



Análisis multitemporal de la fragmentación del bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia para determinar su estado de conservación

Ramón Andrés Ballesteros Giraldo
Cristian Fernando Figueroa Jiménez
Julieth Andrea López Duque
Jhonathan David Ramos González

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Tutor: Alberto Boada Rodríguez, Doctor (PhD) en Investigación y Docencia

Asesores de recursos académicos: Luz Andrea Sepúlveda Escobar (asesora bibliográfica), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(López Duque et al., 2025)
Referencia	López Duque, J. A., Ballesteros Giraldo, R. A., Figueroa Jiménez, C. F., & Ramos González, J. D. (2025). <i>Análisis multitemporal de la fragmentación del bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia para determinar su estado de conservación</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Análisis y Modelamiento Espacial.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD.

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Se extiende un sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron al desarrollo de este proyecto de grado. El acompañamiento, la confianza y el apoyo recibido a lo largo del proceso académico fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

Se reconoce especialmente la orientación del docente Alberto Boada, quien, con su experiencia y compromiso, brindó una guía metodológica rigurosa y aportes técnicos clave para el desarrollo de la investigación; igualmente, se agradece a la Universidad de Manizales y al cuerpo docente del programa de especialización en Sistemas de Información Geográfica, por ofrecer una formación de alta calidad y por fomentar el pensamiento crítico y aplicado frente a los desafíos del territorio.

El apoyo de las familias también merece un profundo reconocimiento, por su comprensión, motivación constante y respaldo incondicional en cada etapa del proceso formativo.

Asimismo, se agradece a las entidades que facilitaron el acceso a información geográfica y cartográfica, cuyo aporte fue esencial para la construcción de los análisis multitemporales desarrollados en este estudio como es el caso de Corpocaldas, Agencia Nacional de Tierras y Parque Nacional Natural Selva de Florencia.

Finalmente, se valora el trabajo colaborativo entre compañeros, el intercambio de conocimientos y las reflexiones conjuntas, que no sólo fortalecieron el desarrollo académico, sino que también aportaron significativamente al enfoque integral de la investigación.

Contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	13
1.1 Antecedentes	14
2. Justificación	16
3. Objetivos	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
4. Marco teórico	19
5. Marco Legal	22
6. Metodología	24
6.1 Área de estudio.....	24
6.2 Enfoque metodológico	25
6.2.1 Fase de preparación.....	26
6.2.2 Fase de Implementación	30
6.2.3 Fase de evaluación	33
7. Resultados	35
7.1 Cobertura de bosque en el PNN Selva Florencia	35
7.2 Cálculo de las métricas de fragmentación del bosque para el PNN Selva Florencia	37
7.3 Cálculo de las métricas de paisaje (LANDSCAPE) del bosque	39
7.4 Cálculo de las métricas de parche del no bosque	41

7.5	Análisis multitemporal de la fragmentación del bosque en el PNN Selva de Florencia (2017–2024)	42
8.	Discusión.....	44
9.	Conclusiones	47
10.	Recomendaciones	49
	Referencias	50

Lista de tablas

Tabla 1 Relaciones entre mapa y terreno para las escalas estándar	26
Tabla 2 Características de las imágenes satelitales utilizadas	29
Tabla 3 Coberturas de bosque y no bosque 2017 - 2024.....	35
Tabla 4 Resultados del cálculo de las métricas de fragmentación del bosque 2017-2024.....	37
Tabla 5 Resultados del cálculo de las métricas de fragmentación del paisaje del bosque 2017-2024	40

Lista de figuras

Figura 1 Localización del área de estudio.....	24
Figura 2 Estructura metodológica del Proyecto.....	25
Figura 3 Firmas espectrales del suelo, la vegetación y el agua.....	27
Figura 4 Análisis implementados.....	30
Figura 5 Captura cobertura bosque años 2017 y 2024.....	32
Figura 6 Análisis multitemporal bosques 2017-2024.....	34
Figura 7 Mapa de coberturas de bosque y no bosque en el PNN Selva Florencia para el año 2017	36
Figura 8 Mapa de coberturas de bosque y no bosque en el PNN Selva Florencia para el año 2024	36

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AREA_AM	Área media ponderada
AREA_MN	Mean Patch Area (Área media del parche)
CAR	Corporación Autónoma Regional
CONTIG	Índice de contigüidad
ENN_MN	Mean Euclidean Nearest Neighbor Distance (Distancia media al vecino más cercano)
FRAC	Mean Fractal Dimension Index (Índice de dimensión fractal)
GIS	Global Information Systems
GSD	Ground Sample Distance
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
LPI	Largest Patch Index (Índice del parche más grande)
MPS	Tamaño medio del parche
NP	Number of Patches (Número de parches)
PNN	Parque Nacional Natural
PROX	Proximity Index (Índice de proximidad)
SHAPE_MN	Mean Shape Index (Índice de forma medio)
SHDI	Shannon's Diversity Index (Índice de diversidad de Shannon)
SHEI	Shannon's Evenness Index (Índice de equidad de Shannon)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIRAP	Sistema Regional de Áreas Protegidas
TA	Total Área (Área total del paisaje)
USGS	United States Geological Survey

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las imágenes satelitales se han consolidado como herramientas clave para la gestión ambiental y el monitoreo de dinámicas del territorio. Este estudio emplea imágenes satelitales de alta resolución espacial, procesadas y fotointerpretadas, para identificar las coberturas terrestres, con énfasis en la cobertura boscosa. A partir de esta información, se analizan los cambios en el estado de fragmentación del bosque en una ventana temporal de siete años, utilizando software especializado para el análisis espacial y métricas de paisaje.

El área de estudio corresponde al Parque Nacional Natural Selva de Florencia, ubicado en el departamento de Caldas, una zona estratégica para la conservación de la biodiversidad, donde se desconoce el comportamiento reciente de la fragmentación forestal. Por tanto, se realiza un análisis multitemporal para los años 2017 y 2024, integrando herramientas SIG y programas como FRAGSTATS que permiten cuantificar la estructura del paisaje y evaluar la conectividad ecológica.

Los resultados obtenidos constituyen un insumo relevante para la planificación ambiental, la formulación de estrategias de restauración ecológica y la delimitación de corredores biológicos. De igual forma, aportan evidencia útil para fortalecer la gestión sostenible del territorio y apoyar la toma de decisiones informadas en materia de conservación. Este trabajo también contribuye al desarrollo de capacidades técnicas en el uso de geotecnologías para el monitoreo ambiental a escala local y regional.

Palabras clave: Fragmentación del bosque, Teledetección, SIG, análisis multitemporal, fotointerpretación, coberturas.

Abstract

Geographic Information Systems (GIS) and satellite imagery have become established as key tools for environmental management and monitoring land dynamics. This study uses high-spatial-resolution satellite imagery, processed and photo-interpreted, to identify land cover, with an emphasis on forest cover. Based on this information, changes in forest fragmentation are analyzed over a seven-year time window, using specialized software for spatial analysis and landscape metrics.

The study area corresponds to the Selva de Florencia National Natural Park, located in the department of Caldas. This is a strategic area for biodiversity conservation, but where the recent pattern of forest fragmentation is unknown. Therefore, a multi-temporal analysis is conducted for the years 2017 and 2024, integrating GIS tools and programs such as FRAGSTATS, which allow quantifying landscape structure and assessing ecological connectivity.

The results obtained constitute a relevant input for environmental planning, the formulation of ecological restoration strategies, and the delineation of biological corridors. They also provide useful evidence to strengthen sustainable land management and support informed decision-making in conservation matters. This work also contributes to the development of technical capacities in the use of geotechnologies for environmental monitoring at the local and regional scales.

Keywords: Forest fragmentation, Remote sensing, GIS, multitemporal analysis, photointerpretation, coverage.

Introducción

La fragmentación del bosque ha sido identificada como una amenaza crítica para la biodiversidad y el funcionamiento ecológico de los ecosistemas terrestres. Este proceso, exacerbado por actividades antrópicas como la expansión de la frontera agrícola, la ganadería, la construcción de infraestructura y la deforestación, comprometen la conectividad entre hábitats, incrementando los efectos de borde y afectando la capacidad de los ecosistemas para sostener procesos fundamentales como la dispersión de especies y la regulación climática (Ramos-Mosquera et al., 2025). En el contexto colombiano, la pérdida de bosque primario mostró un marcado incremento reciente, estimándose en un 50 % entre 2023 y 2024, debido a la ganadería, el cultivo de palma aceitera y la inestabilidad social (informes de Global Forest Watch y la Universidad de Maryland). Esa situación ha evidenciado la vulnerabilidad de áreas incluso protegidas, evidenciando la necesidad urgente de monitoreo actualizado y detallado (El País, 2025).

En particular, los Andes tropicales han registrado patrones de alteración donde la estructura del hábitat afectó negativamente la diversidad funcional de las comunidades de aves, observándose una disminución de riqueza funcional y equidad dentro de paisajes fragmentados (Ramos-Mosquera et al., 2025).

El Parque Nacional Natural Selva de Florencia (PNN Selva de Florencia), localizado en el oriente del departamento de Caldas, alberga un ecosistema estratégico en la región de los Andes Centrales, caracterizado por remanentes de bosque húmedo premontano y montano, alta diversidad biológica y la presencia de especies endémicas y amenazadas (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2020). Su ubicación y composición lo convierten en un corredor ecológico clave que favorece la conectividad entre ecosistemas de alta montaña y zonas de piedemonte, contribuyendo además a la regulación hídrica y al mantenimiento de procesos ecológicos esenciales (García-R & Wasko, 2019).

En este contexto, el presente estudio implementó un análisis multitemporal de la fragmentación de la cobertura boscosa en el PNN Selva de Florencia, contrastando los años 2017 y 2024. Se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución espacial, técnicas de fotointerpretación, herramientas de SIG y métricas del paisaje, con el objetivo de evaluar la dinámica espacial y temporal de la fragmentación para identificar áreas críticas para la

conectividad ecológica y proporcionar insumos relevantes para la toma de decisiones en la planificación y gestión ambiental.

