

Conectividad estructural del paisaje e identificación de áreas prioritarias para producción sostenible en una zona de los Andes nororientales, Colombia

Alex Javier Carvajal Ortiz y Brayan Armando Romero Ramírez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero forestal

Director

Sandra Milena Díaz López

MSc en Manejo, uso y conservación del bosque

Codirector

Sergio Andrés Bolívar Santamaría

MSc en Biología

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2023

Agradecimiento

En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios, quien ha sido mi guía constante a lo largo de este arduo pero gratificante proceso de investigación y redacción de mi tesis. Quiero dedicar un agradecimiento a mi familia, en especial a mi nona Cleotilde y mis tías Sandra y Diana, quienes han sido mi apoyo en cada paso de este camino. A mi madre, Nancy Ramírez, mi gratitud no tiene límites. Su amor incondicional y sus sacrificios han sido el motor que me impulsó a seguir.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis directores, la profesora Sandra Díaz y el profesor Sergio Bolívar. Su guía experta, apoyo inquebrantable y dedicación han sido fundamentales para el éxito del trabajo de investigación. A lo largo de este proceso, su sabiduría y experiencia han iluminado mi camino, motivándome a superar obstáculos y a alcanzar metas que en un principio parecían inalcanzables. Su mentoría ha dejado una huella indeleble en mi formación y estaré eternamente agradecido por ello.

Finalmente, no puedo dejar de mencionar a mi amigo y compañero de tesis, Alex Carvajal. Nuestra colaboración y trabajo en equipo han sido fundamentales para superar los desafíos y dificultades que encontramos en el camino. Su entusiasmo, dedicación y habilidades complementarias han sido un factor clave para el éxito de este proyecto. Gracias por estar siempre dispuesto a ayudar y por compartir esta travesía conmigo.

Brayan Armando Romero Ramírez

Agradezco a Dios porque por su ayuda he culminado este proceso de investigación, así mismo, porque me ha permitido encontrar más que una carrera, una eterna pasión llamada ingeniería forestal.

Doy gracias a mi familia y amigos cercanos por su gran apoyo para conmigo, esto ha sido muy importante para continuar mi formación académica. En particular agradezco a mi madre, Ana Ortiz quien con su inefable amor y esfuerzo por mí, ha sembrado en mi mente esa semilla de inspiración y trabajo que ha crecido cual buen árbol cuyos frutos le recompensarán.

Quiero agradecer a mis directores de tesis, mi profesora Sandra Díaz quien realmente ha sido clave en mi formación al motivarme para ampliar mis horizontes y visión de lo forestal, al profesor Sergio Bolívar quien, a través de la dirección de esta investigación me ha ayudado a seguir construyéndome desde lo académico y lo personal. Muchas gracias a ambos por el tiempo y esfuerzo dedicado a este trabajo.

Agradezco a mi gran amigo y compañero de tesis, Brayan Romero. Sin duda alguna su esfuerzo, compromiso y apoyo han permitido llegar a buen fin con este trabajo de investigación. Gracias por aceptar el reto y seguir trabajando a pesar de los obstáculos que se han presentado.

Estas últimas líneas no pueden dejar de mencionar, que estaré siempre agradecido con mis profesores de carrera por los conocimientos, consejos y experiencias que me han compartido, también por sus exhortaciones que me impulsan para mejorar. Además del saber, me han transmitido el amor por las ciencias forestales y el noble deseo de querer aportar a través de la ciencia a las comunidades, al país y la región

Alex Javier Carvajal Ortiz.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Referencial.....	17
2.1 Marco Teórico.....	17
2.1.1 Ecología del paisaje	17
2.1.2 Fragmentación.....	18
2.1.3 Conectividad	19
2.1.4 Métricas del paisaje.....	20
3. Metodología	21
3.1 Área de estudio	21
3.2 Descarga de imagen satelital.....	22
3.3 Clasificación supervisada de coberturas del suelo.....	22
3.4 Especies indicadoras de conectividad funcional del paisaje.....	23
3.5 Fragmentación y conectividad del paisaje	24
3.5.1 Fragmentación.....	24
3.5.2 Conectividad	26
3.6 Estrategias de desarrollo sostenible para mejorar conectividad	28
4. Resultados	29

4. 1 Clasificación supervisada.....	29
4.2 Fragmentación del paisaje.....	30
4.3 Conectividad del paisaje	32
4.4 Análisis de componentes principales	35
4.5 Análisis multicriterio (AMC).....	36
4.6 Suelos de las áreas priorizadas.....	38
4.7 Estrategias de conectividad.....	41
5. Discusión.....	44
6. Conclusiones	48
7. Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	50
Apéndices.....	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Métricas de fragmentación.....	31
Tabla 2. Distancias de dispersión de las especies seleccionadas	32
Tabla 3. Datos de área en ha para categorías del dIIC	34
Tabla 4. Datos del área en ha para categorías del dPC	35
Tabla 5. Rangos priorizados para identificas las áreas más conectadas	37
Tabla 6. Moda de variables cualitativas.....	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Zona de estudio.....	22
Figura 2. Clasificación supervisada generada con el algoritmo random forest.....	30
Figura 3. Mapa Índice Integral de Conectividad	33
Figura 4. Mapa Índice de Probabilidad de Conectividad.....	34
Figura 5. Explicación de la mayor varianza del conjunto de variables	36
Figura 6. Mapa zonas prioritarias a conectar a partir de AMC.....	38
Figura 7. Mapa buffer áreas a conectar.....	39
Figura 8. Promedio variables cuantitativas en las distintas vocaciones.....	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Georreferenciación en campo de las coberturas	63
Apéndice B. Fotografías coberturas.....	64
Apéndice C. NDVI y métricas de textura	65
Apéndice D. Plegable especies clave de la zona.....	66
Apéndice E. Cuestionario especies identificadas por la comunidad.....	67
Apéndice F. Correlación entre métricas de conectividad para tres distancias de dispersión...	68

Glosario

Bosques andinos: estos abarcan una amplia diversidad de ecosistemas montanos presentes en condiciones bioclimáticas húmedas, con un rango de elevación que va de los 1000 hasta los 3500 m s. n. m. o 5000 m s. n. m., dependiendo de su ubicación. Son paisajes frágiles, vulnerables a los efectos del cambio climático, deforestación y degradación de bosques, al mismo tiempo presentan un potencial importante para contribuir a mitigar el cambio climático y restaurar funciones ecosistémicas clave (Programa Bosques Andinos, 2021).

Conectividad: es la medida en que los organismos pueden moverse entre parches de hábitat, desde la parte funcional esto depende de la estructura del paisaje, así como de los atributos de las especies focales, como la capacidad de dispersión. En cuanto a lo estructural es el grado en que los parches de hábitat aparecen conectados en el paisaje a través de características físicas como la cubierta vegetal o la hidrología; depende solo del paisaje en sí, no de los atributos de las especies (Costanza y Terando, 2019).

Distancia de dispersión: es la longitud en m o km que un individuo de una población vegetal o animal puede propagarse de un sitio a otro diferente (Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2023).

Ecología del paisaje: la ecología del paisaje es una disciplina científica interdisciplinar que tiene un gran potencial para la planificación del paisaje, es una práctica integrada y colaborativa a escala regional (Hersperger et al., 2021). El núcleo conceptual y teórico de la ecología del paisaje vincula las ciencias naturales y sociales para entender los paisajes como escenarios en los que convergen las características estructurales y la construcción social (Pinto-Correia y Kristensen, 2013).

Fragmentación: se define como el proceso que lleva a dividir en partes separadas o aisladas una cobertura natural que en principio es homogénea, por lo general este mecanismo es creciente y constante en el tiempo como consecuencia de la demanda de áreas para cultivos,

establecimiento de pastizales, infraestructuras, entre otros (Farina, 2016). En los bosques implica una reducción de su superficie, un aumento del aislamiento de sus fragmentos, una pérdida de la calidad del hábitat y cambios en las condiciones bióticas y abióticas (Forman, 1995).

Resumen

Título: Conectividad estructural del paisaje e identificación de áreas prioritarias para producción sostenible en una zona de Los Andes nororientales, Colombia. *

Autores: Alex Javier Carvajal-Ortiz y Brayan Armando Romero-Ramírez. **

Palabras Clave: ecología del paisaje, fragmentación, agroforestería, comunidades y Makurhini.

Descripción:

Los Andes tropicales son *hotspot* de biodiversidad, por lo que sus ecosistemas naturales son prioritarios para la conservación. La fragmentación del paisaje ha generado la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos. Pese a su importancia y alto grado de vulnerabilidad, no se cuenta con insumos para conocer el territorio a escala local. Este estudio busca evaluar la conectividad y fragmentación del paisaje para proponer estrategias de producción sostenible en un área de la Cordillera Oriental de los Andes, Colombia. Se usaron imágenes PlanetScope para realizar la clasificación supervisada mediante RandomForest, luego se estimaron seis métricas de fragmentación y dos de conectividad. El análisis de componentes principales definió de las variables halladas, las más importantes para incluirlas en el análisis multicriterio, con este último se priorizaron áreas para conectar. Finalmente, con base en la literatura y variables del suelo disponibles en cartografía oficial se sugirieron estrategias productivas que permitan incrementar beneficios ecológicos y socioeconómicos. La cobertura predominante en el área es bosque denso (Bd), seguida de áreas agrícolas heterogéneas (Ah). Al analizar la fragmentación, se encontraron 1227 parches, de los cuales 135 corresponden a Bd. Los índices de conectividad evidenciaron áreas de hábitat con corredores naturales limitados, identificando así, áreas prioritarias para conectar que abarcan el 0,5% de la cobertura boscosa. Se sugiere implementar sistemas agroforestales con tres especies para mejorar la conectividad y la producción sostenible del suelo. Se evidenció a escala geográfica detallada, la intervención antrópica que reportan investigaciones a nivel regional; como se esperaba, los bosques tienen continuidad espacial, esto se asocia a limitantes topográficas para actividades agropecuarias en estas áreas. Los sistemas agroforestales propuestos, pueden incrementar los beneficios económicos y ecológicos significativamente. Por tanto, este estudio es una aproximación al manejo sostenible del paisaje, que resulta clave como insumo para formular instrumentos de ordenación del territorio.

* Trabajo de Grado

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa Ingeniería Forestal. Director: Sandra Milena Díaz López. MSc en Manejo, uso y conservación del bosque. Codirector: Sergio Andrés Bolívar Santamaria. MSc en Biología

Abstract

Title: Structural landscape connectivity and identification of priority areas for sustainable production in an area of the northeastern Andes, Colombia. *

Authors: Alex Javier Carvajal-Ortiz y Brayan Armando Romero-Ramírez. **

Keywords: landscape ecology, fragmentation, agroforestry, rural community and Makurhini

Description:

The tropical Andes are recognized as a biodiversity hotspot, and therefore their natural ecosystems are priorities for conservation. Landscape fragmentation has caused the loss of biodiversity and ecosystem services in this region. Despite its importance and high degree of vulnerability, there are products to understand the fragmentation stage at the local scale. This study aims to assess the connectivity and landscape fragmentation, to suggest strategies of sustainable production in an area of the Eastern Cordillera of the Andes, Colombia. For supervised classification we use PlanetScope scenes and the random forest algorithm, then six fragmentation metrics and two connectivity metrics were estimated. In order to identify areas to be connected we made a multicriteria analysis including the most important variables based on a principal component analysis (PCA). Finally, using the literature and soil mapping vectors we suggested productive systems to increase ecological and socio-economic profits. The predominant cover in the area is dense forest (Bd), followed by heterogeneous agricultural areas (Ah). We found in total 1227 patches, of which only 11% were of Bd. Connectivity indices showed habitat areas with few natural corridors, moreover, the multi-criteria analysis identified priority areas to connect that comprise 0,5% of the forest cover. We suggest that implementing agroforestry systems with three species could improve landscape connectivity and sustainable food production. Our results support the literature for landscape fragmentation and connectivity metrics at the regional level. As expected, in our study area forest presented a spatial continuity, and this could be associated with topographic limitations for agricultural activities in these areas. The proposed agroforestry systems can significantly enhance the economic and ecological benefits for the communities. Therefore, our study results became an important first step for the formulation of land-use planning in Concepción.

* Degree project

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Forestry Engineering Programme. Director: Sandra Milena Díaz López. MSc in Management, use and conservation of the forest. Co-director: Sergio Andrés Bolívar Santamaria. MSc in Biology

Introducción

Los Andes tropicales son clave para conservar la diversidad biológica, debido a que poseen a nivel global el 6,7 % y 5,7 % de especies vegetales y vertebrados endémicos, respectivamente (Myers et al., 2000; Ocampo-Peñuela y Pim, 2014). Según Agudelo y Armenteras (2017), Colombia cuenta con el 23 % de áreas Andinas en Sudamérica. A pesar de que son *hotspots* de biodiversidad, los bosques Andinos han sido afectados por la tala indiscriminada de árboles, agricultura, ganadería y urbanización, lo que ha degradado y reducido las masas forestales de forma significativa (Lewis et al., 2015; Taubert et al., 2018).

El impacto de la intervención antrópica sobre los bosques andinos ha sido evidente entre 1970 y 2015, estos disturbios que se han acentuado en la Cordillera Oriental de Colombia (Correa et al., 2020), ocasionando fragmentación en dichos ecosistemas y disminuyendo tanto la riqueza como la abundancia de especies de flora y fauna; así mismo, se altera la estructura, los servicios ecosistémicos y la función del paisaje (Farina, 2016; Gustafsson et al., 2004; Johansson y Ehrlén, 2003).

Dentro del marco de la ecología del paisaje, éste se puede entender como una unidad con límites definidos, caracteres describibles y con funciones específicas atribuibles a sus componentes (Farina 2022a). Este debe ser evaluado a una escala adecuada para lograr diferenciar entre subunidades del entorno, puede ser estudiado y descrito desde las siguientes perspectivas: geográfica, ecológica y cognitiva. Por esta razón el estudio del paisaje resulta clave como herramienta para la planificación del uso correcto de los recursos naturales (Hersperger et al., 2021).

La fragmentación también altera los ciclos biogeoquímicos a través del paisaje y limita la ocurrencia de metapoblaciones (Farina, 2022b). Esto afecta la función y servicios que prestan los ecosistemas al ser humano, comprometiendo su bienestar (Noh et al., 2022) al limitar la polinización de cultivos, la seguridad en el suministro de agua, la conservación del suelo y la

provisión, tanto de materiales, como de productos. Por otro lado, la conectividad de los parches de bosque dentro del paisaje facilita el flujo genético, de materia y energía de una zona a otra, los esfuerzos actuales por mejorar y mantenerla es clave para conservar la biodiversidad (Saura y de la Fuente, 2017) ya que ayuda a reducir los impactos negativos de la fragmentación.

Desde 1990 se reportan estudios en revistas de ecología del paisaje de alto impacto en temas como estructura, función, cambio y escala, últimamente los aspectos abordados son paisajes y servicios ecosistémicos, paisaje como experiencia humana y uso del suelo (Hersperger et al., 2021). El avance conceptual, va de la mano con el desarrollo y amplio uso de herramientas de código abierto para el análisis estadístico como el lenguaje R (R Core Team, 2016).

