico de línea de vista rápida de hipercubos espectrales (FLAASH por sus siglas en inglés) es un algoritmo que permite, entre otras cosas:

- Corrección del efecto de adyacencia (mezclado de pixeles debido a la dispersión de radiación reflejada de la superficie)
- Cálculo de la visibilidad media de la escena (considerando la cantidad de neblina y aerosoles presentes). FLAASH utiliza técnicas avanzadas para el manejo especial de condiciones atmosféricas variadas, tales como la presencia de nubes.

FLAASH comienza el proceso a partir de la aplicación de la ecuación estándar para la radiancia espectral de los pixeles (L). La ecuación es la siguiente:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (1)$$

Dónde:

ρ : es la reflectancia de la superficie de los pixeles

ρ_e : es el promedio de la reflectancia de la superficie de los pixeles en un determinado vecindario

S : es el albedo esférico de la atmosfera

L_a : es la radiancia dispersada de vuelta por la atmosfera

A y B son coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas, pero no la superficie terrestre

Adicionalmente, FLAASH incorpora el modelo MODTRAN (transmisión atmosférica de moderada resolución, por sus siglas en inglés) con el fin de eliminar los efectos de la absorción y dispersión debidos a las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión. Los valores de A, B, S y L_a son altamente dependientes de la cantidad de vapor de agua presente en la escena, pero por lo general estos valores no son bien conocidos y pueden variar a través de la imagen. La remoción del vapor de agua se puede realizar a partir de la selección de modelos atmosféricos añadidos por defecto a la herramienta.

Una vez que la remoción del vapor de agua ha sido ejecutada, se aplica una nueva ecuación usando los valores promedio de la imagen de radiancia generada por la ecuación 1.

$$L_e \approx \left(\frac{(A + B)\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

En donde:

L_e : Son los valores promedio de radiancia de la imagen

ρ_e : Son los valores promedio de reflectancia de la imagen

Corrección Topográfica

Una imagen orto rectificadas (u ortofoto) es aquella en la que cada píxel representa una ubicación real del terreno y en donde todas las distorsiones geométricas del terreno y de los sensores han sido eliminadas con una precisión especificada.

La orto rectificación transforma la perspectiva central de una fotografía aérea o una imagen derivada de un satélite en una vista ortogonal del terreno, lo que elimina los efectos de la inclinación del sensor y el relieve del terreno. La escala es constante en toda la ortofoto, independientemente de la elevación, lo que proporciona mediciones precisas de la distancia y la dirección (Harris Geospatial 2019).

El proceso de orto rectificación se llevó a cabo usando el módulo *RPC Orthorectification*, este se basa en el uso de coeficientes polinómicos racionales los cuales son un tipo de transformación matemática que define la relación entre las coordenadas de la imagen y las coordenadas del terreno. Otro insumo adicional es el modelo de elevación digital, para este caso se construyó uno a partir de las curvas de nivel 1:25.000 del proyecto (Terra 1998), dicho modelo tiene una resolución espacial de 5 metros.

Procesamiento de la Imagen

La fase de la clasificación de la imagen propiamente dicha se realizó en 2 etapas, en la primera se definió la leyenda temática y en la segunda se aplicaron las herramientas de clasificación para la extracción de la trama verde.

Definición de la Leyenda Temática

Los cuadros 2, 4 y 7 del texto principal detallan la leyenda temática utilizada en la elaboración de los cuatro productos cartográficos.

Clasificación de la Imagen

El proceso de clasificación de la escena de satélite para la extracción de la trama verde se llevó a cabo en dos etapas usando el programa ENVI 5.5 (Harris Geospatial, 2019). La primera parte consistió en el *Análisis de Imágenes Orientada a Objetos* (OBIA) y la segunda mediante la aplicación de un algoritmo de *Redes Neuronales* (Neural Net), el cual tiene la habilidad de resolver problemas de clasificación y reconocimiento de patrones debido a su capacidad de adquirir conocimiento a través de aprendizaje autónomo. Este algoritmo está compuesto por neuronas que son las unidades básicas de procesamiento las cuales se conectan entre sí (Serial, R,2009).

El OBIA (*Object-Based Image Analysis*) es una técnica utilizada para analizar imágenes digitales que ha sido desarrollada como un enfoque diferente en comparación a los métodos tradicionales basados en el análisis de los píxeles de la imagen. Mientras que los análisis basados en píxeles se centran en la información de cada píxel, el OBIA se concentra en la información de un grupo similar de píxeles llamados objetos de imagen. De manera más específica, los *objetos de imagen* son grupos de píxeles que son similares entre ellos enfocándose en la medida de sus propiedades espectrales; tales como color, tamaño, forma y textura, así como en el contexto de los píxeles vecinos que los rodean (ITT, 2008).

Insumos para la Clasificación

Para el desarrollo de esta fase se usó parte de la metodología de segmentación de imágenes descrita por Harley et al (2019), en primera instancia se creó un grupo de cuatro índices espectrales como complemento de la clasificación, los índices derivados se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Índices de vegetación utilizados

Nombre del índice de vegetación	Acrónimo	Formula
Índice de vegetación de diferencia verde normalizada	GNDVI	$(\text{Nir1}-\text{Green})/(\text{Nir1}+\text{Green})$
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI	$(\text{Nir1}-\text{Red})/(\text{Nir1}+\text{Red})$
Índice de vegetación ajustado al suelo	SAVI	$(\text{Nir1}-\text{Red})/(\text{Nir1}+\text{Red})*(1+L)$
Índice de vegetación de diferencia normalizada – Cociente verde/rojo	NDVI-GR	$\text{Nir1}-(\text{Green}+\text{Red})/\text{Nir1}+(\text{Green}+\text{Red})$

Posteriormente se realizó el proceso de segmentación usando la imagen multispectral y el conjunto de índices de vegetación creados en el paso previo, para este fin se utilizó el módulo *Example Based Feature Extraction Workflow* (Envi 5.5), este procedimiento requiere el ajuste de dos parámetros básicos, el filtro *Edge* el cual regula la detección de bordes dentro de la escena, y la función *Full Lambda Schedule*, la cual controla la agregación de los segmentos creados, es decir, regula el tamaño, forma y variedad de los objetos de salida.