La investigación se orientó por la siguiente pregunta central: ¿Cómo ha evolucionado la fragmentación del bosque en el PNN Selva de Florencia entre los años 2017 y 2024 y cuáles fueron los patrones espaciales y temporales dominantes de este proceso? Esta formulación permitió no solo cuantificar cambios generales, sino también comprender la distribución y tendencias de fragmentación información clave para orientar estrategias de conservación y conectividad.

Este enfoque multitemporal y espacial buscó aportar conocimiento científico y herramientas de planificación aplicables, especialmente en una región donde la diversidad y los servicios ecosistémicos están amenazados por transformaciones en el uso del suelo y presiones antropogénicas.

1. Planteamiento del problema

La fragmentación de los bosques se ha reconocido en los últimos años como una de las amenazas más significativas para la biodiversidad y la funcionalidad ecológica de los ecosistemas terrestres, ya que reduce la conectividad entre hábitats, incrementa los bordes expuestos y altera procesos clave como el flujo genético, la dispersión de especies y la regulación climática (Martínez-Harms et al., 2022; Taubert et al., 2023). Este proceso, intensificado por la expansión agrícola, construcción de infraestructura vial y la deforestación, ha generado paisajes cada vez más fragmentados, con consecuencias negativas para la resiliencia de los ecosistemas frente a perturbaciones naturales y antrópicas.

En Colombia, los Andes Centrales han sido identificados como una de las regiones con mayor fragmentación de bosques, incluso dentro de áreas protegidas (Gaviria et al., 2020; Silva et al., 2021). El Parque Nacional Natural Selva de Florencia, localizado entre los municipios de Pensilvania y Samaná, en el departamento de Caldas, alberga relictos de bosque húmedo premontano y montano de alto valor ecológico, así como especies endémicas y amenazadas (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2020). No obstante, su zona de influencia enfrenta crecientes presiones derivadas de la expansión ganadera, el establecimiento de cultivos ilícitos y la apertura de caminos rurales, que han contribuido a la pérdida y fragmentación del hábitat (Zamora & Rincón, 2021).

Aunque no se han encontrado estudios previos que evalúen la fragmentación del bosque en el PNN Selva de Florencia mediante un análisis multitemporal apoyado en imágenes satelitales y métricas del paisaje, investigaciones desarrolladas en otros sectores de los Andes colombianos han demostrado que este tipo de enfoque es clave para identificar patrones espaciales y temporales de pérdida de conectividad, priorizar áreas para restauración ecológica y orientar estrategias de conservación (Ayram et al., 2020; Ramos-Mosquera et al., 2025). Estos trabajos han evidenciado que, incluso en áreas protegidas, las presiones antrópicas externas pueden alterar la integridad del paisaje y comprometer la viabilidad de poblaciones de especies clave (Pérez-Escobar et al., 2022).

En este contexto, desarrollar un análisis multitemporal de la fragmentación en el PNN Selva de Florencia mediante herramientas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métricas del paisaje es fundamental para caracterizar la dinámica de cambio, identificar

zonas críticas para la conectividad ecológica y generar insumos técnicos que respalden la toma de decisiones en conservación y manejo ambiental.

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas, la fragmentación de los ecosistemas forestales se ha reconocido a nivel global como uno de los principales procesos de degradación ambiental, especialmente en países megadiversos. Este fenómeno se caracteriza por la pérdida de continuidad de los hábitats naturales, lo que genera impactos negativos sobre la biodiversidad, el funcionamiento ecológico y la provisión de servicios ecosistémicos. La fragmentación implica no solo la reducción del área boscosa, sino también la alteración de su configuración espacial, afectando la conectividad entre fragmentos y reduciendo la resiliencia ecosistémica frente a perturbaciones externas (García et al., 2022). En este contexto, el desarrollo de tecnologías como la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha permitido avances sustanciales en el monitoreo de estos procesos mediante análisis multitemporales, que detectan con alta precisión espacial y temporal los patrones de pérdida y fragmentación de la cobertura vegetal.

A nivel regional, diversas investigaciones han evidenciado la utilidad de las imágenes satelitales para evaluar la dinámica de los bosques y sus procesos de fragmentación. Por ejemplo, Zamora y Rincón (2021) analizaron series temporales Landsat en zonas del piedemonte andino-amazónico, concluyendo que la fragmentación puede anticipar procesos más severos de degradación ambiental si no se aplican medidas de manejo oportunas. De forma complementaria, Murcia et al. (2020) advirtieron que múltiples áreas del Sistema de Parques Nacionales Naturales de Colombia han experimentado un incremento en las presiones antrópicas posteriores al acuerdo de paz, evidenciado en la expansión de la frontera agropecuaria, la ocupación de nuevas áreas y el aumento de actividades ilegales como la tala y la minería. Estos procesos, aunque a veces de carácter progresivo y poco perceptible, fragmentan el paisaje y comprometen su funcionalidad ecológica.

En estudios más recientes, Villota et al. (2021) examinaron zonas montañosas del suroccidente colombiano mediante imágenes Sentinel-2 y detectaron un incremento en el número de fragmentos y una reducción en su tamaño promedio, principalmente asociado a la expansión de áreas agrícolas y ganaderas. De manera similar, Rodríguez y León (2023) utilizaron imágenes

PlanetScope y el software Fragstats para evaluar la fragmentación en la Sierra Nevada de Santa Marta durante un periodo de siete años, identificando una disminución en la conectividad estructural incluso dentro de áreas protegidas.

En el contexto local, el Parque Nacional Natural Selva de Florencia representa un área estratégica de conservación debido a su alta biodiversidad, elevado grado de endemismo y las crecientes presiones antrópicas que enfrenta. El uso de sensores remotos de alta resolución combinado con herramientas de análisis espacial como QGIS, ENVI y Fragstats permite no solo cuantificar la pérdida de cobertura boscosa, sino también caracterizar los patrones espaciales del cambio a través de métricas como el índice de forma (LSI), el número de fragmentos (NP) y la conectividad (CONNECT). Esta información resulta fundamental para orientar la planificación territorial, el manejo adaptativo y las acciones de restauración ecológica en este ecosistema prioritario.

2. Justificación

En el área geográfica de los municipios de Pensilvania y Samaná se ha evidenciado un proceso creciente de fragmentación del paisaje natural, particularmente en la periferia del Parque Nacional Natural Selva de Florencia (PNN) y en sus zonas de amortiguamiento. Este fenómeno se asocia principalmente a la expansión agropecuaria, la ganadería y la tala selectiva (Parques Nacionales Naturales, 2020; Etter et al., 2020).

Actualmente, no se cuenta con información espacial detallada que permita caracterizar con precisión la magnitud, distribución y evolución temporal de la fragmentación forestal en esta área natural estratégica de la región andina. Esta ausencia de datos limita la toma de decisiones basadas en evidencia y dificulta la formulación de estrategias efectivas de conservación y restauración ecológica (Arroyo-Rodríguez et al., 2021).

El estudio de la fragmentación forestal en el PNN Selva de Florencia reviste una gran importancia por sus implicaciones ecológicas, sociales y ambientales. Desde el punto de vista ecológico, la fragmentación altera los patrones de dispersión de especies, reduce la diversidad genética y disminuye la resiliencia de los ecosistemas frente a perturbaciones (Haddad et al., 2015). En el plano social, las comunidades locales dependen directamente de los servicios ecosistémicos que brindan estos bosques, como la regulación hídrica, la conservación del suelo y la mitigación del cambio climático (MEA, 2005). En el ámbito ambiental, comprender la dinámica de este fenómeno es esencial para diseñar estrategias de conservación y manejo sustentable en un territorio altamente sensible (Laurance et al., 2018).

La metodología empleada en este trabajo se orientó a generar información cuantitativa para estimar la cobertura boscosa del PNN Selva de Florencia en los años 2017 y 2024, con el objetivo de identificar cambios en su extensión, ubicar áreas críticas para la conectividad ecológica y analizar tendencias de fragmentación dentro de este intervalo temporal. La selección de estos años se basó en la disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución espacial y en la necesidad de evaluar el comportamiento del ecosistema a lo largo de un periodo reciente. Esta selección también tuvo en cuenta las dificultades asociadas a la alta nubosidad de la región, característica de su ubicación en zona de montaña húmeda tropical, lo que históricamente ha dificultado la adquisición de datos libres sin interferencias atmosféricas (Zambrano et al., 2020). En particular, las condiciones climáticas de la región, caracterizadas por precipitaciones frecuentes, humedad

elevada y nubosidad persistente, obligaban a una cuidadosa selección de escenas y al uso de técnicas de procesamiento digital para optimizar la calidad de la información.

En este contexto, desarrollar un análisis multitemporal de la fragmentación en el PNN Selva de Florencia mediante herramientas de teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métricas del paisaje resultó fundamental para caracterizar la dinámica de cambio, identificar zonas críticas para la conectividad ecológica y generar insumos técnicos que respalden la toma de decisiones en conservación y manejo ambiental. Este trabajo se alineó con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres). Investigaciones recientes han demostrado que este enfoque es eficaz para evaluar la fragmentación en ecosistemas tropicales. Por ejemplo, Tamayo-Madriral (2024) analizó los cambios en la cobertura del suelo y la fragmentación en Antioquia empleando teledetección, SIG y Fragstats, mientras que Halbgewachs et al. (2022) implementaron un marco metodológico que combinó análisis espectral y métricas del paisaje para monitorear transformaciones de la cobertura forestal en el estado de Mato Grosso, Brasil. Estos antecedentes confirman la pertinencia y aplicabilidad de este tipo de análisis en contextos similares al área de estudio y refuerzan la necesidad de contar con información precisa para orientar la planificación ambiental a escala regional.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la dinámica espacio-temporal de la fragmentación del bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia durante los años 2017 y 2024 considerando sus posibles causas e implicaciones ecológicas.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la distribución espacial de las coberturas de bosque y áreas de no bosque del Parque Nacional Natural Selva de Florencia, mediante la aplicación de técnicas de teledetección y análisis espacial en sistemas de información geográfica.
- Cuantificar los índices de fragmentación del bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, para el periodo 2017–2024, utilizando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica.
- Analizar la evolución de la fragmentación de los bosques en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia para el periodo 2017–2024, con el fin de identificar cambios espaciales y temporales en su estructura y conectividad, considerando sus posibles causas e implicaciones ecológicas.