En Colombia, se ha evaluado la conectividad del paisaje en la región Andino-Amazónica, entre el período del 2000 al 2020, reportándose disminuciones en el hábitat conectada en un 18% y pérdida de hábitat de un 13% (Murillo-Sandoval et al., 2022). Así mismo, se determinó la conectividad para la especie *Tremarctos ornatus* a lo largo de los Andes colombianos mostrando que las áreas protegidas son las que mayormente facilitan su movimiento (Hohbein y Nibbelink, 2021).

El presente estudio busca responder la pregunta ¿Cuáles estrategias de producción sostenible podría implementar la comunidad de acuerdo con el grado de conectividad del paisaje en una región de la Cordillera Oriental de Colombia? Lo anterior, teniendo en cuenta que en Colombia diversas áreas naturales están amenazadas, entre las cuales se encuentran los bosques Andinos (Etter et al., 2017). Por tanto, es importante estudiar cómo éstos se conectan a escala de paisaje y para el área de estudio en particular, el grado de conectividad con el área protegida que hace parte de la iniciativa privada de conservación Reserva Natural de la Sociedad Civil La Llanada.

Este tipo de estudio resulta clave para la toma de decisiones a escala de paisaje, y hace un aporte desde la academia para proponer futuros más sostenibles en áreas históricamente degradadas. En este sentido, los resultados de este estudio serán una herramienta importante para generar propuestas de desarrollo que armonicen los intereses económicos de las personas con los de conservación de bosques Andinos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer estrategias para mejorar la conectividad ecológica de los remanentes boscosos entre 2300 – 3100 m s. n. m. de la vertiente oriental del río Servitá en el municipio de Concepción, Santander.

1.2 Objetivos Específicos

- Estimar la fragmentación del paisaje para la zona de estudio.
- Determinar la conectividad del paisaje en el área de interés.
- Sugerir estrategias de desarrollo sostenible que mejoren la conectividad del paisaje.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Ecología del paisaje*

Aunque el término de ecología del paisaje fue inicialmente propuesto por Carl Troll en 1939 quién identificó la necesidad de tener una visión integral de los ecosistemas (Troll, 2003), la ciencia del paisaje nació a principios del siglo XIX y fue acogida en el marco científico por el geógrafo alemán Alexander von Humboldt en 1853 (Humboldt, 1853).

Esta ciencia nació producto de la necesidad de localizar unidades significativas y distintivas dentro del territorio que se debe gestionar. Algunos de los padres fundadores de la ecología moderna del paisaje, son ecólogos cualificados como Turner et al. (2001). La ecología del paisaje recoge elementos transversales de muchas subdisciplinas de la ecología, en cuanto al análisis del paisaje se utilizan instrumentos del contexto socioeconómico, ecológico y biológico. Además, la exigencia y complejidad de interpretarla por ser interdisciplinaria la llevó a la cima de la investigación ecológica (Farina, 2016).

Existen muchas definiciones de paisaje que han evolucionado de forma independiente en un gran número de países con diferentes enfoques y no siempre siguen las mismas pautas, lo que genera confusión (Morlans, 2005). Por otro lado, desde un enfoque sistémico se define el paisaje como un espacio geográfico donde la complejidad ecológica mediante los actores concurrentes se expresa de modo diferente y cuyas funciones se superponen e interaccionan a través de mecanismos de retroalimentación (Farina, 2016).

Para algunos autores los componentes que conforman el paisaje en un ámbito científico son los perceptibles (rocas, agua, vegetación, etc.) y para otros, incluye los componentes abstractos como los conceptos de geosistemas o ecosistemas que no son fáciles de percibir (González, 2018). Para cada paisaje a evaluar se deben separar sus componentes (relieve,

cobertura vegetal, agua y los elementos antrópicos), para de esta manera facilitar su análisis (Muñoz, 2004).

De los elementos estructurales básicos que componen un paisaje están los parches, corredores y matrices, este último es el más extenso y el más interconectado, adquiriendo así un papel dominante en el funcionamiento de un paisaje. Se define como matriz de un paisaje, aquel tipo de elemento del paisaje que ocupa la mayor área relativa (Etter, 1991).

Las dinámicas naturales del medio biótico, abiótico y de procesos antrópicos hacen que el paisaje se encuentre en constante evolución, dichas dinámicas se dan a escalas muy diversas siendo de ciclos cortos (incendios, plagas, etc.) o de ciclos largos como es el caso de la sucesión ecológica (Muñoz, 2004). Por otra parte, la escasez de estudios ha impedido entender las dinámicas temporales de paisajes antropogénicos (del Castillo, 2015; Ewers et al., 2013).

2.1.2 Fragmentación

La fragmentación ocurre debido a acciones tanto naturales como antropogénicas, lo que resulta en una matriz del paisaje que reduce las probabilidades de supervivencia de las especies que dependen de hábitats conservados.

Existe una relación directamente proporcional entre el tamaño de un parche específico y la riqueza de especies. Es importante destacar que los parches aislados generan alteraciones en la funcionalidad ecológica, tanto dentro de los hábitats como entre ellos, lo cual afecta procesos cruciales como la dispersión de semillas y el intercambio genético de la fauna (Collinge, 2009).

La fragmentación tiene impactos sobre la fauna y flora, si los parches en el tiempo se reducen, habrá incremento del efecto borde, pérdida de especies y afectación en los flujos genéticos de las poblaciones de manera que la configuración que adopte el paisaje tras este proceso y la conectividad entre manchas serán clave en la alteración sobre la riqueza de especies del hábitat (Hilty et al., 2012).

De acuerdo con Farina (2016), el proceso de fragmentación puede darse de dos formas principalmente:

- a. Se inicia mediante la perforación, este mecanismo se caracteriza por la ocurrencia de un vacío en cierta cubierta natural homogénea lo que conduce a otros efectos de la fragmentación.
- b. Se inicia con la disección, es el proceso más común en el trópico y obedece a la creación de bandas lineales, generalmente por causa de construcción de infraestructura vial.

2.1.3 Conectividad

La conectividad se define como la facilidad o dificultad que tiene un paisaje para permitir el movimiento (Taylor et al., 1993). De acuerdo con Calabrese y Fagan (2004), la conectividad del paisaje puede medirse por medio de tres tipos de métricas:

1. Conectividad estructural: incluye variables como la forma, ubicación del parche y el tamaño.
2. Conectividad potencial: en este conjunto de métricas se tienen en cuenta características físicas de los parches de hábitat y las longitudes medias de dispersión.
3. Conectividad actual: las variables físicas son medidas directamente del paisaje en general así mismo se caracterizan las rutas de las especies de fauna y flora dentro y entre los parches.

La conectividad ecológica entre los beneficios que trae para la biota se encuentran que genera mayor área de hábitat, en el sitio es posible albergar mayor diversidad, incremento de los sitios de alojamiento para más especies, se mantiene un funcionamiento óptimo del ecosistema, puede propiciar la incorporación de nuevos individuos que generen mayor riqueza local en flora y fauna a través de la dispersión e intercambio genético y favorece la polinización; así mismo esto trae beneficios para al ser humano por medio de corredores ecológicos, por ejemplo, como los servicios ecosistémicos, ayuda a prevenir la erosión, es una alternativa para

mitigar los procesos de remoción en masa, mitiga el impacto de cultivos agrícolas adyacentes en aspectos como la incorporación de pesticidas, insecticidas y fungicidas tanto al agua subterránea como a cuerpos de agua superficiales e impiden en cierta medida la lixiviación de nutrientes (Hilty et al., 2019).

2.1.4 Métricas del paisaje

En la ecología del paisaje una de las herramientas desarrolladas más populares y de mayor interés para su análisis son las denominadas métricas (McGarigal et al., 2002). Las métricas de paisaje más utilizadas tienen su origen de la teoría de la percolación, la geometría fractal y la teoría de la de la información, igualmente la disponibilidad de datos espaciales ha favorecido el desarrollo, comprobación y aplicación de estas (Cardille y Turner, 2017).

McGarigal et al. (2002) afirmaron que los métodos de la ecología del paisaje pueden aplicarse en tres niveles:

1. A nivel de fragmento, es decir a cada parche de manera individual.
2. A nivel de clase, se refiere al conjunto de fragmentos que representan un mismo tipo.
3. A nivel de paisaje, refiriéndose a la unidad mínima del paisaje es decir los fragmentos y clases.

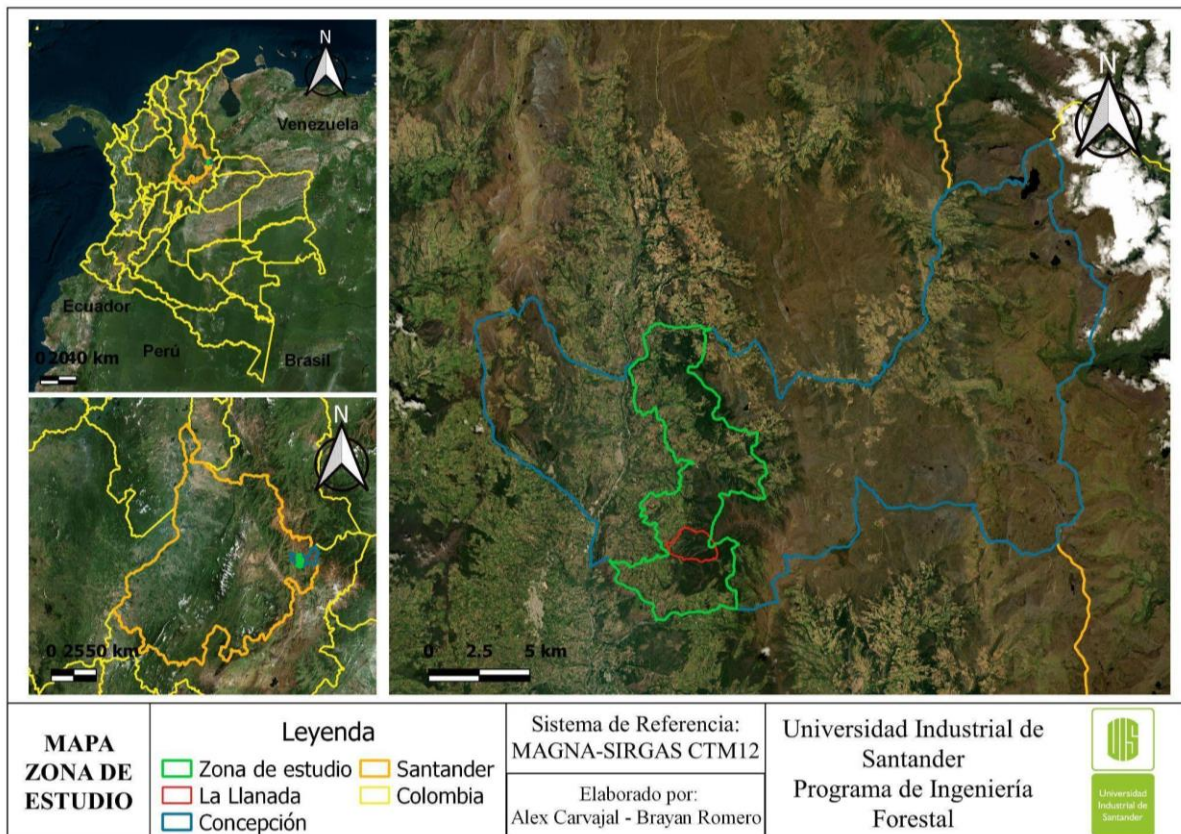
Las métricas al ser medidas cuantitativas pueden ser calculadas mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y software que están limitados a la escala, interpretación de índices y la calidad de los datos según la complejidad del paisaje (Acuña, 2010). Gracias a la introducción de *FRAGSTATS* en 1995 se facilitó el uso de softwares (Gustafson, 2019) y el paquete *landscapemetrics* permite calcular la mayoría de las métricas en el entorno de R (Hesselbarth et al., 2019). Además, el paquete de Makurhini tiene una gran ventaja ya que permite calcular métricas y/o índices de fragmentación y conectividad, proporcionando un conjunto de funciones para identificar la conectividad del paisaje además de evaluar los escenarios bajo cambios en la conectividad del paisaje (Godínez y Correa, 2020).

3. Metodología

3.1 Área de estudio

Se definió el área de estudio (Figura 1) tomando como referencia el rango altitudinal con el que cuenta la Reserva Natural de la Sociedad Civil “La Llanada”, el cual comprende alturas entre los 2300 a 3100 m s. n. m. La delimitación del área de estudio se realizó a partir de un modelo de elevación digital descargado de la página *ASF Data Search* (National Aeronautics and Space Administration, 2022). La reserva fue legalmente constituida ante Parques Nacionales Naturales de Colombia mediante resolución 0209 del 30 de diciembre del 2015. El área total objeto de estudio consta de aproximadamente 5385 ha, hace parte de las veredas Tenerife, Junín, Bárbula y Ayacucho del municipio de Concepción, Santander.

El área de interés está en la zona de vida de bosque húmedo montano bajo (bh-MB), la humedad relativa es del 80%, la temperatura oscila entre 12 a 18 °C, la precipitación media anual es de 1640 mm (Departamento de Santander y Universidad Industrial de Santander, 2011). Las especies forestales más representativas son *Quercus humboldtii* Bonpl., *Clusia multiflora* Kunth, *Myrsine coriacea* (Sw.) R.Br. ex Roem. y Schult., *Viburnum triphyllum* Benth., *Escallonia pendula* (Ruiz y Pav.) Pers., *Panopsis yolombo* (Posada-Ar.) Killip, *Clethra revoluta* (Ruiz y Pav.) Spreng. y *Gaiadendron punctatum* (Ruiz y Pav.) G.Don (Hernández Barajas y Álvarez Esteban, 2020), mientras que la fauna registrada para la zona corresponde a algunas especies de mamíferos, como *Leopardus tigrinus*, *Leopardus pardalis*, *Cuniculus taczanowskii*, *Didelphys pernigra*, *Mustela frenata*, *Dasypus novemcintus*, entre otros (Caballero Cornejo y Fayad Cornejo, 2021).

Figura 1*Zona de estudio*

3.2 Descarga de imagen satelital

Se descargó una imagen satelital de PlanetScope de la plataforma Planet. Esta imagen tiene como fecha de captura el 22 de mayo del 2022, cuenta con resolución espacial de 3 x 3 m y resolución espectral de 4 bandas (Blue, Green, Red y NIR). Este producto antes de la descarga ya se encontraba ortorectificado, radiométricamente corregido, así mismo, con correcciones atmosféricas y geométricas (Frazier y Hemingway, 2021).

3.3 Clasificación supervisada de coberturas del suelo

Utilizando como referencia la escena PlanetScope, se realizaron recorridos en campo para georreferenciar diferentes tipos de coberturas que se pudieron identificar mediante la fotointerpretación de la imagen (Apéndice A y B). Los tipos de cobertura se definieron utilizando la metodología *Corine Land Cover* (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales [IDEAM], 2010) adaptada para Colombia y teniendo en cuenta el mapa nacional de coberturas de la tierra (IDEAM, 2018).