Para este ejercicio los parámetros utilizados fueron:

Edge= 5

Full Lambda Schedule = 50

Adicionalmente a los parámetros de agregación y borde, se usó un conjunto de características espectrales, texturales y de forma, asociadas a los objetos en la imagen. La interacción de estos parámetros con el resto de la información espectral y textura es la que permitió la extracción de los polígonos de entrenamiento los cuales fueron etiquetados de acuerdo con la leyenda temática definida previamente, posteriormente estos datos fueron usados como entrenamiento del algoritmo de redes neuronales del cual se obtuvo el mapa final de la trama verde. En el Cuadro 4, se visualiza el total de muestras de entrenamiento que se derivaron para la segunda parte de la clasificación.

Cuadro 4. Cantidad de muestras derivadas para la clasificación final

Uso/cobertura	Cantidad de muestras	Hectáreas
Infraestructura gris	1987	45.0
Bosque /árboles dispersos	690	28.2
Zonas verdes	398	19.5
Cafetales	299	17.1
Matorrales	69	5.1
	3443	114.9

Finalmente, usando el conjunto de firmas espectrales y la imagen corregida geométrica y atmosféricamente se procedió a la aplicación del algoritmo de clasificación de redes neuronales, cabe mencionar que se usaron los valores por defecto que trae cada uno de los parámetros de dicha herramienta (Figura 1).

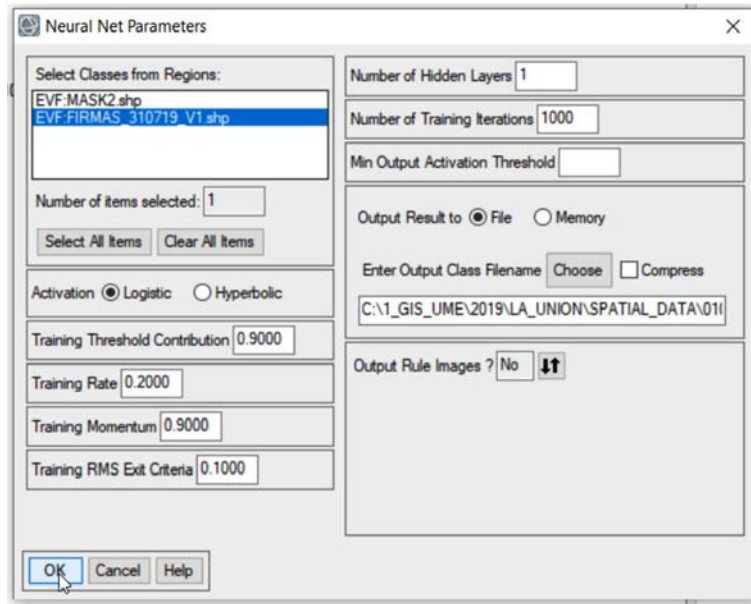


Figura 1. Ventana de parámetros usados para la clasificación de la trama verde con la herramienta Neural Network

Referencias

- ENVI version 5.5 (Harris Geospatial, Boulder, Colorado). Harris, Geospatial solutions, (2018). <https://www.harrisgeospatial.com/docs/backgroundflash.html>
- Hartling, S.; Sagan, V.; Sidike, P.; Maimaitijiang, M.; Carron, J. (2019). Urban Tree Species Classification Using a WorldView-2/3 and LiDAR Data Fusion Approach and Deep Learning. *Sensors* 2019, 19, 1284.
- ITT Visual Information Solutions, (2008). Envi Feature Extraction Module, User's Guide. http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/feature_extraction_module.pdf
- Hofmann, P.; Strobl, J.; Nazarkulova, A. (2011). Mapping Green Spaces in Bishkek—How Reliable can Spatial Analysis Be? *Remote Sens.* 2011, 3, 1088-1103.
- Matikainen, L.; Karila, K. (2011). Segment-Based Land Cover Mapping of a Suburban Area—Comparison of High-Resolution Remotely Sensed Datasets Using Classification Trees and Test Field Points. *Remote Sens.* 2011, 3, 1777-1804.
- Moskal, L.M.; Styers, D.M.; Halabisky, M. (2011). Monitoring Urban Tree Cover Using Object-Based Image Analysis and Public Domain Remotely Sensed Data. *Remote Sens.* 2011, 3, 2243-2262.
- Proyecto Terra, (1998). Convenio Minae-Terra. Desarrollo del Programa Sistema de Acción Territorial para la toma de decisiones en el Sector Energía
- Serial, R., Czibener, D., & Nabel, P. (2009). Teledetección y redes neuronales aplicadas al mapeo de coberturas del suelo de la cuenca del Matanza-Riachuelo, Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica*, (146), 125-152. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40996845>

Anexo 2. Parámetros utilizados en Graphab®

Conectividad	8			
Tamaño mínimo de parche	0.01 ha			
	Bosques	Bosques-Bosque ripario	Bosque ripario	Teselas
Distancia máxima dispersión	22.9 m	22,15 m	22,18 m	24, 18 m
Probabilidad de movimiento	0.05			
Tipo de distancia	Capacidad dispersión			
Impedancia	Costo			
Escala de costos	1, 10, 100, 1000, 10.000			
Topología	Planar			