4. Marco teórico

La fragmentación de bosques representa uno de los principales elementos de deterioro ambiental en áreas tropicales, donde la actividad humana ha modificado paisajes cohesivos en áreas aisladas de vegetación. Investigaciones recientes han evidenciado que este fenómeno impacta de manera importante la funcionalidad ecológica de los ecosistemas, influyendo en la biodiversidad, la conectividad tanto estructural como funcional, y la capacidad de las comunidades para adaptarse al cambio climático. Guisao-Betancur, Gómez Déniz y Marulanda-Tobón (2024) implementaron una técnica de clasificación supervisada utilizando datos derivados de la fusión de los sensores Sentinel-1 y Sentinel-2 junto al algoritmo Random Forest, logrando un 81 % de precisión en la identificación de áreas de bosque y no bosque en la región del Bajo Cauca en Colombia. Este método confirma la efectividad de las imágenes multiespectrales combinadas con estrategias de aprendizaje automático para la investigación sobre fragmentación forestal en regiones montañosas, como sucede en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia.

Por otro lado, Latorre-Cárdenas, M. C., González-Rodríguez, A., Godínez-Gómez, O., Arima, E. Y., Young, K. R., Denvir, A., García-Oliva, F., & Ghilardi, A. (2023) llevaron a cabo un estudio espacial en un área predominantemente ocupada por cultivos de aguacate en México, empleando imágenes de Sentinel-2 y métricas obtenidas con Fragstats para analizar los patrones de fragmentación. Su investigación mostró que, a pesar de que la superficie de la cobertura forestal remanente parece permanecer estable, la reducción de la conectividad y el aislamiento funcional de fragmentos más pequeños afecta de manera considerable la capacidad del ecosistema para mantener procesos ecológicos fundamentales. De manera análoga, Hermosilla y su equipo (2021) reportaron un incremento continuo en la fragmentación de los bosques secos de Ecuador entre 1990 y 2018, llegando a la conclusión de que los fragmentos más pequeños y los bordes más irregulares son los más susceptibles al deterioro debido a actividades humanas.

A nivel ecológico, Jones et al. (2021) evidenciaron que la diversidad funcional y taxonómica de aves en los Andes tropicales disminuye significativamente en fragmentos de menos de 10 hectáreas, en comparación con parches de mayor tamaño y mejor conectividad. Esto se relaciona con la sensibilidad de muchas especies a los efectos de borde y a la disminución de la cobertura de dosel, factores que se intensifican con la fragmentación. En la misma línea, Mota et al. (2024) estudiaron los desplazamientos altitudinales de aves endémicas en respuesta al cambio

climático, destacando la importancia de conservar corredores ecológicos que vinculen zonas bajas y elevaciones superiores para permitir la adaptación de las especies a nuevas condiciones ambientales.

Las estrategias de restauración ecológica también han cobrado relevancia en la mitigación de los efectos de la fragmentación. Torres et al. (2022) demostraron que los corredores ecológicos restaurados pueden recuperar su funcionalidad en un periodo de tan solo siete años, permitiendo el regreso de especies sensibles como el mono araña (*Ateles spp.*) en selvas tropicales fragmentadas. En consonancia, Montes-Rojas et al. (2024) identificaron corredores prioritarios en paisajes andinos de Colombia a partir de métricas de conectividad estructural y funcional, proponiendo el uso de sistemas agroforestales como soluciones sostenibles de bajo costo para restaurar la conectividad del paisaje. Ambos estudios destacan la importancia de integrar enfoques de restauración activa con planificación territorial en regiones sujetas a transformación intensiva.

En conjunto, estos estudios recientes respaldan la utilidad de integrar herramientas de teledetección, algoritmos de clasificación supervisada, sistemas de información geográfica y métricas de paisaje para analizar la dinámica de la fragmentación forestal. El uso de datos satelitales de alta resolución, como los proporcionados por PlanetScope, junto con programas como Fragstats, ha demostrado ser eficaz para identificar patrones de pérdida de conectividad, aislamiento de parches, y deterioro morfológico de la cobertura vegetal. La solidez metodológica y la aplicabilidad de estos enfoques en contextos tropicales y andinos como Colombia aportan una base científica robusta para la formulación de estrategias de conservación, ordenamiento del territorio y restauración ecológica en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia y sus áreas circundantes.

La comprensión de la dinámica espacial del bosque requiere no sólo el análisis de la cobertura superficial, sino también de su configuración interna, la cual influye directamente en la funcionalidad ecológica del paisaje. En este sentido, el uso de métricas de paisaje como el número de parches (NP), la contigüidad (CONTIG), el índice de forma (SHAPE) y la dimensión fractal (FRAC) permite evaluar cómo se distribuyen y se interconectan los fragmentos dentro del mosaico ecológico. Estas métricas han sido aplicadas en múltiples estudios para caracterizar la fragmentación en distintos ecosistemas tropicales, evidenciando su utilidad para identificar núcleos de aislamiento y zonas prioritarias de restauración. Tal es el caso del trabajo de Herrera-Vélez et al. (2021), quienes analizaron la fragmentación de los bosques secos del Caribe

colombiano y determinaron que la alta irregularidad de los fragmentos y su escasa proximidad comprometen los procesos de dispersión de semillas y movilidad de fauna, generando efectos negativos acumulativos sobre el ecosistema.

Adicionalmente, la pérdida de conectividad ecológica ha sido señalada como un factor limitante para la adaptación de las especies al cambio climático. Investigaciones recientes en el norte de Suramérica han demostrado que los paisajes fragmentados limitan la migración altitudinal y latitudinal de especies sensibles, como algunas aves y mamíferos endémicos. Torres et al. (2021) y Mota et al. (2024) coinciden en que la existencia de corredores vegetales entre fragmentos resulta determinante para mantener la resiliencia ecológica ante escenarios de aumento térmico o modificación de patrones de precipitación. Esto refuerza la necesidad de considerar la conectividad como un eje transversal en las estrategias de ordenamiento y conservación, no sólo para preservar la biodiversidad actual, sino también para garantizar su permanencia frente a las futuras presiones ambientales.

Desde una perspectiva tecnológica, las mejoras en los sensores a distancia y en los métodos de clasificación han impulsado nuestra habilidad para vigilar las transformaciones en la extensión de los bosques. El empleo de fotografías de PlanetScope, Sentinel-2 y Landsat-8, junto con sistemas de clasificación como Random Forest, SVM y redes neuronales, ha hecho posible lograr grados elevados de exactitud en entornos tropicales. Ruiz-Villanueva et al. (2023) aplicaron el aprendizaje automático para examinar la segmentación del bosque nuboso en el suroccidente colombiano, obteniendo clasificaciones con una exactitud que superó el 85%, lo que confirmó la efectividad de fusionar imágenes de alta resolución con formación supervisada. Estos progresos no solo mejoran la calidad de los estudios que se hacen a lo largo del tiempo, sino que también disminuyen la necesidad de llevar a cabo un trabajo de campo extenso, algo que es fundamental en áreas de difícil acceso como la Cuchilla de Miraflores y el PNN Selva de Florencia.

5. Marco Legal

El marco legal colombiano, junto con los compromisos internacionales asumidos por el país, proporciona las bases fundamentales para la gestión, monitoreo y conservación de ecosistemas estratégicos como el Parque Nacional Natural Selva de Florencia. Estas disposiciones orientan el uso de herramientas técnicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el análisis multitemporal de imágenes satelitales y los estándares cartográficos oficiales, con el objetivo de apoyar la planificación territorial, la protección de la biodiversidad y el control de los procesos de fragmentación del paisaje.

A nivel nacional, la Ley 99 de 1993 establece la estructura del Sistema Nacional Ambiental (SINA) y declara la biodiversidad como patrimonio nacional, promoviendo su conservación y uso sostenible. Esta norma constituye la base para la gestión ambiental en Colombia. Por su parte, la Ley 165 de 1994, que aprueba el Convenio sobre la Diversidad Biológica, compromete al país a implementar medidas que garanticen la conservación de los ecosistemas y la reducción de la fragmentación de hábitats naturales. En el mismo sentido, el Decreto 2372 de 2010 reglamenta la gestión de las áreas que hacen parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), como el PNN Selva de Florencia, estableciendo lineamientos claros para su planificación y conservación. Complementariamente, la Resolución 1263 de 2018 define los criterios para la delimitación y manejo de ecosistemas estratégicos, incluidos los bosques de alta montaña, con el objetivo de mitigar los efectos de la fragmentación y garantizar su integridad ecológica.

En el ámbito internacional, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992) constituye un instrumento clave que orienta la protección de la biodiversidad, el uso sostenible de los ecosistemas y la restauración de áreas degradadas, siendo vinculante para Colombia desde su adopción. Así mismo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 15 – Vida de Ecosistemas Terrestres, refuerzan la necesidad de frenar la pérdida de cobertura boscosa, promover la conectividad ecológica y garantizar el uso responsable de los recursos naturales, aspectos centrales en esta investigación.