Se estimó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), así mismo, con base en la banda NIR, se estimaron medidas de texturas (varianza, media, homogeneidad, contraste, disimilaridad, entropía y segundo momento (Bolívar-Santamaría y Reu, 2021)) que han sido usadas para evaluar el paisaje utilizando la matriz de coocurrencia de grises (Haralick et al., 1973), esto se realizó en el software R (RStudio Team, 2021) para mejorar la precisión de la clasificación (Apéndice C). Con esto, más los 270 puntos georreferenciados del área de estudio, se realizó una clasificación supervisada de las coberturas del suelo con algoritmo Random forest -RF- (Breiman, 2001) y las librerías “raster”, “rasterVis”, “RColorBrewer”, “rgeos”, “rpart”, “rattle”, “randomforest” y “sf” en el software R (Bivand y Rundel, 2022; Edzer, 2018; Hijmans, 2023).

Para comprobar la precisión de la clasificación supervisada se validó el modelo de Random forest con la tasa de error Out Of Bag (OOB), la cual tiene en cuenta las observaciones no incluidas en la construcción de los árboles de decisión (Moham-madpour et al., 2022).

3.4 Especies indicadoras de conectividad funcional del paisaje

Con el fin de poder estimar algunas métricas de conectividad como el Índice Integral de Conectividad (IIC) y el Índice de Probabilidad de Conectividad (PC) se tuvo en cuenta la presencia de especies clave (*Leopardus pardalis*, *Leopardus tigrinus* y *Spizaetus isidori*) en la zona de estudio. También, se realizó un acercamiento con la comunidad campesina que habita áreas cercanas a estos bosques para lograr identificar las zonas de presencia de algunas de las especies clave (Restrepo, 2016).

Para mejorar la precisión de la información brindada por la comunidad, se les proporcionó un plegable en el que de manera ilustrativa se explican las características de las especies de interés (Apéndice D). Algunas de las personas visitadas permitieron que,

transcurridos algunos días, se les realizaron cuestionarios por medio de llamada telefónica (Hernández et al., 2014) para conocer más a detalle la presencia de especies.

3.5 Fragmentación y conectividad del paisaje

Se usaron los paquetes Makurhini en el software R *project* para estimar métricas de fragmentación y conectividad del paisaje en busca de priorizar zonas a conectar y sugerir estrategias de desarrollo sostenible (Godínez y Correa, 2020; Hesselbarth et al., 2021).

3.5.1 Fragmentación

Para estimar la fragmentación, con ayuda de las librerías “sf”, “ggplot2”, “igraph”, “rgdal” y “terra” se calcularon las siguientes métricas:

- **Número de parches:** permite conocer qué cobertura se establece como la matriz del paisaje.
- **Área de la cobertura:** se obtiene el área que cada cobertura tiene dentro del paisaje con la Ecuación 1.

$$ATC = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

Donde:

ATC: área total de la clase

a_{ij}: área de cada parche de tipo *i*

- **Área promedio de parche:** con esta métrica se conoce la media del área que tiene cada cobertura con la Ecuación 2.

$$AMP = \frac{\sum_{j=i}^n a_{ij}}{n_i} \quad (2)$$

Donde:

AMP: área media del parche

n_i: número de parches de clase *i*

a_{ij}: área de cada parche de tipo *i*

- **Total del borde:** es el total de longitud de borde en un paisaje entre fragmentos i y k (Farina, 2022c), se estima haciendo uso de la Ecuación 3.

$$B = \sum_{k=1}^m e_{ik} \quad (3)$$

Donde:

B : borde entre parches de tipo i y k

e_{ik} : borde total

- **Índice de forma promedio:** permite conocer la media de la relación entre el perímetro y el área de los parches de coberturas (Farina, 2016) y se estimó haciendo uso de la Ecuación 4.

$$y^1 = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P} \quad (4)$$

Donde:

y^1 : forma del parche

A : área

P : perímetro

Rango:

$y^1 = 1$, los parches son circulares

$y^1 < 1$, la forma de los fragmentos es en base a cuadrados

$y^1 > 1$, la forma es irregular.

- **Dimensión fractal:** esta métrica estima la complejidad de la forma a través de las dimensiones de área y perímetro y se calcula con la Ecuación 5 (McGarigal, 2014). Los valores deben estar en un rango entre 0 y 2, donde valores cercanos a 1 son formas simples del parche, mientras que cercanos a 2 indican rugosidad o complejidad geométrica (Imre y Bogaert, 2004; McGarigal, 2014).

$$FRACd = \frac{[n_i \sum_{j=1}^n (\ln P_{ij} * \ln a_{ij})] - (\sum_{j=1}^n \ln p_{ij})(\sum_{j=1}^n \ln a_{ij})}{(n_j \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2) - (\sum_{j=1}^n \ln p_{ij})^2} \quad (5)$$

Donde:

FRACd: dimensión fractal

a_{ij}: área del parche *ij*

P_{ij}: perímetro del parche *ij*

n_i: número de parches de cobertura *i*

3.5.2 Conectividad

Se estimaron los siguientes índices de conectividad ya que tienen un buen desempeño para la planificación de conservación del paisaje (Pascual-Hortal y Saura, 2006; Saura y Pascual-Hortal, 2007).

- **Índice integral de conectividad (ICC):** este índice considera la disponibilidad del hábitat, el aspecto estructural y funcional para la conectividad del paisaje, sus valores varían de 0 a 1 aumentando con la mejora de la conectividad (Pascual-Hortal y Saura, 2006). El valor es dado por la Ecuación 6.

$$ICC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (6)$$

Donde *a_i* es el área de cada parche forestal, *A_L* es el total del “Conjunto del paisaje” y *nl_{ij}* es el número de enlaces en el camino más corto (distancia topológica) entre los parches forestales *i* y *j* (Pascual-Hortal y Saura, 2006).

Para calcular la importancia relativa de cada elemento de hábitat (*dIIC*) para el mantenimiento de la conectividad se utilizó la Ecuación 7.

$$dIIC = 100 \cdot \frac{IIC - IIC'}{IIC} \quad (7)$$

Donde IIC y IIC' corresponde al valor de IIC antes y después respectivamente de la pérdida de un cierto elemento de hábitat -parche forestal- (Pascual-Hortal y Saura, 2006).

- **Índice de Probabilidad de Conectividad (PC):** se define como la probabilidad de que dos animales colocados al azar dentro del paisaje caigan en áreas de hábitat que son accesibles entre sí (interconectadas), a través de parches más grandes o de conexiones más numerosas (Saura et al., 2017). Está dada en la siguiente ecuación:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (8)$$

Donde a_i y a_j son las áreas de los parches de hábitat i y j , y A_L es el área total del paisaje. p_{ij}^* se define como la probabilidad de producto máxima de todos los caminos posibles entre los parches i y j .

El dPC es la variación relativa de PC, la cual calcula la contribución relativa de un determinado parche (k) a la conectividad total del hábitat (Saura y Rubio, 2010; Saura et al., 2011), se define como:

$$dPC_k = 100 \times \frac{PC - PC_{remove}}{PC} \quad (9)$$

Para las distancias de desplazamiento se tuvieron en cuenta las especies registradas en el cuestionario que se realizó a la comunidad seleccionando una especie para las distancias de dispersión alta, media y baja. Adicionalmente, para obtener las distancias de menor costo se elaboró un ráster de resistencia en el software R asumiendo que las características del paisaje determinan la dispersión de las especies por lo que se le asignó un valor de resistencia de 1 a 10 a cada cobertura, donde 10 es la resistencia máxima al movimiento (Savary, 2020).

3.6 Estrategias de desarrollo sostenible para mejorar conectividad

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), esto para limitar el conjunto de variables a aquellas que no se correlacionan entre sí y que explican la mayor varianza (Véliz, 2020). Para ello, se normalizaron los datos de las variables pendiente, dirección de flujo y las métricas tanto de conectividad como de fragmentación (Kumar et al., 2018). Con el insumo del ACP y el criterio de los investigadores se asignaron pesos para que mediante el análisis multicriterio se priorizaran áreas a conectar.

Con esto, se obtuvo una menor cantidad de variables que no están correlacionadas y que explican un mayor porcentaje de varianza (Véliz, 2020). Lo anterior, con el fin de reducir el *input dataset* para el análisis multicriterio que definió las zonas prioritarias a conectar.

Posteriormente, se realizó un análisis multicriterio (AMC) el cual es una técnica ampliamente aplicada para resolver problemas que involucren múltiples criterios o variables, lo que la hace una herramienta valiosa para la gestión forestal (Mendoza y Prabhu, 2005). Para lograrlo, se procedió a rasterizar los insumos y realizar una reclasificación en el software QGIS, se asignó el valor 1 a los valores de cada variable menos críticos y el valor 5 a aquellos valores que implican mayor prioridad para la conectividad. Luego, se utilizó la calculadora ráster para asignar un porcentaje de importancia a cada uno de los ráster resultantes y así obtener áreas prioritarias a conectar. A dichas áreas se le realizó un *buffer* de 150 m.

Con el fin de sugerir alternativas de desarrollo que mejoren la conectividad ecológica, se evaluó el panorama general del suelo tomando como base la cartografía generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi escala 1:100.000 respecto a parámetros de fertilidad, de propiedades físicas y químicas del suelo; así mismo, se tuvieron en cuenta los *shapes files* de vocación de uso de la tierra para los *buffers*.

Una vez se obtuvo un panorama general del suelo con los resultados de las áreas prioritarias a conectar, métricas de fragmentación y conectividad, se sugieren estrategias que

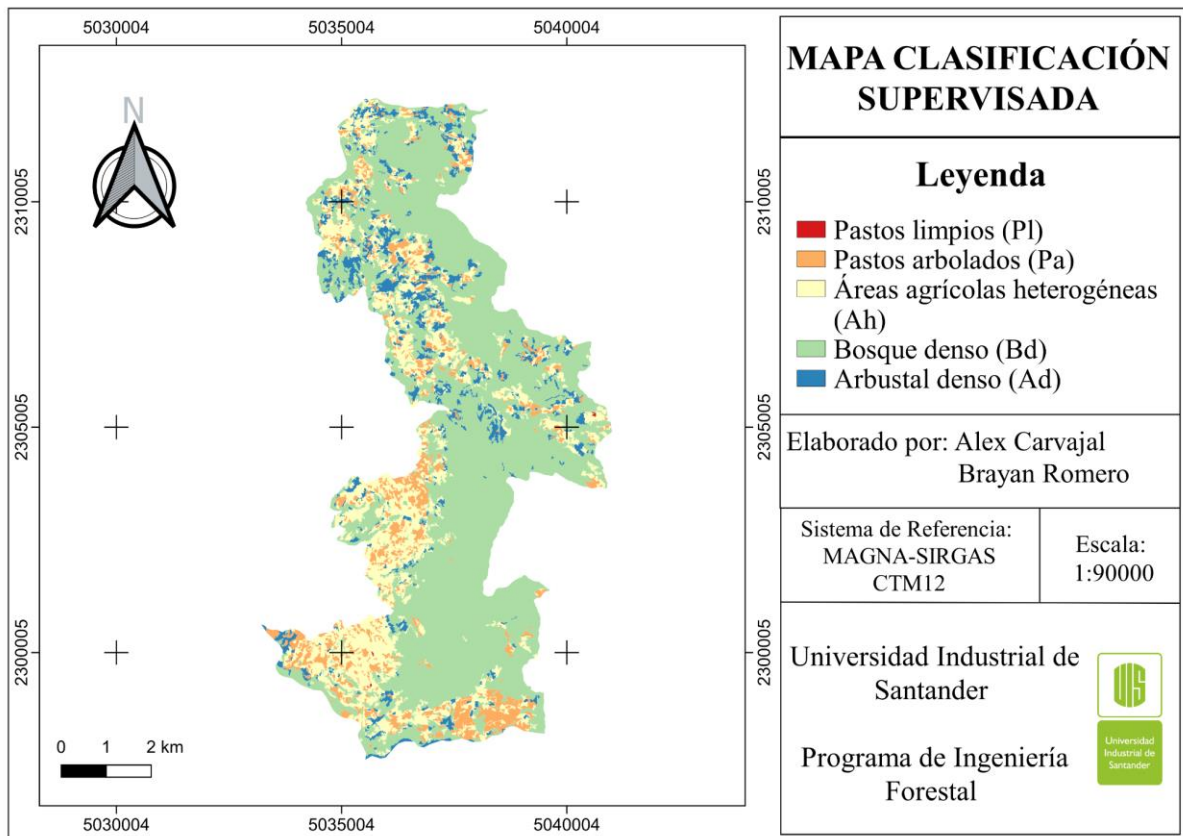
tienen un impacto positivo en el principal agente modelador del paisaje que, en este caso, son las comunidades que habitan el área en estudio.

Con lo anterior, se busca establecer una línea base de investigación en que se establezca para el área de estudio el grado de conectividad actual de las masas forestales a escala de paisaje y, en un futuro, se den procesos en que se beneficie a la comunidad y se mejoren los procesos ecológicos.

4. Resultados

4.1 Clasificación supervisada

Se obtuvo la clasificación de las coberturas del suelo cuya confiabilidad derivada de la tasa de error OOB es del 77,82 % (Figura 2). La matriz del paisaje es el bosque denso (Bd) con un 61,39 % del área total, sin embargo, se hablará de ellos como parches de hábitat tomando como referencia a Carvalho et al. (2021). Así mismo, otras coberturas con una alta representatividad dentro del paisaje son las áreas agrícolas heterogéneas (Ah) con 19,85 % y pastos arbolados (Pa) con 10,57 %.

Figura 2*Clasificación supervisada generada con el algoritmo random forest*

4.2 Fragmentación del paisaje

En el paisaje se obtuvieron 1227 parches de los cuales la mayor cantidad corresponden a Pa (481), Ad (338), Ah (270) y Bd (135). La mayor área promedio se registró para el bosque denso Bd (24 ha) y las áreas agrícolas heterogéneas Ah (4 ha). En la Tabla 1, se relacionan las métricas de fragmentación estimadas.

Tabla 1*Métricas de fragmentación.*

Cobertura	Número de parches	Área promedio (ha)	Área de la cobertura (ha)	Total del borde (km)	Índice de forma promedio	Dimensión fractal media
Bosque denso	135	24,4	3305,4	713,667	1,765	0,4339
Arbustal denso	338	1,3	439,8	394,390	0,016	0,589
Áreas agrícolas heterogéneas	270	4,0	1068,8	791,511	0,158	0,446
Pastos limpios	3	0,50	14,9	2,070	0,0044	0,6616
Pastos arbolados	481	1,2	569,06	474,839	0,0153	0,6235

Nota. Bosque denso (Bd), Arbustal denso (Ad), Áreas agrícolas heterogéneas (Ah), Pastos limpios (Pl) y Pastos arbolados (Pa).

Las coberturas con mayor borde total son Ah con 791,5 km seguida por Bd con 713,6 km y Pa con 474,8 km. Por su parte, las coberturas con menor borde son Ad con 394,4 km y pastos limpios Pl con 2,1 km.

El índice de forma permitió conocer que los parches de hábitat (Bd) tienen una forma irregular con un valor medio de 1,76. Para las coberturas Pl, Pa, Ah y Ad se identificó que las formas de los parches tienden a ser simples y cuadradas con valores en promedio de 0,048.

Para el caso de la dimensión fractal, se observa que ninguna cobertura presenta complejidad en su forma.

4.3 Conectividad del paisaje

Para seleccionar las distancias de dispersión a analizar, se tuvo en cuenta la lista de especies registradas en el cuestionario realizado a la comunidad (Apéndice E). De este modo, se escogieron tres distancias que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2

Distancias de dispersión de las especies seleccionadas

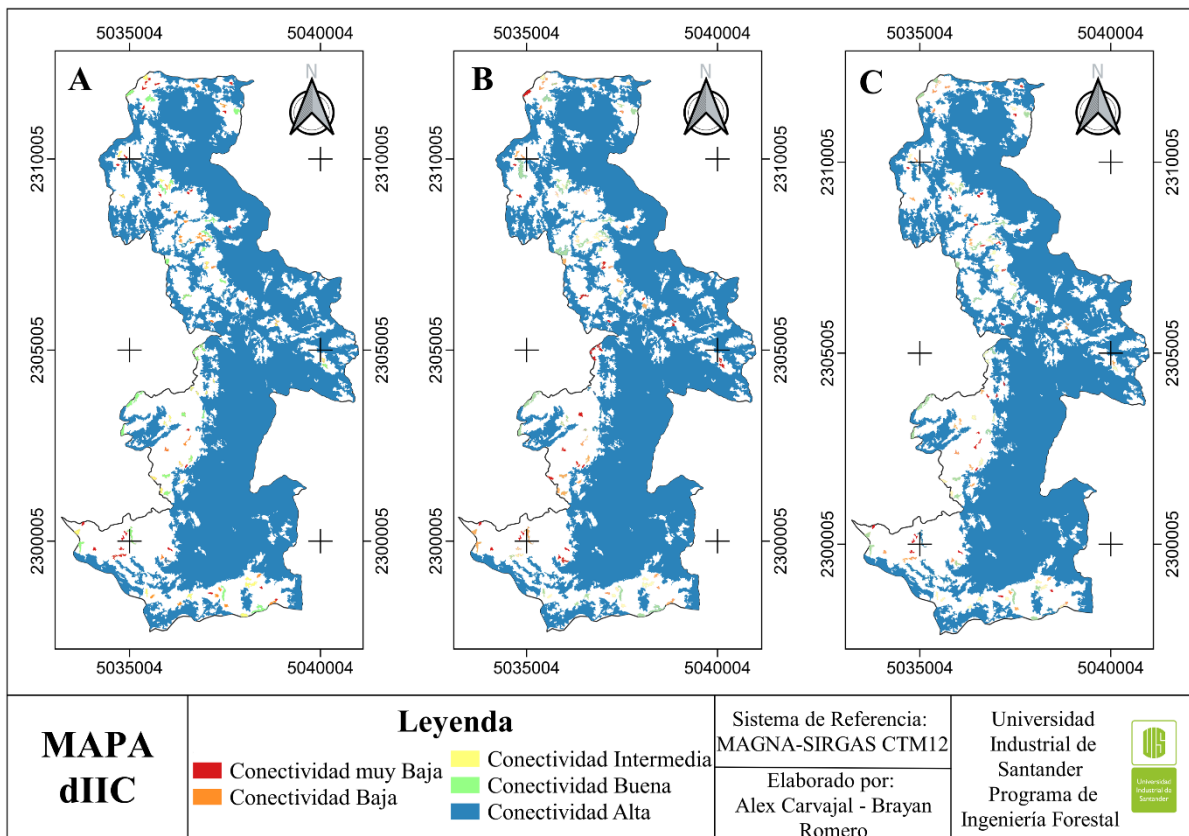
Nombre Común	Nombre científico	Distancia de Dispersión (km)	Fuente
Ocelote	<i>Leopardus pardalis</i>	3	(Pérez y Santos, 2015)
Venado cola blanca	<i>Odocoileus virginianus</i>	1,1	(Hernández, 2014)
Armadillo nueve bandas	<i>Dasypus novemcinctus</i>	0,2	(Wilson y Mittermeier, 2018)

En lo que respecta al ráster de resistencia, se asignaron los siguientes valores a cada una de las coberturas, considerando que el valor máximo de resistencia para permitir la movilidad de las especies es de 10: Bd (1), Ad (3), Pa (5), Ah (7), y Pl (10).

- Índice integral de conectividad (IIC): En la Figura 3, se observa la salida cartográfica del dIIC para cada una de las distancias de dispersión seleccionadas.

Figura 3

Mapa delta Índice Integral de Conectividad



Nota. Mapa del dIIC para las distancias de: (A) Ocelote – 3 km, (B) Venado – 1,1 km y (C) Armadillo – 0,2 km.

En la Tabla 3, Se muestran los datos correspondientes a los valores de conectividad donde las categorías muy baja y baja, indican parches de hábitat con corredores naturales limitados. Los datos presentados en la tabla incluyen el área correspondiente a cada categoría de conectividad.

Tabla 3

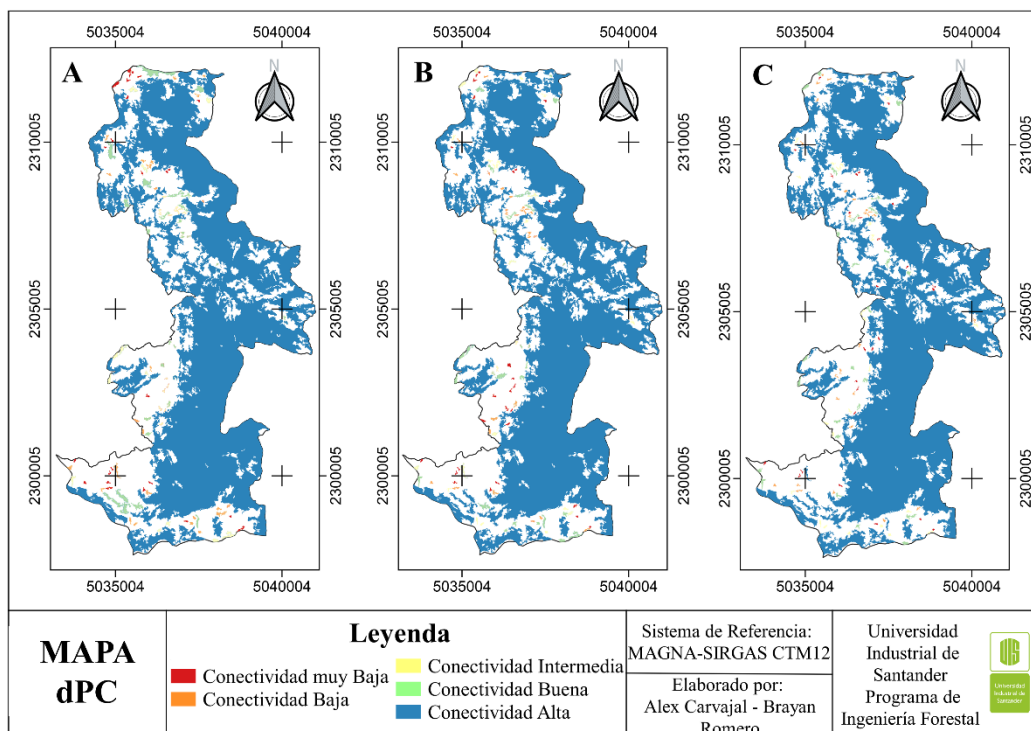
Datos de área en ha para categorías del dIIC

Distancia de dispersión (km)	Conectividad				
	Muy Baja	Baja	Intermedia	Buena	Alta
3	9,6	12,1	17,6	34,4	3231,8
1,1	15,8	19,0	14,0	37,1	3219,6
0,2	8,9	12,5	18,1	30,6	3235,4

➤ Índice de Probabilidad de Conectividad (PC): En la Figura 4, se observa la salida cartográfica del dPC para cada una de las distancias de dispersión seleccionadas.

Figura 4.

Mapa Índice de Probabilidad de Conectividad



Nota. Mapa del dPC para las distancias de: (A) Ocelote – 3 km, (B) Venado – 1,1 km y (C) Armadillo – 0,2 km.

Al igual que en el dIIC, la Tabla 4 muestra los datos correspondientes a las categorías de conectividad, donde los datos presentados muestran el área correspondiente a dichas categorías para el dPC.

Tabla 4

Datos del área en ha para categorías del dPC

Distancia de dispersión (km)	Conectividad				
	Muy Baja	Baja	Intermedia	Buena	Alta
3	12,1	18,8	22,8	56,9	3194,9
1,1	59,4	75,6	75,4	61,3	3033,7
0,2	8,5	11,7	17,2	32,0	3236,1

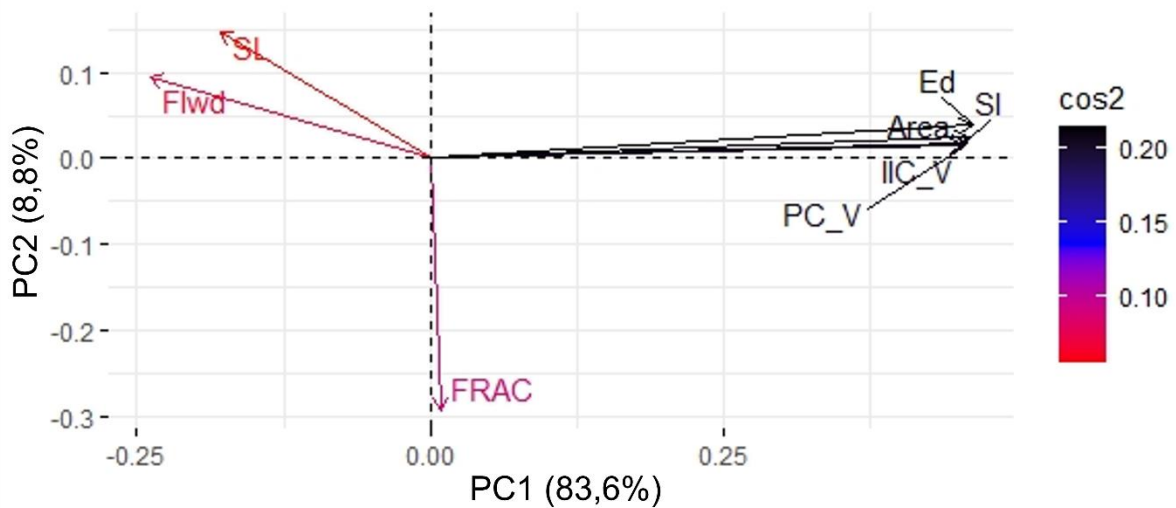
4.4 Análisis de componentes principales

Puesto que se estimaron las métricas dIIC y dPC para las tres diferentes distancias de dispersión de las tres especies seleccionadas, se evaluó la correlación de los resultados obtenidos para las variables. Como se evidencia en el Apéndice F, existe una alta correlación entre las métricas de conectividad para las tres distancias de dispersión lo que supone inoficioso incluirlas todas en el ACP, por ello se tomó en cuenta únicamente la distancia media del venado cola blanca (1,1 km).

Con las métricas de fragmentación, conectividad y las variables adicionales estimadas, se obtuvo la salida gráfica para el ACP (Figura 5), el cual refleja una agrupación hacia el componente principal 1, lo que quiere decir que éste explica la mayor cantidad de varianza.

Figura 5

Explicación de la mayor varianza del conjunto de variables



El componente principal 1 (PC1) explica el 83,6 % de la varianza de los datos, las variables con mayores aportes a este componente son dIIC con el 14 %, PC con el 14,02 %, área de parches (Área) con 14 - 12 %, total del borde (Ed) con el 14,2 % e índice de forma (SI) con el 14 %. Este componente permite entender la conectividad de las coberturas de bosque ya que contempla variables que generalmente influyen en el flujo de materia y energía en el paisaje.

Por su parte, el segundo componente principal (PC2) explica el 8,8 % de la varianza de los datos y las variables con mayores aportes son: FRAC con el 4 %, SI con el 2 %, Flwd con el 1,2 %. Con este se puede interpretar la escorrentía superficial ya que relaciona hacia dónde fluye el agua con la pendiente de un área. Por su parte, la variable FRAC presenta ruido al existir diferentes valores atípicos que pueden deberse a la heterogeneidad de la forma y tamaño de las áreas de bosque.

4.5 Análisis multicriterio (AMC)

Una vez identificadas las variables con mayor influencia en la conectividad del paisaje, se realizó la reclasificación de cada ráster para la priorización de rangos críticos para la conectividad y se les asignó un porcentaje de importancia como se muestra en la Tabla 5.