En cuanto a la normativa técnica cartográfica, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), como autoridad nacional en materia geográfica, establece los lineamientos que garantizan la calidad, estandarización y proyección oficial de la información geoespacial utilizada en investigaciones ambientales. En este sentido, la Resolución 370 de 2021 determina el sistema de

proyección cartográfica oficial para Colombia, mientras que la Resolución 197 de 2022 establece las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los productos de cartografía básica oficial, asegurando la coherencia técnica en los insumos geográficos empleados.

6. Metodología

6.1 Área de estudio

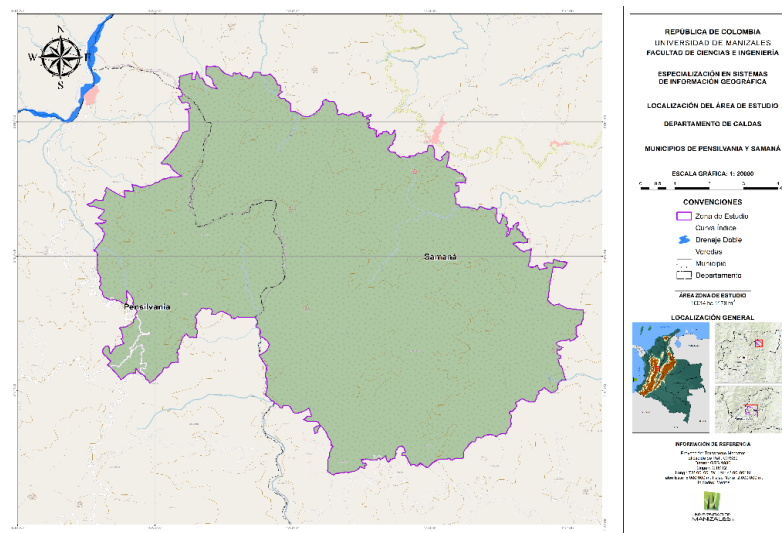
El área de estudio definida para el desarrollo de este trabajo es el PNN Selva de Florencia, localizada en el oriente del departamento de Caldas, en la Ecorregión Eje Cafetero, entre los municipios de Samaná y Pensilvania. Este parque hace parte de un corredor ecológico regional que conecta con otras áreas protegidas como el PNN Los Nevados y el municipio de Sonsón (Antioquia), funcionando como un núcleo articulador de conectividad ecológica y cultural (Plan de Manejo PNN SFL, 2020).

La ecorregión integra diversas áreas protegidas bajo el Sistema Regional de Áreas Protegidas del Eje Cafetero (SIRAP-EC), incluyendo reservas naturales privadas y estrategias de conservación asociadas a cuencas hidrográficas clave como las de los ríos Magdalena y Cauca. Estas zonas son esenciales para el mantenimiento de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad.

La zona de estudio comprende un área aproximada de 10.014,12 hectáreas, distribuidas en 17 veredas de las cuales, 8 pertenecen al municipio de Samaná y 9 al municipio de Pensilvania.

Figura 1

Localización del área de estudio



Nota. Elaboración propia

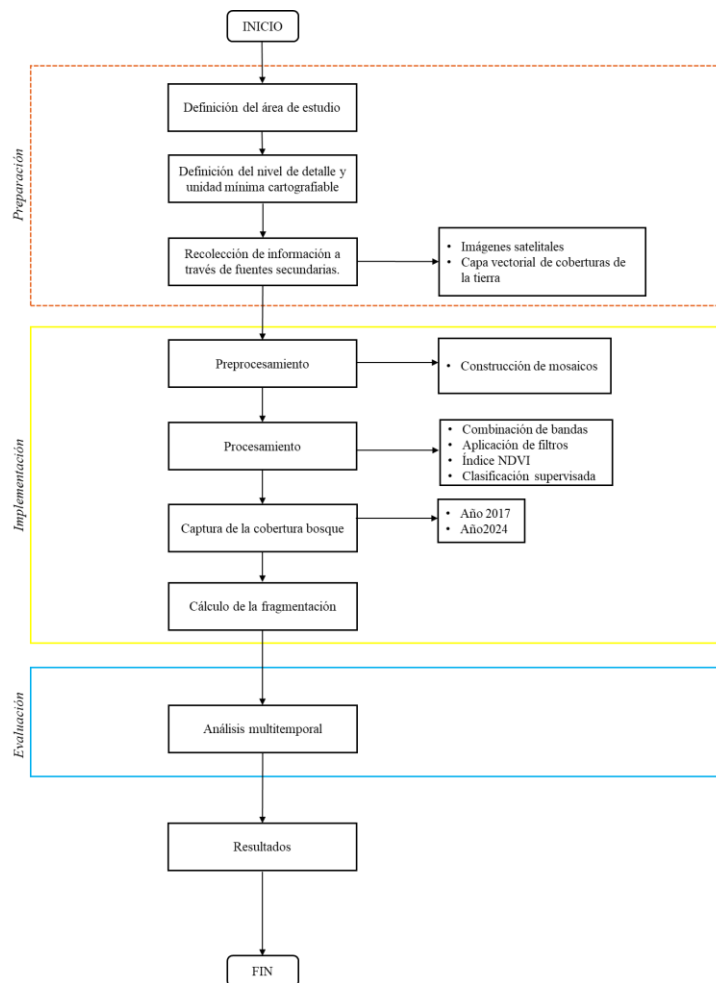
6.2 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico del presente estudio corresponde a un enfoque cuantitativo descriptivo, para el cumplimiento de los objetivos planteados se implementó una metodología que consta de tres fases y cuya estructura se presenta en la Figura 2. El proceso metodológico se estructuró de forma integral, abordando la delimitación de la cobertura de bosque, el análisis de la fragmentación y la comparación temporal, como parte de una misma secuencia analítica.

A continuación, se describen a detalle cada una de las fases metodológicas implementadas con sus respectivas actividades:

Figura 2

Estructura metodológica del Proyecto



Nota. Elaboración propia

6.2.1 Fase de preparación

Durante la fase de preparación, se realizaron actividades orientadas a la delimitación del área de estudio y a la definición de las características técnicas mínimas requeridas para los insumos, con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación. Asimismo, esta fase incluyó la recopilación de información, la cual fue usada como insumo para la ejecución de las etapas subsiguientes. A continuación, se detallan las actividades desarrolladas en esta fase:

Definición del nivel de detalle, unidad mínima cartografiable y características de los insumos

*Se consultaron los lineamientos establecidos en la normativa vigente respecto a las características técnicas que deben cumplir las imágenes satelitales utilizadas para la generación de cartografía vectorial a escala 1:10.000 y 1:25.000. La escala de trabajo fue definida con base a los lineamientos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (ver Tabla 1 **Tabla 1***

Relaciones entre mapa y terreno para las escalas estándar) y en función del área geográfica cubierta por la zona de estudio, la cual corresponde a 10.014,12 ha.

Tabla 1

Relaciones entre mapa y terreno para las escalas estándar

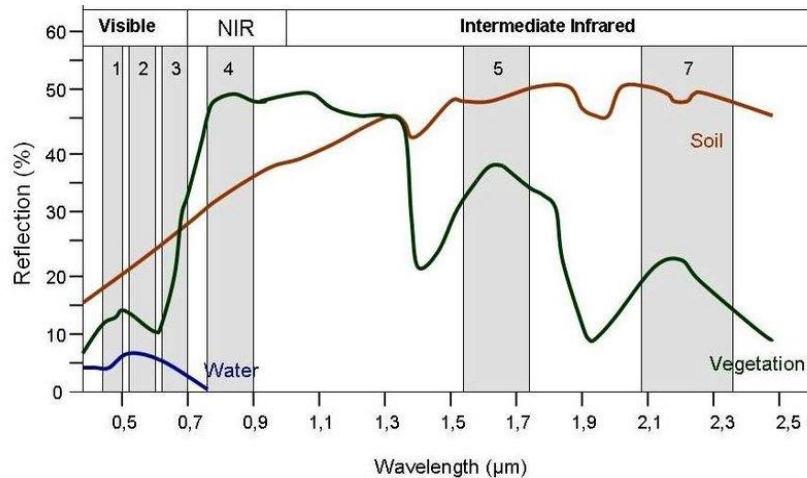
Escala del Mapa	Tamaño del mapa en centímetros	Dist. terrestre equivalente a 1 cm en el mapa	Área geográfica cubierta por cada plancha para varias unidades de medición		
			Metros cuadrados	Hectáreas	km. cuadrados
1:500	75cm x 50cm	5 m	93.750	9,375	0,09375
1:1.000	75cm x 50cm	10 m	375.000	37,5	0,375
1:2.000	75cm x 50cm	20 m	1'500.000	150	1,5
1:5.000	75cm x 50cm	50 m	9'375.000	937,5	9,375
1:10.000	75cm x 50cm	100 m	37'500.000	3.750	37,5
1:25.000	60cm x 40cm	250 m	150'000.000	15.000	150
1:50.000	60cm x 40cm	500 m	600.000.000	60.000	600
1:100.000	60cm x 40cm	1.000 m	2.000'000.000	200.000	2.000
1:200.000	52,5cm x 40cm	2.000 m	8.400'000.000	840.000	8.400
1:500.000	66cm x 48cm	5.000 m	79.200'000.000	7'920.000	79.200

Nota. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2018)

Con respecto a la resolución espectral, fue fundamental que las imágenes satelitales contaran, como mínimo, con las bandas espectrales correspondientes al rojo (R), verde (V), azul (B) y al infrarrojo cercano (NIR), a fin de posibilitar los análisis de vegetación. Esta exigencia se fundamenta en las características de reflectancia espectral de la vegetación, que, como se muestra en la Figura 3, presenta valores elevados en la longitud de onda del infrarrojo cercano (0.7 a 1.3 micrómetros). Esta propiedad espectral resulta especialmente útil para la generación de combinaciones de bandas y la aplicación de índices de vegetación, los cuales permiten una mejor visualización y una delimitación más efectiva del ecosistema bosque presente en el área de estudio.