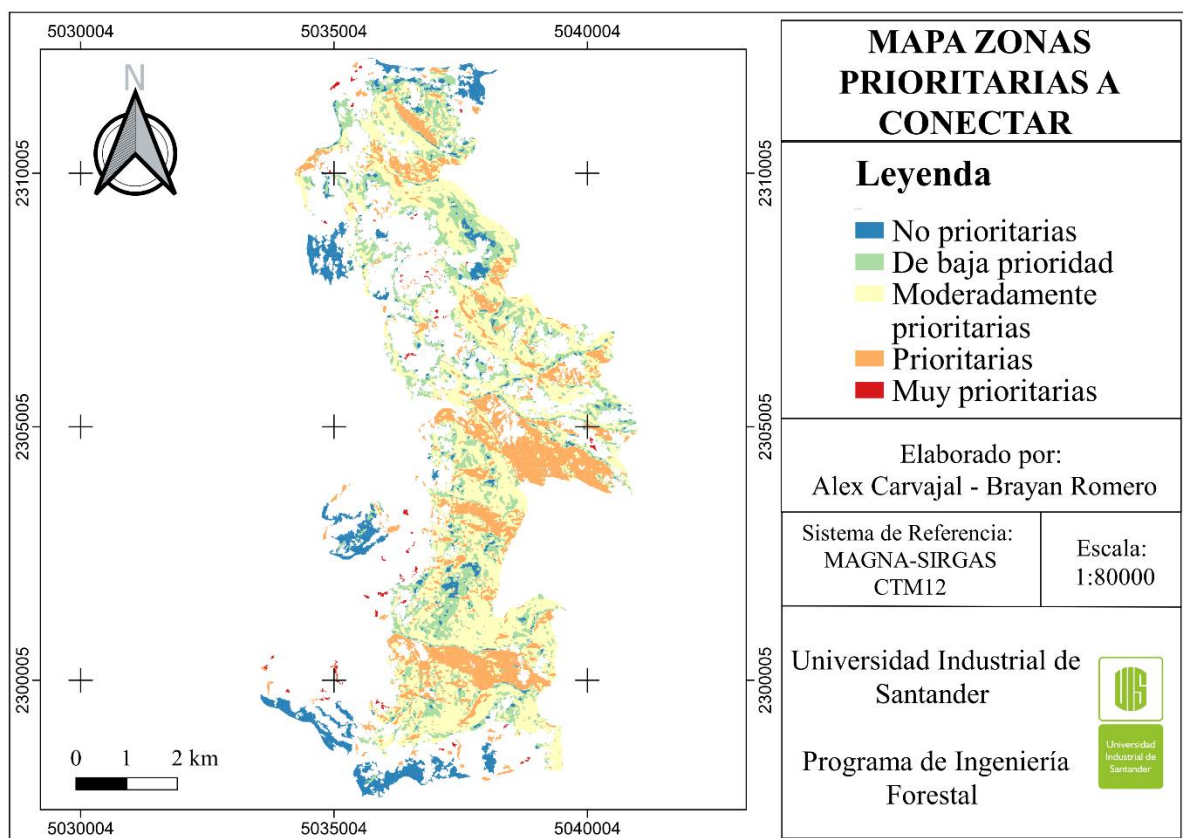
Tabla 5.*Rangos priorizados para identificar las áreas más conectadas*

Insumo	Reclasificación					Peso (%)
	1	2	3	4	5	
dIIC	99,864689	0,027066	0,026524	0,026417	0,026348	15
	a	a	a	a	a	
dPC	0,027066	0,026524	0,026417	0,026348	0,026316	25
	99,882913	0,000309	0,000063	0,000026	0,000011	
Pendiente (°)	a	a	a	a	a	5
	0,000309	0,000063	0,000026	0,000011	0,000002	
Dimensión fractal	10,8 a	22,5 a 45	45 a 67,5	67,5 a 90		5
	0 a 10,8	22,5				
Índice de forma promedio	-4,6207 a	0,15 a	0,3 a	0,4339 a	0,7056 a	15
	0,15	0,3	0,4339	0,7056	2,8285	
Total de borde (km)	0,00160 a	0,340 a	0,8 a 1,3	1,3 a	1,76557 a	5
	0,340	0,8		1,76557	231,38810	
Dirección de flujo	0,336 a 1	1 a 3	3 a 5,286	5,286 a	100 a	5
				100	475,760	
Área (ha)	0 a 25,6	25,6 a	51,2 a	76,8 a	102,4 a	25
	2933,6970	49 a	24,48 a 3	3 a	0,3945 a	
	a 49	24,48		0,3945	0,2340	

De acuerdo con el Análisis Multicriterio (AMC) llevado a cabo, se identificaron zonas muy prioritarias a conectar las cuales presentaron una extensión total de 19,392 ha, lo que representa el 0,5% de la cobertura boscosa total (Figura 6). Estas zonas se consideran críticas debido a que presentan índices de conectividad bajos, pendientes abruptas y áreas de parches pequeñas e irregulares.

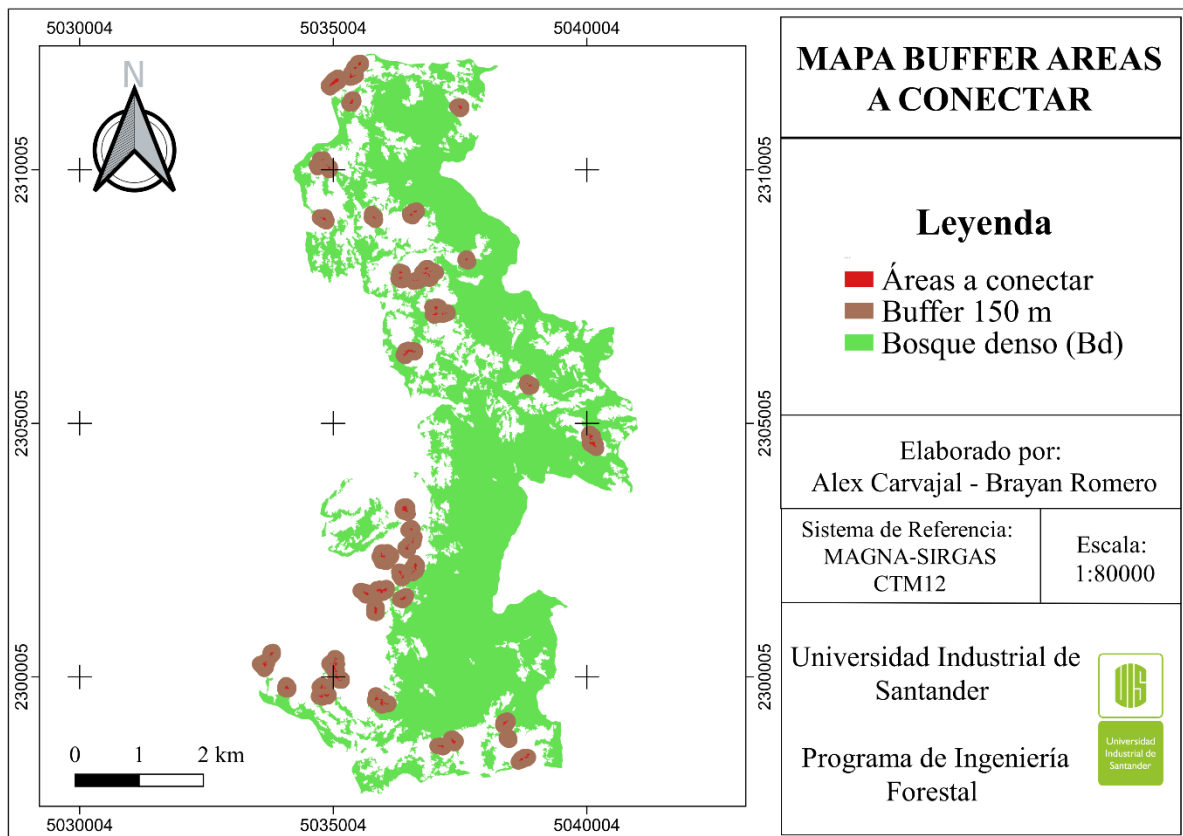
Figura 6

Mapa zonas prioritarias a conectar a partir de AMC

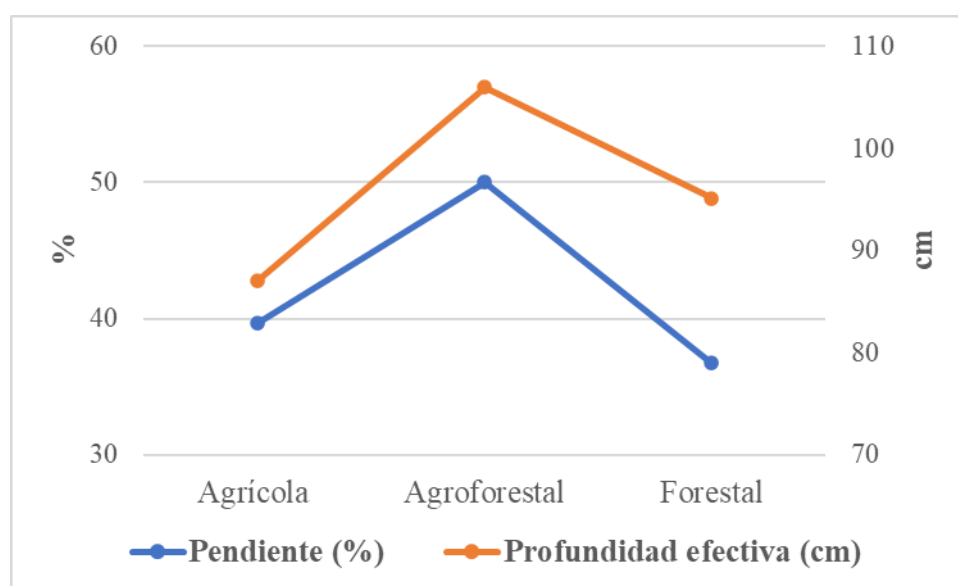


4.6 Suelos de las áreas priorizadas

Se realizó un *buffer* de 150 m de radio a cada una de las áreas muy prioritarias a conectar, con un total de 533,3 ha como se observa en la Figura 7.

Figura 7*Mapa buffer áreas a conectar*

En el presente estudio, se realizó una evaluación del panorama general del suelo en los *buffers* para definir las estrategias de conectividad. Estos presentan una vocación agrícola en 179,6 ha, agroforestal en 173,8 ha y forestal en 180 ha. Para cada una de estas áreas, se calcularon los promedios de las variables cuantitativas relevantes, incluyendo la pendiente, acidez y profundidad efectiva (Figura 8), así como la moda de las variables cualitativas, tales como la fertilidad, clima, textura, drenaje y humedad (Tabla 6). Esto proporciona información valiosa sobre las características del suelo de las zonas a intervenir, lo que permite tomar decisiones informadas y así implementar estrategias de uso sostenible que mejoren la conectividad del paisaje.

Figura 8*Promedio variables cuantitativas en las distintas vocaciones*

Nota. La variable de pendiente muestra una varianza de 15,3, 0 y 13,9 en las vocaciones agrícola, agroforestal y forestal, respectivamente.

La variable de profundidad efectiva muestra una varianza de 6,7, 26,9 y 17 respectivamente. Por su parte, la variable pH presentó valor de 5,3 en las tres vocaciones del suelo lo que corresponde a suelos ácidos.

Tabla 6*Moda de variables cualitativas*

Variables	Vocación		
	Agrícola	Agroforestal	Forestal
Fertilidad	Media	Media	Media
Clima	Frío húmedo	Muy frío húmedo	Frío húmedo
Textura	FArA	FArA	FArA
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno
Humedad	Údico	Údico	Údico

Nota. La textura del suelo es Franco Arcillo Arenoso (FArA).

4.7 Estrategias de conectividad

La cobertura y uso del suelo en el área estudiada, debe procurar transformarse en busca de propiciar prácticas de manejo y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. El cambio en la forma de realizar actividades agropecuarias, por ejemplo, es clave para mejorar la fertilidad del suelo, conectividad del bosque y por ende la dispersión de fauna y flora.

Una manera de optimizar los sistemas productivos tradicionales, la conectividad ecológica y a su vez la productividad del suelo es a través de los sistemas agroforestales (SAF) lo cual: reduce las hierbas indeseadas y la afectación por pestes a cultivos perennes (Pumariño et al., 2015). Este tipo de sistemas mejoran la biodiversidad y servicios ecosistémicos debido a que distintos componentes y dinámicas ecológicas en un mismo tiempo-espacio proporcionan alimento, refugio y condiciones de microclima óptimas (Udawatta et al., 2019). Los SAF, además reducen la erosión, incrementan el carbón orgánico disponible en el suelo y por ende la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, así mismo, puede optimizar el aprovechamiento de minerales por cultivos (Muchane et al., 2020). A pesar de los múltiples beneficios que la agroforestería muestra, para su diseño e implementación es necesario tener en cuenta los riesgos asociados a las especies en particular al usarse para generar continuidad de cobertura forestal, ya que estas pueden permitir la propagación de enfermedades y plagas, facilitar la dispersión de especies invasoras y permitir que incendios forestales se extiendan a diferentes masas boscosas.

En este trabajo, se proponen algunas de las especies promisorias para la restauración y producción sostenible en zonas andinas (Cornelius et al., 2020; Montagnini et al., 2015) para el área de estudio:

➤ *Alnus acuminata*

De acuerdo con Cornelius et al. (2020) la posición taxonómica de *A.*

acuminata es la siguiente:

Orden: Fagales

Familia: Betulaceae

Género: *Alnus*

Especie: *Alnus acuminata* Kunth

Nombre común: Aliso, Fresno

El aliso es una especie heliófila y de rápido crecimiento, tiene un rango altitudinal que va desde los 1500 hasta los 2800 m s. n. m. Los suelos donde prospera son limosos o limo - arenosos de origen aluvial o volcánico (Mérida y Ibisch, 2003). Tienen la capacidad de desarrollarse en áreas alteradas, suelos degradados o erosionados y promueven el crecimiento de otras especies gracias a la simbiosis con hongos actinomicetos, esta es la razón por lo que se destaca en la recuperación de praderas degradadas (Chamorro y Rey, 2008).

Esta especie es multipropósito y se adapta a sistemas de árboles dispersos en áreas de pastoreo, cercas vivas en los agro hábitats y pastoreo bajo plantaciones proporciona sombra beneficiosa al ganado (Delgado, 2018). Se ha asociado con maíz, fríjol, pastos y mora silvestre (IDEAM, 2011).

Es altamente valorado por sus propiedades medicinales, así como por su madera que se utiliza tanto para combustible por su poder calorífico, así como para la elaboración de artesanías talladas (Castellanos y Montañez, 2017). Además, se destaca por su versatilidad en aplicaciones de carpintería, tornería, encofrados y se recomienda para reforestaciones (Núñez, 2012).

El diseño agroforestal que se sugiere es combinar la especie forestal (Aliso), con los cultivos comunes de la zona como la arveja o fríjol y para áreas menores a 2500 m s. n. m. en asociación con maíz. Las distancias de siembra sugeridas para el componente leñoso perenne es de 4 x 4 m y para el maíz de 40 cm entre plantas y 85

cm entre surcos. De igual manera se pueden asociar árboles dispersos con especies de pastos que están en el área como el *Pennisetum clandestinum* en un sistema silvopastoril (Russo, 1990).

➤ ***Escallonia pendula***

La posición taxonómica de *E. pendula* (Cornelius et al., 2020) es la siguiente:

Orden: Escalloniales

Familia: Escalloniaceae

Género: *Escallonia*

Especie: *Escallonia pendula* (Ruiz y Pav.) Pers.

Nombre común: Loqueto, Mangle

Se distribuye por los Andes entre los 1450 – 2660 m s. n. m., requiere suelos con buen drenaje, tolerante a la sombra y se adapta en suelos con poca fertilidad (Morales, 2018). Se usa como sombrío en sistemas silvopastoriles y agrícolas, cercas vivas, cortinas rompevientos y protegen las fuentes hídricas (CAR, 2007). La madera es de excelente calidad y duración, puede ser usada para carpintería ya que es semidura y de textura media (Reynel, 2009).

Se propone implementar en los lugares donde se encuentre la especie *E. pendula* sistemas de entomoforestería con colmenas de abejas nativas como la *Melipona* (Garzón et al., 2019). Así mismo, se sugieren implementar como sombra para el ganado en sistemas silvopastoriles de árboles dispersos.

➤ ***Erythrina edulis***

De acuerdo con Velásquez Holguín et al. (2019) la clasificación taxonómica de *E. edulis* es:

Orden: Fabales

Familia. Fabaceae

Subfamilia: Papilionoidae

Género: *Erythrina*

Especie: *Erythrina edulis* Triana ex Micheli

Nombre común: Chachafruto

Su distribución altitudinal oscila entre los 1000 a los 2800 m s. n. m. requiere de mucha luz y se adapta a temperaturas medias que oscilan entre 17 y 20,4 °C, así como, a una precipitación media anual de 2300 mm (IDEAM, 2011). Puede desarrollarse en suelos que presenten limitantes en la disponibilidad de agua y nutrientes (Velásquez Holguín et al., 2019).