Figura 3

Firmas espectrales del suelo, la vegetación y el agua



Nota. The spectral signatures of soil, vegetation, and water. (Vermeulen, L. M. 2020).

Asimismo, se obtuvieron imágenes satelitales con dos temporalidades diferentes, con el fin de realizar análisis multitemporal en el área de estudio. La ventana temporal de siete años considerando que las imágenes disponibles corresponden a los años 2017 y 2024.

Finalmente, en relación con la resolución radiométrica, las imágenes obtenidas tienen 16 bits, lo cual resulta suficiente para la realización de los análisis digitales.

Adquisición de insumos

A continuación, se describen los datos secundarios longitudinales obtenidos de múltiples fuentes, que se adquirieron como insumos de la investigación, especificando sus respectivas fuentes gubernamentales o comerciales:

Cobertura de la Tierra

Datos abiertos Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, entre otra cartografía de referencia.

Documentos técnicos

Plan de Manejo Ambiental del PNN Selva de Florencia, Informes de seguimiento ambiental, Monitoreos locales de la zona de estudio, entre otra información secundaria documental disponible de Parques Nacionales Naturales de Colombia acerca del panorama ambiental específico.

Software

Se utilizaron los siguientes softwares para el procesamiento, tratamiento, análisis y gestión de la información georreferenciada obtenida.

- ArcGIS Pro: Tratamiento SIG, bases de datos geoespacial y salidas graficas.
- Qgis: Tratamiento SIG
- Google Earth Pro: Visualización relieve zona de estudio
- Fragstats: Índices de fragmentación
- ENVI: Mosaicos, análisis de coberturas.

Imágenes de satélite

Se obtuvieron imágenes satelitales multiespectrales de la constelación de satélites PlanetScope pertenecientes a la compañía Planet Labs.

La descarga de las imágenes satelitales se realizó a través de la plataforma de PlanetScope haciendo uso de un usuario con acceso educativo para fines de investigación no comerciales. La descarga de las imágenes se realizó en formato GeoTIFF + RPC, lo cual indica que la imagen se encuentra orto-rectificada e incluye corrección de distorsión por relieve, ángulo del sensor y curvatura de la Tierra. (Planet Labs PBC, 2023)

Además, es una imagen construida con valores digitales sin compresión visual, permitiendo análisis cuantitativos (analytic), los datos tienen corrección atmosférica (sr), poseen una máscara de identificación de píxeles no utilizables (udm2) e incluye, asimismo, cuatro (4) bandas

espectrales: RGB y NIR con tres (3) metros de resolución espacial (Planet Labs PBC, 2023). Por lo tanto, no se requirió un procesamiento digital previo al análisis de las imágenes satelitales obtenidas. En la Tabla 2 se relacionan las imágenes satelitales que se usaron para el desarrollo del proyecto y se describen sus principales características.

Tabla 2

Características de las imágenes satelitales utilizadas

ID	Sensor	Resolución			Bandas	Fecha
		Espacial	Radio métrica	Espectral		
20170713-144047_103d-3B-Analytic MS. Tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	13/7/2017
20170713-144048-103d_3B_Analytic MS. Tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	13/7/2017
20170713-144049-103d_3B_Analytic MS. tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	13/7/2017
20240815_144747_47_24c3_3B_AnalyticMS_SR_clip.tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	15/08/2024
20240815_144749_68_24c3_3B_AnalyticMS_SR_clip.tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	15/08/2024
20240815_144843_79_24c4_3B_AnalyticMS_SR_clip.tif	Multispectral Imaging, MSI - Planet Scope	3 metros	16 bits	4 bandas	1. Azul 2. Verde 3. Rojo 4. NIR	15/08/2024

Nota. Adaptado de Planet Labs PBC (2023).

6.2.2 Fase de Implementación

Preprocesamiento, creación de mosaicos

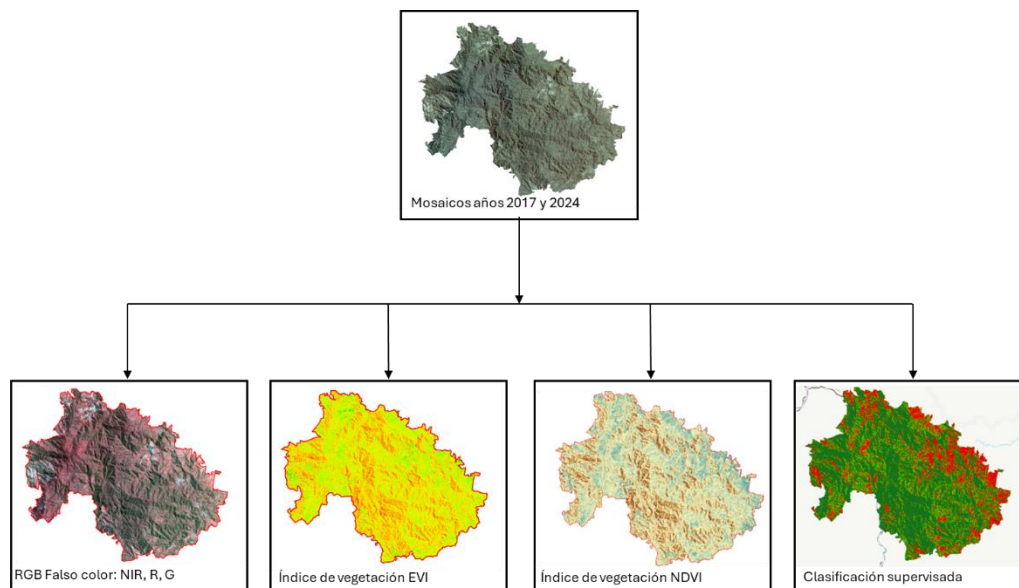
Dado que la zona de estudio no está cubierta completamente por una sola escena, fue necesario construir un mosaico para cada temporalidad a partir de múltiples escenas, garantizando así la cobertura integral del área de estudio. El proceso de construcción de los mosaicos tanto para la temporalidad de 2017 como para la de 2024, se realizó utilizando el software ENVI 5.3. Para ellos, se implementó la herramienta Seamless Mosaic para generar líneas de corte y se aplicó un desvanecimiento de líneas de unión. Además, se utilizó el método de remuestreo “Nearest Neighbor” el cual brinda eficiencia en el procesamiento y es ideal para datos discretos como la cobertura de la tierra conservando los valores originales de reflectancia.

Procesamiento

En la etapa de procesamiento, se implementaron herramientas para resaltar la cobertura de bosques en el área de estudio, con el fin de asegurar una mayor precisión en la identificación y captura de la cobertura, así como también, en el cálculo subsiguiente de las métricas de fragmentación para cada temporalidad. La Figura 4 ilustra los análisis realizados sobre los mosaicos.

Figura 4

Análisis implementados



Nota. Elaboración propia

Falso Color

Se empleó una combinación de falso color RGB (NIR, Red, Green) para resaltar la vegetación en el área de estudio, dado que la vegetación presenta altos niveles de reflectancia en las longitudes de onda del infrarrojo cercano, esta combinación de bandas provoca que la cobertura bosque se visualice en tonos rojos brillantes en la imagen procesada.

Índices de vegetación

Se aplicaron los índices de vegetación Enhanced Vegetation Index (EVI) y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a las imágenes satelitales para resaltar las coberturas de bosques y áreas naturales. Estos índices facilitan la fotointerpretación del área de estudio y permiten clasificar con mayor certeza las coberturas presentes.

Clasificación supervisada

Una vez generado el mosaico de imágenes satelitales con las cuatro bandas de interés (R, G, B, NIR), se procedió a realizar la clasificación supervisada mediante el uso de la herramienta Maximu Likelihood Classification del software ArcGIS. Este algoritmo se distingue por su precisión y es ampliamente usado en aplicaciones de teledetección (Toro Espín *et al.*, 2015).

Se tomó como referencia la capa de clasificación de coberturas de la tierra con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Esta capa permitió realizar comparaciones respecto a los resultados obtenidos en la clasificación supervisada. Para un mejor análisis, se reclasificó la capa en dos únicas categorías: Bosque y No Bosque. En la categoría bosque, se agruparon las coberturas correspondientes a bosques y áreas naturales, mientras que en la categoría No Bosque se incluyeron todas aquellas coberturas que no corresponden a bosques o áreas naturales tales como áreas artificiales, áreas agrícolas, pastos limpios y otros usos de no bosque. Inicialmente, se clasificaron 5 tipos de coberturas en el proceso de clasificación supervisada, con el fin de homogenizar los resultados y disminuir los errores de confusión entre las mismas clases.

Debido a que la escala cartográfica de la clasificación de coberturas de la tierra CORINE Land Cover es de 1:100.000, esta sólo se utilizó como referencia para identificar zonas generales con presencia de la cobertura bosque. Los resultados finales se presentan a escala 1:25.000 la cual es acorde a la resolución espacial de las imágenes satelitales Planet Scope empleadas en el estudio.