El Chachafruto es considerado una especie promisoría, esto obedece a que su semilla es comestible y tradicionalmente ha sido usada para múltiples propósitos (Mariscal et al., 2022; Velásquez Holguín et al., 2019) tales como: en sistemas agroforestales combinada con papa, maíz, frijol y arveja (IDEAM, 2011) y mejoramiento de pasturas ya que aporta materia orgánica a través de la hojarasca, fija Nitrógeno, reduce la temperatura y regula la pérdida de agua de los suelos (Dagar y Gupta, 2020).

El diseño agroforestal que se sugiere es combinar la *Erythrina edulis* con los cultivos como la arveja o frijol y para áreas menores a 2500 m s. n. m. en asociación con maíz. Las distancias de siembra sugeridas para el componente perenne leñoso es de 4 x 4 m y para el maíz de 40 cm entre plantas y 85 cm entre surcos.

5. Discusión

Como se esperaba, la cobertura de bosque denso es la predominante en el paisaje y presenta agregación espacial, se observa que dichas áreas boscosas usualmente se asocian a

franjas protectoras de cuerpos hídricos, lugares de alta pendiente y difícil acceso lo que ralentiza que allí se establezcan sistemas productivos como lo son cultivos o pastos para actividades ganaderas. Esto, con la excepción del área de la Reserva Natural de la Sociedad Civil La Llanada, que por más de cinco décadas ha sido destinada en gran parte para la protección y también para la producción sostenible. Este tipo de iniciativas, contribuyen a conseguir las metas globales en las que, el país se ha comprometido (Roberts et al., 2020) como resultado de la firma de acuerdos internacionales de conservación tales como el Convenio en la Diversidad Biológica; que en particular en su agenda 2030 contempla conservar la biodiversidad, los servicios ecosistémicos y la conectividad; o como el ODS 15 que busca proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

Las métricas de fragmentación estimadas corresponden a lo encontrado por el *Human Footprint Index* para la ecorregión de Los Andes (Correa et al., 2020), ya que se obtuvo un alto porcentaje de cobertura de áreas agrícolas heterogéneas por lo que evidenciamos que los bosques húmedos montanos bajos presentes en esta zona, tienen un alto grado de transformación y se rodean por coberturas para actividades agropecuarias, esto tiene influencia negativa acentuada en pequeñas áreas de bosque (Farina, 2022b). En relación con la conectividad de las zonas de bosque, aunque estos tienen continuidad espacial, la geometría de dichas zonas como lo evidencia el índice de forma no es regular, esto implica mayores longitudes de borde (Farina, 2016), además, puede incidir en procesos ecológicos como el flujo de materia y energía en el paisaje (Farina, 2022b).

La mayoría de los estudios del paisaje se realizan a escala de ecorregiones o departamentos, como en la investigación de Moyano et al. (2022) en la que analizaron la conectividad ecológica de las áreas protegidas en el departamento de Caquetá, Colombia. Por

otro lado, Navarro (2022), evaluó los efectos ecológicos de la fragmentación antrópica en la ecorregión Puna de los Andes Centrales, Perú. Por esto, es importante estudiar el paisaje a una escala más detallada, como en nuestro caso. Por medio de la estimación del Índice Integral de Conectividad con los Sistemas de Información Geográfica, se obtiene una visión general de la estructura del hábitat a nivel regional, como lo demuestra Coria et al. (2016) en la sierra de Quila y las zonas adyacentes en el estado de Jalisco, México.

El abordaje metodológico buscó tener en cuenta el factor social, esto a través de la compilación de los saberes tradicionales y empíricos sobre la existencia o no de especies de fauna en la zona, que como lo indica Hersperger et al. (2021) es clave para la planificación del paisaje desde un enfoque participativo que involucre a los habitantes del área de interés, para el presente estudio, a pesar de la complejidad de interactuar con las comunidades, se considera un aporte importante, ya que permitió conocer las especies de fauna presentes en la zona y ha involucrado a las comunidades en este tipo de investigaciones. Es importante precisar, que para lograr un adecuado manejo de los suelos no basta solamente con la participación comunitaria y de las autoridades municipales, sino que, como indica Pinto-Correia y Kristensen (2013) se debe integrar lo económico y cultural.

El componente principal 1 que explica el 83,6% de la varianza junto con el criterio de los investigadores, fue un insumo clave para el análisis multicriterio. En este, se definieron los pesos a asignar a las variables que tienen mayor influencia en los flujos de materia y energía, como lo son el área, el grado de aislamiento de los bosques y su forma (Farina, 2022b). En las áreas prioritarias a conectar se encontró que los suelos presentan una posible toxicidad por ser fácilmente soluble el Aluminio. Esto, indica a su vez que la disponibilidad de Boro, Cobre, Zinc y Manganeso es buena; sin embargo, dichas áreas tienen poca disponibilidad de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio y Magnesio para su absorción por la vegetación.

Todo lo mencionado, permite conocer el estado actual en conectividad de los bosques y el panorama del suelo de las coberturas que lo rodean, lo que da pie a que en este estudio se aborde la agroforestería como sugerencia de estrategia productiva para que, desde la escala local se contribuya a mejorar la migración de especies entre parches de hábitat, así mismo, a hacer una aproximación al entendimiento del potencial de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para el manejo sostenible de los paisajes andinos. Lo anterior, ha sido sugerido (Jiménez-Ramírez y López-Arévalo, 2021; Plieninger et al., 2020) e implementado en ecosistemas andinos por otros investigadores en Colombia (IDEAM, 2011).

Las propuestas de estrategias de desarrollo sostenible responden a la necesidad de cambio de paradigma en cuanto al manejo tradicional de los suelos (Plieninger et al., 2020), como son los monocultivos y la ganadería a pesar de las altas pendientes, que aunque ha propiciado la seguridad alimentaria por generaciones, con la aceptación y posible ejecución a futuro de estas, se podría llevar a un aumento significativo en los beneficios económicos, así como en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. Estos incluyen la regulación hídrica y microclima, la mitigación de efectos globales por emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la conservación de la diversidad tanto de fauna como de flora a lo largo del tiempo y la retención de carbono (Udawatta et al., 2019).

Por último, es importante destacar el valor significativo de este estudio como investigación aplicada y propositiva llevada a cabo desde la universidad. Los hallazgos y sugerencias tienen el potencial de influir de manera directa en la toma de decisiones por parte de los diversos actores involucrados en la zona de estudio. Además, en procesos de planificación y ordenación del territorio a escala de municipios con el fin de desarrollar estrategias efectivas que promuevan, tanto la conservación como el manejo del ambiente y el bienestar de las comunidades locales.

6. Conclusiones

Aunque la matriz del paisaje es el Bd, se presentan parches de hábitat aislados e inmersos en extensas zonas con uso del suelo destinadas a actividades agropecuarias. Estos, además cuentan con tamaño reducido lo que podría perjudicar la calidad de hábitat para estas zonas y afectar tanto la biodiversidad como las dinámicas poblacionales de las especies clave.

Al evaluar la conectividad del hábitat de Bd, se evidencia una mayor resistencia de las otras coberturas para el desplazamiento de las especies. Estos factores, combinados con el tamaño de los parches, resultan en insumos clave para identificar las áreas prioritarias a conectar en la zona de estudio. Se resalta que el área de la Reserva Natural de la Sociedad Civil La Llanada es clave como elemento de conectividad estructural y funcional en el paisaje, y si esta no existiera, aumentaría la irregularidad, discontinuidad y aislamiento de los parches de hábitat. Por ello, estas iniciativas son fundamentales para alcanzar metas en materia de desarrollo sostenible a diferentes escalas.

Teniendo en cuenta que un 32,5% de las áreas prioritarias tiene vocación de uso del suelo para agroforestería, se hace una aproximación a través de las sugerencias de SAF a lo que podría ser el manejo sostenible del paisaje. Por tanto, es un importante insumo para la futura formulación de documentos oficiales de ordenación del territorio que propendan por beneficiar a las comunidades y ecosistemas en cuestión.

El 32.5 % de las áreas priorizadas tienen vocación agroforestal, por ello, a través de lo propuesto se hace una aproximación al manejo sostenible del paisaje. Esto es importante como insumo para formular y ejecutar futuros instrumentos de ordenación del territorio.

7. Recomendaciones

Se recomienda incluir información socioeconómica de las comunidades locales en el análisis multicriterio, como datos demográficos, actividades económicas y nivel educativo.

Estos aspectos son componentes importantes por considerar al tomar decisiones para definir las áreas prioritarias a conectar.

Además de integrar a las comunidades mediante los cuestionarios, sería bueno obtener información más precisa sobre las especies que se encuentran en la zona de estudio a través de muestreos con cámaras trampa y otras metodologías.

Como una aproximación a la conectividad estructural y funcional a escala veredal, este estudio es una línea base, por lo que, se recomiendan futuras investigaciones a escala municipal o provincial como insumos clave para los tomadores de decisiones y gestores del territorio.

Los resultados de este tipo de investigación y sus metodologías pueden incorporarse a los estudios que debe realizar cada municipio para la formulación de sus instrumentos de planificación territorial lo cual, junto a las anteriores recomendaciones, puede garantizar un abordaje holístico del paisaje hacia su gestión sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Acuña Caro, C. A. (2010). *Identificación de áreas prioritarias de conservación enfocadas hacia la conectividad estructural del corredor Encenillo (municipios de la Calera, Guasca, Sopo, Sesquilé, Guatavita), Cundinamarca* [Tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Agudelo, W. y Armenteras, D. (2017). Cambio climático en Ecosistemas Andinos de Colombia; una revisión de sus efectos sobre la Biodiversidad. En González Pinto, A. L. (Ed.), *Biodiversidad y cambio climático en Colombia: Avances, perspectivas y reflexiones* (pp 49-64), Bogotá D.C., Colombia: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Bivand, R. y Rundel, C. (2022). rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS'). R package version 0.6-1. <https://CRAN.R-project.org/package=rgeos>
- Bolívar-Santamaría, S., y Reu, B. (2021). Detection and characterization of agroforestry systems in the Colombian Andes using sentinel-2 imagery. *Agroforestry Systems*, 95(3), 499–514. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00597-8>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32.
- Caballero Cornejo, I. G., y Fayad Cornejo, N. (2021). *Diversidad de la Mastofauna Silvestre como Indicador Ecológico del Estado de Conservación, en Inmediaciones de la Cordillera Oriental de los Andes* [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Calabrese, J. M. y Fagan, W. F. (2004). A comparison-shopper's guide to connectivity metrics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(10), 529 – 536

- Cardille, J. A., y Turner, M. G. (2017). Understanding Landscape Metrics. En S. E. Gergel, y M. G. Turner (Eds.), *Learning Landscape Ecology: A Practical Guide to Concepts and Techniques* (pp. 45-63). Springer New York. https://10.1007/978-1-4939-6374-4_4
- Véliz, C. (2020). Aprendizaje automático. Introducción al aprendizaje profundo. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Castellanos Cáceres, E. F., y Montañez Moyano, M. C. (2017). *Composición química del aceite esencial y evaluación de la capacidad antioxidante y actividad antimicrobiana de las especies vegetales *Smallanthus Pyramidalis* (Arboloco) y *Alnus Acuminata* (Aliso)* [Tesis de pregrado]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Carvalho, W. D., Mustin, K., Farneda, F. Z., de Castro, I. J., Hilário, R. R., Martins, A. C. M., Miguel, J. D., da SilvaXavier, B., y de Toledo, J. J. (2021). Taxonomic, functional and phylogenetic bat diversity decrease from more to less complex natural habitats in the amazon. *Oecologia*, 197(1), 223-239. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-05009-3>
- Chamorro Viveros, D. R., y Rey Obando, A. M. (2008). El componente arbóreo como dinamizador del sistema de producción de leche en el trópico alto colombiano: experiencias de Corpoica-Tibaitatá
- Collinge, S. K. (2009). *Ecology of fragmented landscapes*. ProQuest Ebook Central. <https://ebookcentral.proquest.com>
- Coria, R. Á., García, R. V., Castroc, M. Á. M., y Garzad, E. T. (2016). Conectividad del hábitat forestal del ocelote (*Leopardus pardalis*). *en México*.
- Correa Ayram, C., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez Buriticá, S., Ramírez, W. y Corzo, G. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>

- Cornelius, J. P., Cerrón-Macha, J. N., del Castillo, J. D., y Valverde-Quiroz, J. C. (2020). Agroforestry species of Peru: Reference list and contribution to prioritization for the conservation of agroforestry genetic resources. Lima, Perú: World Agroforestry. <http://dx.doi.org/10.5716/WP20013.PDF>. <https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/27195/>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2007). Áreas protegidas del territorio CAR. <https://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/34133/04837.pdf?sequence>
- Costanza, J. K., y Terando, A. J. (2019). Landscape connectivity planning for adaptation to future climate and land-use change. *Current Landscape Ecology Reports*, 4, 1-13.
- Council of Europe. (2000). *The European Landscape Convention* (STE no. 176).
- Cutler, A., Cutler, D. R., y Stevens, J. R. (2012). Random Forests. In C. Zhang, y Y. Ma (Eds.), *Ensemble Machine Learning: Methods and Applications* (pp. 157-175). Springer New York. https://10.1007/978-1-4419-9326-7_5
- Dagar, J. C., y Gupta, S. R. (2020). Silvopasture Options for Enhanced Biological Productivity of Degraded Pasture/Grazing Lands: An Overview. En J. C. Dagar, S. R. Gupta y D. Teketay (Eds.), *Agroforestry for Degraded Landscapes: Recent Advances and Emerging Challenges - Vol. 2* (pp. 163-227). Springer Singapore. https://10.1007/978-981-15-6807-7_6
- del Castillo, R. F. (2015). A conceptual framework to describe the ecology of fragmented landscapes and implications for conservation and management. *Ecological Applications*, 25(6), 1447-1455.
- Mora Delgado, J. (2018). Aplicación de modelos matemáticos no lineales para la estimación de parámetros de crecimiento de *Alnus acuminata* en sistemas silvopastoriles de Roncesvalles, Tolima. In V. A. Holguín, J. R. Mora Delgado y I. Isis García (Eds.),

- Árboles y arbustos para silvopasturas: uso, calidad y alometría* (pp. 123-131). Sello Editorial Universidad del Tolima.
- Departamento de Santander y Universidad Industrial de Santander. (2011). Diagnóstico dimensión biofísico ambiental, territorial de Santander, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Edzer, P. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal*, 10(1), 439-446
- Etter, A. (1991). Introducción a la Ecología del Paisaje: un marco de integración para los levantamientos ecológicos. https://www.researchgate.net/publication/266391069_INTRODUCCION_A_LA_ECOLOGIA_DEL_PAISAJE_Un_Marco_de_Integracion_para_los_Levantamientos_Ecologicos
- Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K., Amaya, P. y Arévalo, P. (2017). Risk assessment of Colombian continental ecosystems an application of the Red List of Ecosystems methodology (v. 2.0). <https://iucnrle.org/blog/colombia-red-list-of-ecosystems-version-2.0/>.
- Ewers, R. M., Didham, R. K., Pearse, W. D., Lefebvre, V., Rosa, I. M., Carreiras, J. M., ... y Reuman, D. C. (2013). Using landscape history to predict biodiversity patterns in fragmented landscapes. *Ecology letters*, 16(10), 1221-1233.
- Fahrig, L. 2003. Effect of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 34, 487–515.
- Farina, A. (2016). *Ecología del Paisaje*. Publicacions Universitat Alacant. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/lc/uis/titulos/60609>
- Farina, A. (2022a). Principles and Methods in Landscape Ecology: An Agenda for the Second Millennium. En A. Farina (Ed.), *Principles and Methods in Landscape Ecology: An*

- Agenda for the Second Millennium* (pp. 1-42). Springer International Publishing.
https://10.1007/978-3-030-96611-9_1
- Farina, A. (2022b). Emerging Processes in the Landscape. En A. Farina (Ed.), *Principles and Methods in Landscape Ecology: An Agenda for the Second Millennium* (pp. 177-232). Springer International Publishing. https://10.1007/978-3-030-96611-9_5
- Farina, A. (2022c). Methods in Landscape Ecology. En A. Farina (Ed.), *Principles and Methods in Landscape Ecology: An Agenda for the Second Millennium* (pp. 401-439). Springer International Publishing. https://10.1007/978-3-030-96611-9_10
- Forman, R. T. (1995). *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge university press.
- Frazier, A., y Hemingway, B. (2021). A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, 13, 3930. <https://10.3390/rs13193930>
- Garzón, L., Cabrera, M. S., y Pinto, I. V. (2019). Determinación del origen botánico y análisis de la interacción planta-abeja en especies de meliponinos en un sistema agroforestal (la mesa, cundinamarca). Bogotá, Colombia. UDSF.
- Godínez Gomez, O. y Correa Ayram, C. (2020). Makurhini: Analyzing landscape connectivity. r package version 2.0.0. <https://github.com/connectscape/Makurhini>.
- González Molina, P. (2018). *Ecología e interpretación del paisaje*. UF0733. Editorial Tutor Formación. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/44272?page=88>
- Gustafsson, L., Appelgren, L., Jonsson, F., Nordin, U., Persson, A. A., y Weslien, J. O. (2004). High occurrence of red-listed bryophytes and lichens in mature managed forests in boreal Sweden. *Basic and Applied Ecology*, 5(2), 123-129.