Análisis de relieve

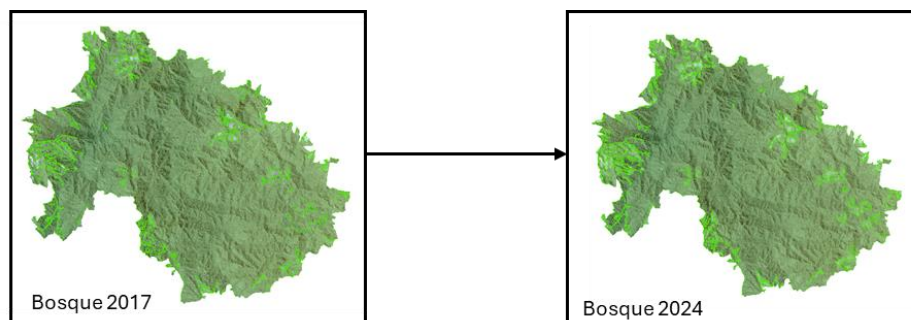
El relieve desempeña un papel fundamental en la distribución y conservación de la cobertura forestal, influenciando la fragmentación y la dinámica ecológica del PNN Selva de Florencia. En consecuencia, se realizó un análisis del relieve para ajustar la clasificación de áreas de Bosque y No Bosque, utilizando la herramienta Escena Global en ArcGIS Pro. Para comprender mejor la relación entre topografía y cobertura vegetal, se incorporaron modelos digitales de elevación (DEM) que permitieron visualizar la influencia de la pendiente y la altitud en la distribución del bosque. Posteriormente, a través de la Escena Global, se generaron representaciones tridimensionales del terreno, facilitando la identificación de zonas donde la clasificación previa podía ser errónea debido a efectos del relieve. Se observó que, en áreas con pendientes pronunciadas, las sombras y cambios en la reflectancia de las imágenes satelitales pueden llevar a clasificaciones inexactas por lo que se realizó una evaluación detallada, en la que se compararon las variaciones topográficas con índices de vegetación como NDVI y EVI, permitiendo corregir la segmentación de la cobertura forestal.

Captura de cobertura bosque

Después de realizar los análisis previos relacionados con la generación de mosaicos, combinaciones de bandas, cálculo de índices de vegetación y clasificación supervisada, se realizó la captura de la cobertura bosque en el área de estudio a través técnicas de fotointerpretación. Fueron consideradas las características espectrales, texturales y espaciales observadas en las imágenes.

Figura 5

Captura cobertura bosque años 2017 y 2024



Nota. Elaboración propia

Cálculo de la fragmentación

Para evaluar el estado de fragmentación de la cobertura bosque en el área de estudio, se seleccionaron métricas clave, ampliamente utilizadas en la ecología del paisaje, las cuales permiten caracterizar tanto la configuración espacial como la conectividad ecológica del bosque. Las métricas calculadas utilizando el software Fragstats se describen brevemente a continuación:

- **Número de parches (NP):** representa la cantidad total de fragmentos de bosque presentes en el área de estudio.
- **Tamaño medio del parche (MPS):** indica el área promedio de los parches de bosque, expresada en hectáreas.
- **Índice de forma (SHAPE):** mide la complejidad morfológica de los parches en comparación con una forma circular ideal.
- **Índice de proximidad (PROX):** evalúa la cercanía entre fragmentos de bosque, considerando su tamaño y distancia relativa.
- **Índice de dimensión fractal (FRAC):** describe la complejidad geométrica de los bordes de los parches.
- **Área media (AREA_MN) y área media ponderada (AREA_AM):** reflejan la estructura del paisaje considerando la distribución de tamaños de los parches.
- **Índice de contigüidad (CONTIG):** representa el grado de continuidad espacial dentro de los fragmentos, asociado a la compacidad y conectividad interna.

Estas métricas fueron seleccionadas por su capacidad para describir tanto la fragmentación estructural como funcional, proporcionando una visión integral del paisaje desde una perspectiva ecológica.

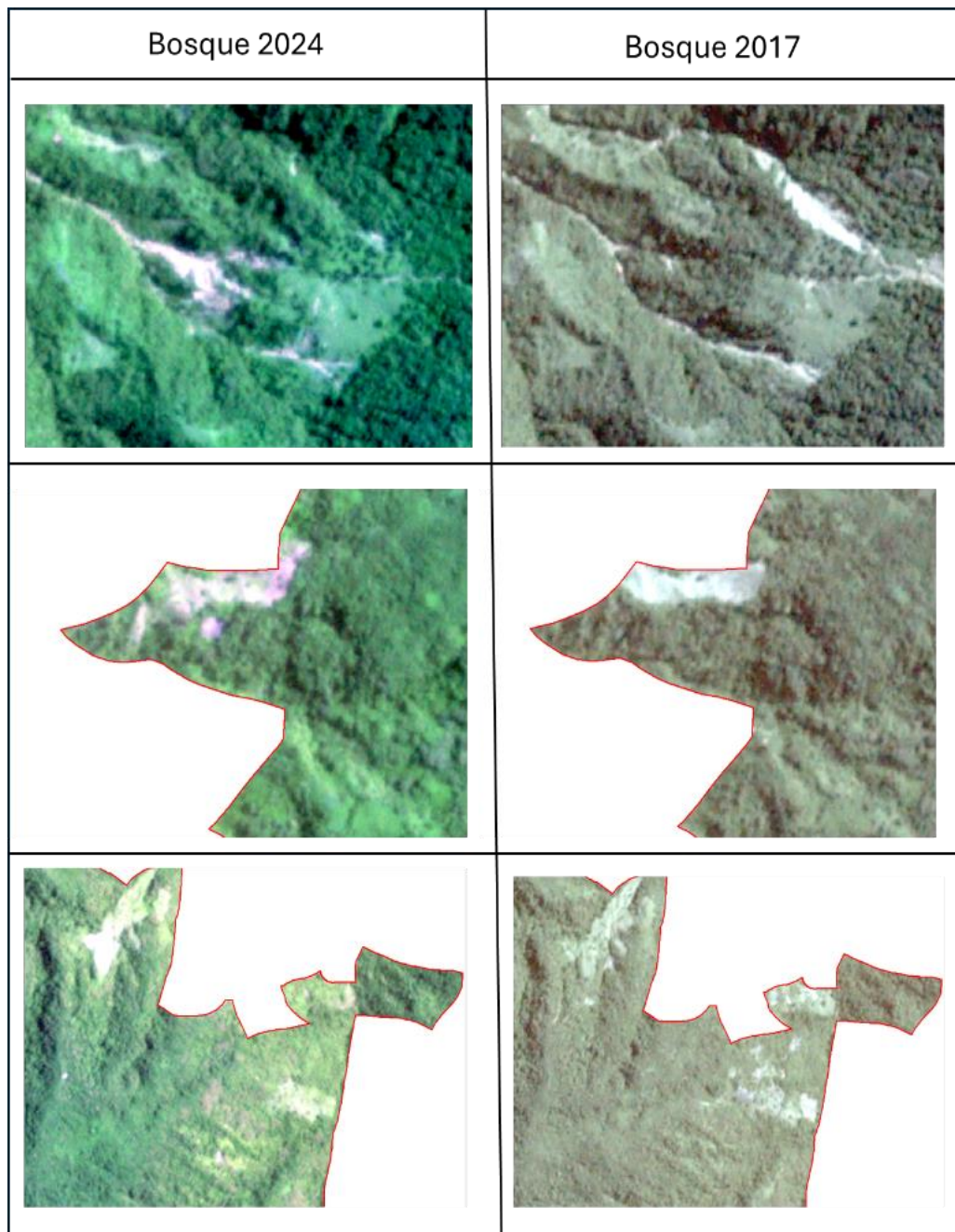
6.2.3 Fase de evaluación

En esta fase, se analizaron las métricas de fragmentación obtenidas en las dos temporalidades, correspondientes a los años 2017 y 2024, para analizar los cambios que ocurrieron en la ventana de tiempo de siete años respecto en relación con el estado y comportamiento de la fragmentación de la cobertura bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia y sus posibles causas asociadas. En la Figura 6 se presentan algunos ejemplos de los cambios de las

coberturas en el año 2024, respecto al 2017. Los cambios son particularmente visibles en los límites del parque, así como en zonas adyacentes a cuerpos de agua.

Figura 6

Análisis multitemporal bosques 2017-2024



Nota. Elaboración propia

7. Resultados

En el marco del estudio, las imágenes satelitales fueron sometidas a diferentes procesos de análisis, dentro de los cuales se aplicó la combinación de bandas espectrales en el rango del infrarrojo cercano, el cálculo de índices de vegetación, la clasificación supervisada y la digitalización de coberturas, permitiendo identificar y estimar la extensión de bosques y áreas naturales correspondientes a cada uno de los periodos evaluados.

7.1 Cobertura de bosque en el PNN Selva Florencia

Para el año 2017 se encontró que la cobertura de bosque en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia corresponde a un área igual a 9.375,4 hectáreas, es decir, un 93,6% del parque; mientras que, para el 2024 se redujo a 9.268,06 hectáreas, equivalente al 92,5% del área total, representando un cambio porcentual del 1,15% que significa una pérdida de 107 hectáreas de bosque aproximadamente.

En cuanto a las áreas no boscosas, asociadas con la presencia de otros usos del suelo como pastos, cultivos o incluso zonas de suelo desnudo, se notó un incremento pasando de 638,64 hectáreas en 2017 a 746,05 hectáreas en 2024. En este sentido, en la Tabla 3 se relacionan las áreas ocupadas por cada cobertura:

Tabla 3

Coberturas de bosque y no bosque 2017 - 2024

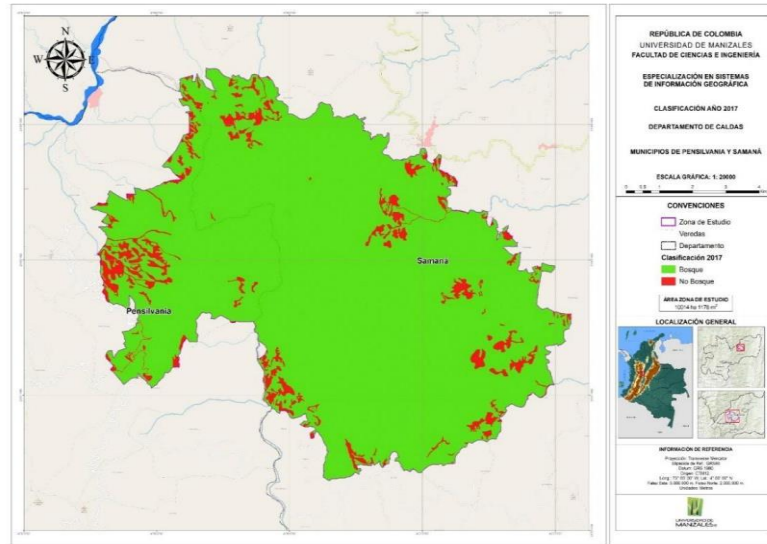
Cobertura	2017		2024		Cambio Porcentual (%)
	Área ha	Área (%)	Área ha	Área (%)	
Bosque	9.375,44	93,6	9.268,07	92,5	-1,15
No Bosque	638,64	6,4	746,05	7,5	16,81
Total	10.014,12	100	10.014,12	100	-

Nota. Elaboración propia

En la Figura 7 se puede observar el contraste entre las áreas de bosque y no bosque para la temporalidad de 2017:

Figura 7

Mapa de coberturas de bosque y no bosque en el PNN Selva Florencia para el año 2017

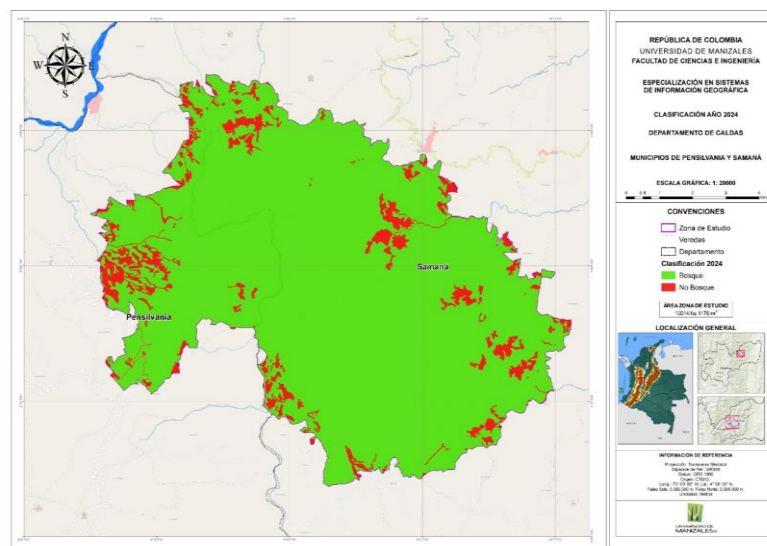


Nota. Elaboración propia

Así mismo en la Figura 8 se puede apreciar el contraste entre las áreas de bosque y no bosque para la temporalidad de 2024.

Figura 8

Mapa de coberturas de bosque y no bosque en el PNN Selva Florencia para el año 2024



Nota. Elaboración propia

En este sentido, entre 2017 y 2024, la cobertura boscosa del Parque Nacional Natural Selva de Florencia presentó una ligera disminución, posiblemente asociada a procesos de deforestación derivados de actividades antrópicas en áreas del parque, asociadas a procesos de expansión de la frontera agrícola, la apertura de caminos y el aprovechamiento forestal ilegal.

De igual modo, la presión ejercida por la extracción de recursos mineros, cultivos ilícitos y la ampliación de pastizales para ganadería podrían haber contribuido a la pérdida del bosque. Adicionalmente, debido al relieve montañoso del parque, existe la influencia de factores naturales como deslizamientos en masa y el volcamiento de árboles derivados de eventos de precipitaciones extremas acompañados de vientos de alta velocidad, los cuales podrían contribuir en la reducción de la cobertura boscosa.

Sin embargo, las acciones de vigilancia y gestión ambiental implementadas por la autoridad ambiental pudieron haber contribuido en la mitigación agresiva de la pérdida de bosque y favorecer la recuperación de áreas previamente afectadas, reduciendo el impacto de las presiones antrópicas y naturales sobre el ecosistema.

7.2 Cálculo de las métricas de fragmentación del bosque para el PNN Selva Florencia

Para un análisis más detallado del comportamiento de la fragmentación del bosque entre los años 2017 y 2024 se realizó el cálculo de distintas métricas de fragmentación de la clase “Bosque” que se relaciona en la Tabla 4:

Tabla 4

Resultados del cálculo de las métricas de fragmentación del bosque 2017-2024

<i>Métrica</i>	<i>Valor 2017</i>	<i>Valor 2024</i>	<i>Variación</i>
<i>Número de parches (NP)</i>	n=24	n=26	2
<i>Tamaño medio del parche (AREA_MN)</i>	390,64 ha	356,46 ha	34,18 ha
<i>Índice del parche más grande (LPI)</i>	92,11 %	91,07 %	1,04 %
<i>Índice de forma promedio (SHAPE MN)</i>	1,92	1,93	0,01
<i>Dimensión fractal (FRAC MN)</i>	1,10	1,11	0,01
<i>Índice de proximidad medio (PROX)</i>	43.254,90	42.531,8	723,1
<i>Contigüidad media (CONTIG)</i>	0.90	0,93	0,03

Nota. Elaboración propia

Según los datos presentados en la Tabla 4, incrementó levemente la cantidad de parches de bosque entre los años 2017 y 2024, pasando de 24 a 26 unidades. Este aumento, aunque modesto, puede indicar un crecimiento en el proceso de fragmentación a pesar de los controles y acciones permanentes desarrolladas por la Autoridad Ambiental.

Por otro lado, el tamaño promedio de los parches presentó una reducción del 8,75 %, pasando de 390,64 ha en 2017 a 356,46 ha en 2024, lo que representa una pérdida de 34,18 ha en promedio. A pesar de esta disminución, el tamaño promedio de los parches aún se considera elevado, lo que sugiere la existencia de algunos fragmentos grandes, aunque coexistiendo con numerosos parches pequeños y potencialmente aislados. Sin embargo, esta tendencia sostenida, podría representar un riesgo de fragmentación estructural progresiva del bosque, afectando su funcionalidad ecológica.

Respecto al Índice del Parche más Grande (LPI), se mantuvieron valores superiores al 90% en ambos periodos (92,11 % en 2017 y 91,07 % en 2024). Esto indica la persistencia de un gran parche continuo de bosque que domina el paisaje, favoreciendo una alta conectividad estructural y mitigando, en parte, los impactos de la fragmentación en áreas aledañas, especialmente dentro de los límites del PNN Selva de Florencia.

En cuanto al Índice Medio de Forma de los Parches (SHAPE_MN), los valores se mantuvieron estables, con un leve aumento de 1,92 a 1,93, lo que no representa un cambio morfológico significativo. Valores cercanos a 1 indican formas más compactas y regulares en relación con su perímetro, por lo que estos resultados sugieren que los parches conservan formas relativamente simples, sin una marcada tendencia hacia la elongación o la irregularidad.

Este patrón es relevante ya que las formas complejas y alargadas tienden a tener mayores proporciones de borde, lo que incrementa la exposición a efectos de borde como la alteración del microclima, la invasión de especies alóctonas y la vulnerabilidad frente a actividades antrópicas. En este sentido, la estabilidad en la forma de los parches puede interpretarse como un indicio de que, aunque existen signos de fragmentación, los fragmentos aún mantienen una configuración estructural funcional.

En lo concerniente al Índice medio de dimensión fractal o complejidad geométrica de los parches de bosque (FRAC_MN (Fractal Dimension Index Mean) se observó un valor igual de 1,1. Esto representa bordes ligeramente irregulares y que no presentan condiciones extremas aunque como se mencionó anteriormente, pueden ser producto de las actividades humanas en la zona, no

obstante, aunque los parches son funcionales podrían degradarse transicionalmente si no se realizan gestiones relevantes para su conservación. De igual forma, en este caso los efectos relacionados con los bordes comienzan a tener significancia.

Respecto al Índice de proximidad medio (PROX) con el cual se buscó determinar el grado de aislamiento espacial promedio de los parches de bosques en un radio de 500 metros, se observó un valor de 43.254,90 para el 2017 y 42.531,8 para 2024. Esto equivale a un descenso del 1,67 % y sugiere una pérdida ligera de conectividad estructural entre los parches fragmentos del bosque tropical, que puede asociarse posiblemente a la desaparición de parches intermedios, la reducción de su tamaño o al aumento en la distancia entre ellos. Aunque el descenso es moderado durante estos últimos siete años, representa un indicio temprano sobre el aumento del aislamiento espacial del paisaje boscoso en la región.

Por otro lado, el índice de contigüidad media (CONTIN G) presentó valores de 0,9 y 0,93 respectivamente para cada temporalidad revelando un leve incremento. Este índice expresa que, los parches boscosos poseen una estructura con buenas condiciones de compactación y continuidad internos, es decir, que existen menos espacios de cobertura no bosque, divisiones o dispersión dentro de cada fragmento identificado. Este efecto podría estar asociado a procesos de sucesión ecológica o regeneración natural del bosque nativo debido a las buenas condiciones de humedad y temperatura del sitio, además, es posible que las actividades de control y vigilancia interinstitucional y los proyectos de reforestación hayan influenciado en el estado actual del parque.

7.3 Cálculo de las métricas de paisaje (LANDSCAPE) del bosque

Los resultados a nivel de paisaje arrojados por el software Fragstats indican que el área total analizada corresponde a 10.014,09 hectáreas, lo cual representa la superficie completa del Parque Nacional Natural Selva de Florencia o del área de interés delimitada para el estudio.

Tabla 5*Resultados del cálculo de las métricas de fragmentación del paisaje del bosque 2017-2024*

Año	TA	SHDI	SHEI
2017	10.014,0894	0,2372	0,3423
2024	10.014,0894	0,2651	0,3825
Variación	0	0,0279	0,0402

Nota. Elaboración propia

Este valor constituye la base sobre la cual se calculan las proporciones de cobertura y las métricas de diversidad espacial del paisaje. La constancia de esta medida a lo largo del análisis multitemporal es crucial para garantizar la comparabilidad de los resultados entre los distintos años evaluados.