- Gustafson, E. J. (2019). How has the state-of-the-art for quantification of landscape pattern advanced in the twenty-first century? *Landscape Ecology*, 34(9), 2065-2072.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., y Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (6), 610-621.
- Hernández Barajas, C. J., y Álvarez Esteban, O. F. (2020). *Diversidad y Estructura de Fustales y Latizales en dos Bosques Altoandinos con Diferentes Estados de Intervención Antrópica* [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Hernández Llamas, A. R. (2014). Variabilidad genética y relación filogeográfica de tres subespecies de venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en la región Centro-Norte de México (Tesis de maestría) Colegio de Postgraduados, Ciudad de México. 66pp.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). Mc Graw Hill Education.
- Hersperger, A.M., Grădinaru, S.R., Pierri, A.B., Imhof, C. y Peilei, F. (2021). Landscape ecological concepts in planning: review of recent developments. *Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01193-y>
- Hesselbarth M, Sciaini M, With K, Wiegand K, y Nowosad J. (2019). landscape metrics: An open-source r tool to calculate landscape metrics. *Ecography*, 42(10):1648. <https://doi.org/10.1111/ecog.04617>.
- Hesselbarth, M. H., Nowosad, J., Signer, J., y Graham, L. J. (2021). Open-source tools in R for landscape ecology. *Current Landscape Ecology Reports*, 6(3), 97-111.
- Hijmans, R. J. (2023). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.6-14. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>

- Hilty, J. A., Keeley H, A. T., Lidicker Jr, W. Z. y Merenlender, A. M. (2019). *Corridor ecology: Linking landscapes for biodiversity conservation and climatic adaptation* (2da ed). Washington, Unite States: Islandpress.
- Hilty, J. A., Lidicker Jr, W. Z. y Merenlender, A. M. (2012). *Corridor ecology: the science and practice of linking landscapes for biodiversity conservation*. Island Press.
- Hohbein, R. R., y Nibbelink, N. P. (2021). Omnidirectional connectivity for the Andean bear (*Tremarctos ornatus*) across the Colombian Andes. *Landscape Ecology*, 36(11), 3169–3185. <https://doi.org/10.1007/s10980-021-01299-3>
- Humboldt, A. V. (1853). Personal narrative of travels to the equinoctial regions of America during the years 1799-1804, Chapter 25. London: Henry G. Bohn.
- Imre, A. R., y Bogaert, J. (2004). The Fractal Dimension as a Measure of the Quality of Habitats. *Acta Biotheoretica*, 52(1), 41-56. <https://10.1023/B:ACBI.0000015911.56850.0f>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- IDEAM. (2011). Sistemas agroforestales y restauración ecológica como medidas de adaptación al cambio climático en alta montaña, Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP– componente B. IDEAM y Conservación Internacional, Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2018. Cobertura de la Tierra. Mapa nacional de coberturas de la tierra, escala 1:100.000. Bogotá.

- Jiménez-Ramírez, J. S. y López-Arévalo, H. F. (2021). Análisis de conectividad del paisaje para tres especies de mesodepredadores altoandinos como herramienta para su conservación. *Revista de geografía Norte Grande*, (80), 271-291.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022021000300271>
- Johansson, P., y Ehrlén, J. (2003). Influence of habitat quantity, quality and isolation on the distribution and abundance of two epiphytic lichens. *Journal of Ecology*, 213-221.
- Kumar, M., Denis, D. M., Singh, S. K., Szabó, S., y Suryavanshi, S. (2018). Landscape metrics for assessment of land cover change and fragmentation of a heterogeneous watershed. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 224-233.
<https://10.1016/j.rsase.2018.04.002>
- Lewis, S. L., Edwards, D. P. y Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349, 827–832.
- Mariscal, A., Tigabu, M., Savadogo, P., y Odén, P. C. (2022). Regeneration Status and Role of Traditional Ecological Knowledge for Cloud Forest Ecosystem Restoration in Ecuador. *Forests*, 13(1). <https://10.3390/f13010092>
- McGarigal, K. (2014). *Landscape Pattern Metrics*. John Wiley yamp; Sons, Ltd.
<https://10.1002/9781118445112.stat07723>
- McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., y Ene, E. (2002). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for categorical maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst.
<https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>.
- Mendoza, G. A., y Prabhu, R. (2005). Combining participatory modeling and multi-criteria analysis for community-based forest management. *Forest Ecology and Management*, 207(1-2), 145-1

- Mérida, P. I. G., y Ibsch, P. (2003). Biodiversidad: La riqueza de Bolivia. Estado de conocimiento y conservación. Ministerio de Desarrollo Sostenible, Editorial Fundación Amigos de la Naturaleza (FAN), Santa Cruz, Bolivia.
- Mohammadpour, P., Viegas, D. X., y Viegas, C. (2022). Vegetation Mapping with Random Forest Using Sentinel 2 and GLCM Texture Feature A Case Study for Lousã Region, Portugal. *Remote Sensing*, 14(18). <https://10.3390/rs14184585>
- Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., y Eibl, B. (2015). Sistemas Agroforestales. Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales. Cali, Colombia: Editorial CIPAV. <https://repositorio.clatie.ac.cr/handle/11554/7124>
- Morláns, M. C. (2005). *Introducción a la Ecología del Paisaje*. Área ecológica. Catamarca: Editorial Científica Universitaria, Universidad Nacional de Catamarca.
- Morales Betancourt, L. N. (2018). *Utilización de árboles fijadores de nitrógeno Escallonia pendula y Alnus acuminata para la recuperación de suelos erosionados*. Sogamoso: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Moyano Molano, A. L., Rusinque Quintero, L. L., y Montoya Rojas, G. A. (2022). Análisis de la conectividad ecológica de las áreas protegidas a través del paisaje del departamento de Caquetá, Colombia. *Revista cartográfica*, (104), 37-61.
- Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., y Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 295, 106899. <https://10.1016/j.agee.2020.106899>
- Muñoz-Pedrerros, A. (2004). La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista chilena de historia natural*, 77(1), 139-156.

- Murillo-Sandoval, P. J., Clerici, N., y Correa-Ayram, C. (2022). Dense satellite data reveals landscape connectivity decline in the Andes-Amazon region. *BioRxiv*, 2022.02.17.480775. <https://doi.org/10.1101/2022.02.17.480775>
- Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., da Fonseca, G. y Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Navarro Guzmán, M. A. (2022). Evaluación de los efectos ecológicos producidos por la Fragmentación Antropogénica de los Ecosistemas de Puna del Departamento de Tacna.
- National Aeronautics and Space Administration. (2022). ASF Data Search Vertex. ASF Data Search Vertex. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Noh, J. K., Echeverria, C., Gaona, G., Kleemann, J., Koo, H., Fürst, C., y Cuenca, P. (2022). Forest Ecosystem Fragmentation in Ecuador: Challenges for Sustainable Land Use in the Tropical Andean. *Land*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/land11020287>
- Núñez, V. (2012). Betulaceae SF Gray. En J. A. Hurrell y G. Delucchi (Eds.), *Flora del Valle de Lerma: Fam. Herreriaceae Endl.* Aportes Botánicos de Salta. Serie Flora, 11.
- Ocampo-Peñuela, N. y Pimm, S. (2014). Setting Practical Conservation Priorities for Birds in the Western Andes of Colombia. *Conservation Biology*, 28, 1260-1270. <https://doi.org/10.1111/cobi.12312>.
- Pascual-Hortal, L., y Saura, S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape ecology*, 21(7), 959-967.
- Pérez, I. G., y Santos, M. A. (2015). El ocelote: el que está marcado con manchas. CONABIO. *Biodiversitas*, 117, 7-5.

- Pinto-Correia, T., y Kristensen, L. (2013). Linking research to practice: The landscape as the basis for integrating social and ecological perspectives of the rural. *Landscape and Urban Planning*, 120, 248-256
- Plieninger, T., Muñoz-Rojas, J., Buck, L. E., y Scherr, S. J. (2020). Agroforestry for sustainable landscape management. *Sustainability Science*, 15(5), 1255-1266. <https://10.1007/s11625-020-00836-4>
- Programa Bosques Andinos. 2021. Nuestros bosques andinos. Construyendo bienestar y sostenibilidad en comunidad. Consorcio HELVETAS Swiss Intercooperation Perú, CONDESAN. Lima, Perú. 74 p
- Pumariño, L., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M. N., Midega, C., y Jonsson, M. (2015). Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, 16(7), 573-582. <https://10.1016/j.baae.2015.08.006>
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Reynel, C. (2009). Árboles de los ecosistemas forestales andinos: Manual de identificación de especies. Programa regional ECOBONA.
- Restrepo, E. (2016). *Etnografía: alcances, técnicas y éticas*. Envión editores.
- Roberts, C. M., O'Leary, B. C., y Hawkins, J. P. (2020). Climate change mitigation and nature conservation both require higher protected area targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190121. <https://10.1098/rstb.2019.0121>
- RStudio Team (2021). RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.

- Russo, R. O. (1990). Evaluating *Alnus acuminata* as a component in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 10(3), 241-252. <https://10.1007/BF00122914>
- Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A., y Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators*, 76, 144-158. [10.1016/j.ecolind.2016.12.047](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047)
- Saura, S., Estreguil, C., Mouton, C., y Rodríguez-Freire, M. (2011). Network analysis to assess landscape connectivity trends: application to European forests (1990–2000). *Ecological Indicators*, 11(2), 407-416.
- Saura, S., y de la Fuente, B. (2017). Connectivity as the Amount of Reachable Habitat: Conservation Priorities and the Roles of Habitat Patches in Landscape Networks. En S. E. Gergel, y M. G. Turner (Eds.), *Learning Landscape Ecology: A Practical Guide to Concepts and Techniques* (pp. 229-254). Springer New York. https://10.1007/978-1-4939-6374-4_14
- Saura, S., y Pascual-Hortal, L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and urban planning*, 83(2-3), 91-103.
- Saura, S., y Rubio, L. (2010). A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography*, 33(3), 523-537.
- Savary, P. (2020). Graph4lg: build graphs for landscape genetics analysis. R package version, 1(1).
- Sociedad Española de Ciencias Forestales. (2023). Glosario Técnico Forestal. <http://secforestales.org/>. Recuperado 04/07/2023, de <http://secforestales.org/content/glosario-tecnico-forestal#:~:text=Glosario%20T%C3%A9cnico%20Forestal%20Acceso%20al%20Glo>

sario%20T%C3%A9cnico%20Forestal,%281.200%20t%C3%A9rminos%29%20Glosario%20T%C3%A9cnico%20Forestal%20Completo%20%2815.000%20t%C3%A9rminos%29

Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K. and Merriam, G. (1993). Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 68, 571 – 573.

Taubert, F., Fischer, R., Groeneveld, J., Lehmann, S., Müller, M. S., Rödig, E., Wiegand, T., y Huth, A. (2018). Global patterns of tropical forest fragmentation. *Nature*, 554, 519-522. doi: 10.1038org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1038/nature25508

Troll, C. (2003). Ecología del paisaje. *Gaceta ecológica*, (68), 71-84.

Turner, M. G., Gardner, R. H., O'Neill, R. V., y O'Neill, R. V. (2001). Landscape ecology in theory and practice (Vol. 401). Springer New York.

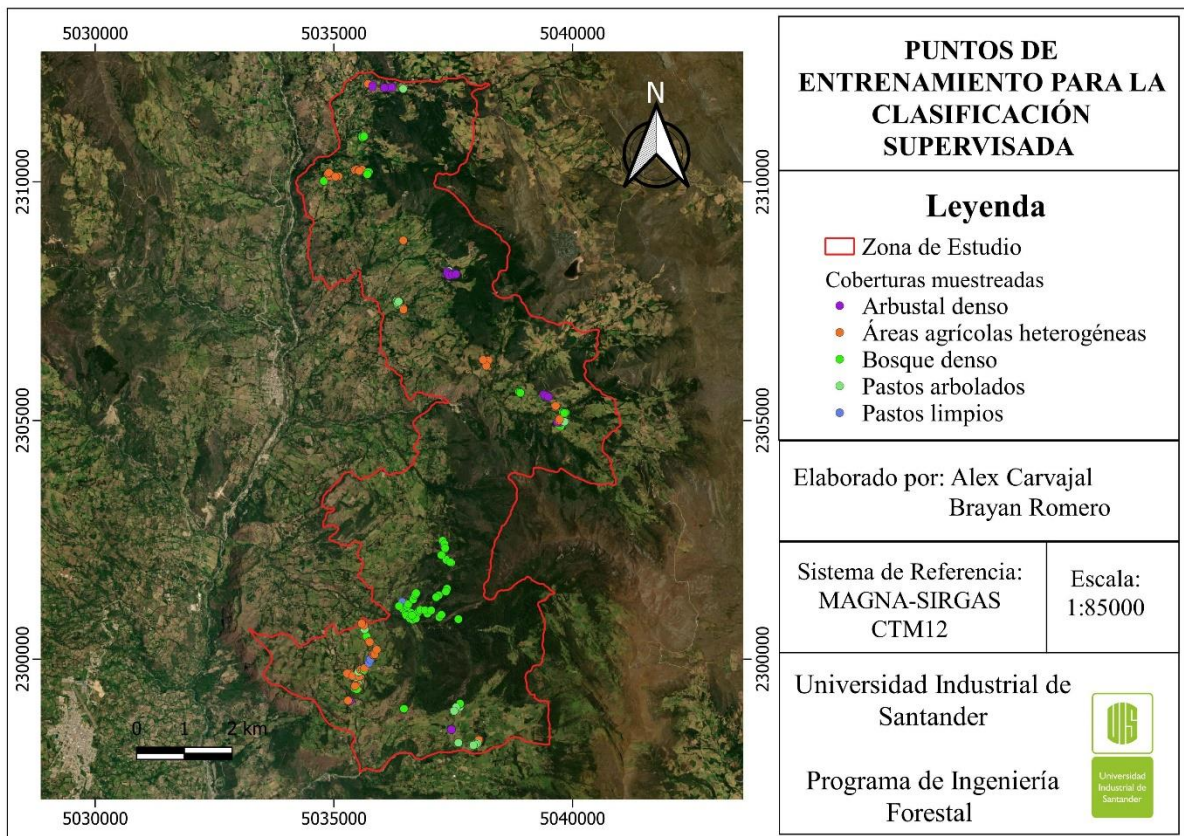
Udawatta, R. P., Rankoth, L., y Shibu Jose. (2019). Agroforestry and Biodiversity. *Sustainability*, 11(10), n/a. <https://10.3390/su11102879>

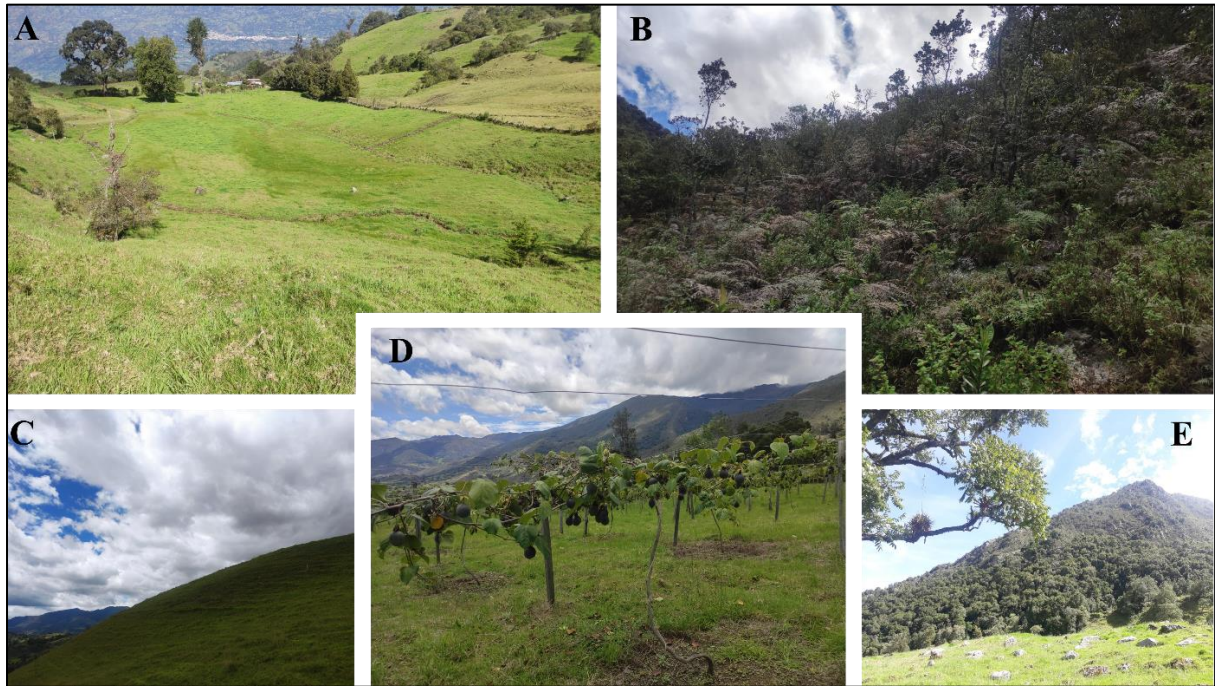
Velásquez Holguín, L. F., Montoya Yepes, D. F., Jiménez Rodríguez, Á A., Jiménez, Á A., Murillo Arango, R. W., y Méndez Arteaga, J. J. (2019). Género *Erythrina* : actualidad en la investigación y perspectivas de desarrollo científico (1st ed.). Universidad del Tolima.

Wilson, D. E., y Mittermeier, R. A. (2018). Handbook of the mammals of the world: vol. 8: insectivores, sloths and colugos.

Apéndices

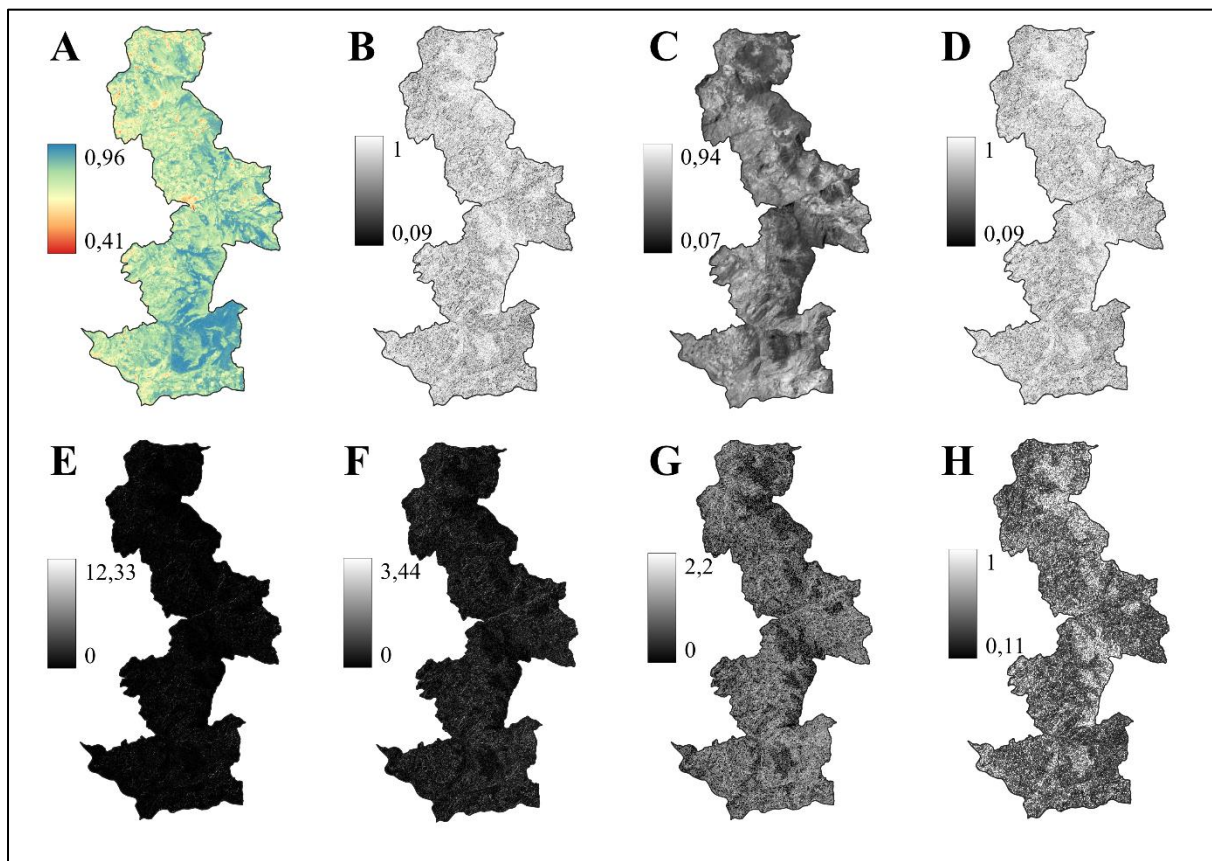
Apéndice A. Georreferenciación en campo de las coberturas



Apéndice B. Fotografías coberturas

Nota. **A.** Pastos arbolados, **B.** Arbustal denso, **C.** Pastos limpios, **D.** Áreas agrícolas heterogéneas y **E.** Bosque denso.

Apéndice C. NDVI y métricas de textura



Nota. A. NDVI B. varianza, C. media, D. homogeneidad, E. contraste, F. disimilaridad, G. entropía y H. segundo momento

Apéndice D. Plegable especies clave de la zona

Águila crestada *Spizaetus isidori*

Puede alcanzar entre 64 y 74 cm de alta. Es una especie que al estar presente en una zona indica que hay buenas condiciones del ecosistema, además, su protección ayuda a proteger otras especies y funciones del ecosistema ¹.

Estado juvenil

- Parte dorsal color café claro
- Cabeza, cuello y pecho color blanco
- Cola color café-gris con tres franjas negras angostas

Estado adulto

- Cresta aguda
- Alas por debajo color crema, con puntas negras
- Color castaño con líneas negras

Créditos: Javier Zurita.

Créditos: Luis Felipe Quintero.

Imágenes tomadas de Birds Colombia, 2020.

Bibliografía consultada:



Todos los elementos base tomados de: <https://www.freepik.com/>


Universidad Industrial de Santander

Ingeniería Forestal

Proyecto de investigación en ecología del paisaje

Este estudio está enmarcado en el proyecto de grado de ingeniería forestal que se está ejecutando por parte de los estudiantes Alex Carvajal y Brayan Romero.

El objetivo de este proyecto es analizar los bosques altoandinos a nivel de paisaje para saber si se conectan entre sí y en qué zonas están presentes los animales de interés para así proponer estrategias con el fin de permitir la conectividad.



Créditos fotografía: Elson Menezes Pelayo

Tigrillo *Leopardus tigrinus*

Un macho llega a alcanzar de 2,7 kg mientras que la hembra 1,5 kg en promedio. En general el tigrillo mide de 43 a 65 cm de largo, su cola alcanza los 34 cm. El Tigrillo es el felino más pequeño de Colombia ².

- Ventre color balcuzco con manchas oscuras
- Cola anillada y de punta negra
- Puntos negros en manos y patas que en la parte inferior se hacen más pequeños
- Pelo lanudo no muy grueso
- Parte de atrás de las orejas con ocelos (manchas redondeadas) color negro
- Rosetas abiertas en el centro y negruzcas en el dorso y los flancos
- Manos más anchas que las patas

Créditos: Juan Pablo Bueno Gómez.

Créditos: Juan Pablo Bueno Gómez.

Se alimenta de:

- Mamíferos pequeños
- Aves
- Reptiles

Escala



Ocelote *Leopardus pardalis*


Puede pesar entre 12 a 16 kg. El Ocelote alcanza de 50 cm a 1 m de largo, su cola es corta y casi no toca el suelo, es solitario y vocaliza sonidos como mahullidos de gato ³.

- Banda negra en la mejilla
- Orejas orientadas hacia atrás
- Parte abdominal blanquecina
- Barras transversales negras en la parte interior de las manos
- Pelaje aterciopelado, corto y denso
- Rosetas en cadenas

Se alimenta de:


- Aves
- Mamíferos pequeños y medianos
- Algunas serpientes

Escala



Imágenes tomadas de IAVH, 2021.

Apéndice E. Cuestionario especies identificadas por la comunidad

		CUESTIONARIO INFORMACIÓN DE ESPECIES DE LA ZONA							
Departamento: Santander				Municipio: Concepción					
Responsables: Alex Carvajal; Brayan Romero				Fecha: 22/05/2022 - 11/06/2022					
Nº de encuesta	Nombre del encuestado(a)	Altitud	Coordenadas	Nombre común de las especies observadas	Avistada mediante 1. observación directa 2. Indicios (huellas, excremento y/o madriguera)	Observaciones 1. Nunca 2. Rara vez 3. pocas veces 4. muchas veces	Ultimo observación 1. Esta semana 2. En el último mes 3. En el último año 4. Otro. ¿Cual? fecha	Lugar de observación 1. Bosque 2. Rastrojo 3. Potrero 4. Otro. ¿Cual?	¿Sabe de alguna especie que se encuentre en la zona, aunque no la haya visto?
1	Concepcion	2.531	X -72.65955 Y 6.69912	Aguila Faras venados Ardilla	1 1 1 1	4 2 2 3	1 2 hace dos años 2	1 Casa, 1 árboles con frutos (durazno)	Parte alta Tigrillo (montaña) Aves (gunuches) desaparecido urpiales
2	Roberto	2.570	X -72.65713 Y 6.69847	Aguila Armadillo	1 1	4 4	2 2	1 1, 3	Arriba venado de los pequeños
3	Edilia	2.527	X -72.55229 Y 6.70398	Ardillas Paba, porcasas	1 1	3 3	1 1	3 3	No
4	Alfredo Tarazona	2.523	X -72.680834 Y 6.707236	Armadillos Ardillas Pabas	1 1 1	4 4 4	2 2 2	1 1 1	No
5	Eliezer	2.507	X -72.67868 Y 6.71067	Aguila Venado Armadillo Fara Tinajo	1 1 1 1 1	4 2 4 4 4	2 3 2 2 2	1 1 1 1 1	Venado para la parte de arriba
6	Yaneth Rojas	2.424	X -72.674961 Y 6.716448	Armadillo Palomas Aguila Alcarabanes	1 1 1 1	4 4 4 4	1 1 1 1	3, 2 3, 2 3, 2 3, 2	Tigrillo, perro salbaje
7	Rafael Rojas	2.450	X -72.669914 Y 6.736142	Zorros Armadillos Tinajos Ardillas	1 1 1 1	2 2 2 4	3 2 2 1	3 3 3 3	Venados hace muchos años
8	Roberto Calderon	2.745	X -72.661393 Y 6.734112	Armadillos Tinajos Venados Ardillas	1 1 1 1	3 3 2 4	2 2 3 2	2 2 3 3	No
9	Dario Lizarazo	2.830	X -72.639 Y 6.759	Zorros Aguila Venado Tinajo	1 1 1 1	2 4 2 4	3 2 3 1	2 1 2 1-mar	Leon (puma), hace mucho tiempo
10	Ligia	2.492	X -72.684374 Y 6.805090	Aguila Fara Tinajo Armadillo	1 1 1 1	4 3 3 3	1 1 2 2	1 1 1 1	Carabanes, pavas
11	Mario Bera			Aguila Armadillo Venado Fara	1 1 1 1	4 2 2 2	1 3 3 3	1 1 1 1	No
12	Alvaro			Aguila Armadillo Fara	1 1 1	4 2 2	1 3 1	1 1 1	No
13	Manuel Ortiz			Venado Armadillo Aguila	1 1 1	2 3 3	3 3 2	3 3 1	No

Apéndice F. Correlación entre métricas de conectividad para tres distancias de dispersión