En cuanto a los índices de diversidad y equidad, el Índice de Diversidad de Shannon (SHDI) presentó valores entre 0,23 y 0,26; lo que refleja un nivel de diversidad bajo dentro del paisaje. Este índice tiene en cuenta tanto el número de clases de cobertura presentes como la proporción relativa de cada una. Un valor cercano a 1 indicaría una alta diversidad, con muchas clases presentes en proporciones similares. En este caso, el valor obtenido sugiere que, si bien existen al menos dos clases de cobertura (entendidas como bosque y no bosque), una de ellas tiende a predominar ligeramente sobre la otra, es decir, la cobertura boscosa es la más abundante dado que el área estudiada corresponde a una zona de conservación ambiental declarada con alta densidad de vegetación. Sin embargo, al no discriminar a detalle la cobertura de no bosque pudo haber influenciado en el valor obtenido en este índice, toda vez que, existiría mayor diversidad de coberturas al expandir el abanico contenido dentro de esta zona denominada no bosque.

Por su parte, el Índice de Equidad de Shannon (SHEI) presenta un valor de 0,3423, lo cual representa una tercera parte del máximo teórico de 1. Este indicador mide la uniformidad con la que las distintas clases de cobertura están distribuidas en el paisaje. El valor evidenciado sugiere una moderada diversidad indicando que el bosque, aunque probablemente sigue siendo la cobertura principal, no es suficientemente predominante como para reducir más el índice, dado que existe una proporción considerable de otras coberturas como suelo desnudo, pastizales y vegetación secundaria enmarcadas dentro de la zona identificada como no bosque. En este sentido, se observó la incidencia significativa de las presiones antrópicas ejercidas sobre los bosques

naturales presentes en el parque alterando su composición ideal donde la predominancia boscosa es habitual en este tipo de ecosistemas.

En conjunto, estos resultados permiten inferir que el paisaje presenta una estructura dominada por la cobertura boscosa, la cual ocupa la mayor parte del territorio, mientras que, las áreas transformadas o de no bosque representan una fracción menor. No obstante, aunque no es altamente diversa en el ejercicio planteado, mantiene un nivel de uniformidad moderado. Este patrón puede ser coherente con el carácter de área protegida que tiene la zona estudiada y sugerir que la conectividad ecológica interna se mantiene alta, mientras que, la fragmentación tiene cualidades reducidas, lo que tiene implicaciones positivas para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo de procesos ecológicos claves en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia.

7.4 Cálculo de las métricas de parche del no bosque

El análisis a nivel de parche (patch level) permite evaluar las características estructurales de las unidades individuales de cobertura dentro del paisaje, lo que aporta una visión detallada sobre la fragmentación y la conectividad ecológica. En este caso, los resultados obtenidos corresponden a parches clasificados como "No Bosque", y comprenden métricas fundamentales como el área individual y la distancia al vecino más cercano.

La métrica de área del parche (AREA) para coberturas no boscosas es esencial para determinar la configuración del paisaje y el grado de fragmentación. Parches de mayor tamaño suelen estar asociados a una menor estabilidad ecológica y una mayor vulnerabilidad frente a perturbaciones externas, mientras que, aquellos más pequeños pueden implicar indicios de nuevas presiones antrópicas o el inicio de procesos de fragmentación que necesitan controles y medidas de restauración con mayor celeridad para mitigar afectaciones considerables. En los datos observados, los parches no boscosos presentan una variabilidad importante en su área, desde valores muy pequeños, es decir, de menos de una hectárea hasta parches considerablemente mayores con decenas de hectáreas, lo que sugiere un paisaje heterogéneo en términos de intervención antrópica generalmente localizada en las zonas limítrofes del Parque Nacional Natural Selva de Florencia.

Por su parte, Índice de proximidad promedio (PROX), que relaciona la distancia desde el borde de un parche al borde del parche más cercano de la misma clase y su aislamiento espacial,

ofrece información sobre la dinámica de expansión de las fronteras de las zonas no boscosas. Incrementos en este indicador señalan una mayor proximidad entre parches similares, lo que podría generar la pérdida de corredores ecológicos y condicionar la diversidad de especies de fauna nativa. En el caso analizado, se observó una variación de 133,54 en 2017 a 273,88 en 2024. Este incremento indica que, en promedio, los parches de zonas no boscosas se encuentran más próximos entre sí y/o presentan mayores dimensiones, lo que se traduce en una conectividad estructural más alta para este tipo de cobertura. Por consiguiente, este patrón sugiere procesos de expansión y coalescencia de zonas transformadas, asociados a una mayor fragmentación y pérdida de conectividad de las coberturas boscosas en el área de estudio, principalmente relacionadas con la presencia de actividades antrópicas como la minería ilegal, el aprovechamiento forestal indiscriminado, incendios forestales asociados a la producción agropecuaria y la creación de vías de acceso para el transporte clandestino de los productos generados de estas.

Este tipo de análisis resulta especialmente útil para complementar la evaluación a nivel de paisaje y de clase, ya que permite identificar patrones específicos que pueden pasar desapercibidos en niveles más agregados. Además, el seguimiento multitemporal de estas métricas puede evidenciar procesos de fragmentación progresiva o de restauración ecológica, dependiendo de si los parches tienden a reducirse y aislarse, o si, por el contrario, se agrupan y aumentan en tamaño.

7.5 Análisis multitemporal de la fragmentación del bosque en el PNN Selva de Florencia (2017–2024)

El análisis de la fragmentación del bosque en el PNN Selva de Florencia realizado para el periodo comprendido entre el 2017 y 2024 muestra que la cobertura boscosa ha disminuido un 1,15 %, es decir, aproximadamente 107 hectáreas, mientras que ha habido un aumento del 16,81 % en las áreas que no están clasificadas como bosque. Este cambio en el uso del suelo está relacionado con un incremento en el número de parches de bosque, que pasaron de 24 a 26, pero con una reducción en el tamaño promedio de esos parches, que bajó de 390,64 ha a 356,46 ha. Tal patrón sugiere una tendencia de incremento en la fragmentación de la cobertura forestal.

Asimismo, a pesar de que el Índice del Parche más Grande (LPI) se mantuvo por encima del 90 % en ambos periodos (92,11 % en 2017 y 91,07 % en 2024), lo cual indica que hay un núcleo boscoso importante y bien conectado, la pequeña disminución en el Índice de Proximidad

promedio (PROX) para los bosques, junto con el notable aumento de esta métrica en las áreas no boscosas (de 133,54 a 273,88), sugiere que hay un proceso de expansión y coalescencia de zonas transformadas, lo que a su vez incrementa el aislamiento relativo de los parches de bosque más pequeños.

De igual modo, las presiones antrópicas existentes en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia, como la expansión de la agricultura, la apertura de vías de acceso internas, la explotación forestal y la minería ilegal, junto con eventos naturales como deslizamientos de tierra y vientos fuertes, son factores que probablemente están contribuyendo a esta fragmentación. Sin embargo, la estabilidad observada en métricas como el Índice Medio de Forma (SHAPE_MN) y el aumento en la Contigüidad Media (CONTIG) indican que, a nivel interno, los parches de bosque aún conservan configuraciones relativamente compactas y funcionales. Esto podría deberse a procesos de regeneración natural y a las acciones de control y restauración que se están llevando a cabo en el área protegida.

En síntesis, los resultados indican un escenario de fragmentación incipiente pero progresiva. La alta proporción de bosque aún dominante podría verse amenazada si no se refuerzan las estrategias de conservación y se monitorean y controlan las actividades ilícitas, además de implementar programas de restauración ecológica que aseguren la conectividad y funcionalidad del ecosistema a largo plazo.

Desde el punto de vista ecológico, aunque la fragmentación actual es moderada, puede tener impactos en la funcionalidad del ecosistema del PNN Selva de Florencia. La reducción en el tamaño de los parches y el aumento de la conectividad de las áreas no boscosas favorecen la pérdida de corredores biológicos, lo que podría llevar a mayor aislamiento de las poblaciones de fauna y a una disminución del flujo genético entre las comunidades forestales. Esto, a su vez, puede aumentar la exposición de los bordes forestales a microclimas extremos, a la invasión de especies no nativas y a una mayor vulnerabilidad ante las perturbaciones antrópicas. En este contexto, es clave conservar el gran núcleo de bosque que se ha identificado y aplicar estrategias de restauración en las zonas de enlace para mantener la integridad estructural y funcional del paisaje, asegurando la provisión continua de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación del agua, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad endémica.

8. Discusión

El análisis comparativo de la fragmentación de la cobertura boscosa en el Parque Nacional Natural Selva de Florencia entre los años 2017 y 2024 revela dinámicas espaciales que permiten interpretar el comportamiento del paisaje forestal en un contexto de transformación territorial. A partir de las métricas calculadas, se identifican cambios en el número de parches, la forma de los fragmentos y su complejidad estructural, que aportan insumos clave para la comprensión del estado de conservación del bosque y su funcionalidad ecológica.

En los mapas de coberturas de bosque y no bosque (ver Figura 7 y Figura 8) se puede constatar que la cobertura de bosque es predominante dentro del área del PNN Selva Florencia y, asimismo, se observan pequeños fragmentos de bosque ligeramente interconectados con el gran bosque denso ubicado en la profundidad del Parque, no obstante, se distinguen fragmentos de bosque totalmente aislados que podrían desaparecer por presiones antrópicas; también se evidencian pequeñas zonas sin cobertura boscosa donde ha desaparecido el bosque nativo, lo que podría favorecer el riesgo de fragmentación en zonas contiguas a estos debido a procesos antrópicos reportados en los planes de manejo del área protegida.

Una variación identificada corresponde a la métrica de Número de Parches (NP - Number of Patches), que pasó de 24 parches en 2017 a 26 en 2024. Este aumento en la cantidad de parches puede señalar indicios de procesos de fragmentación del paisaje boscoso y podría ser el resultado de la expansión de la frontera agropecuaria, apertura de senderos o deforestación selectiva relacionada con las presiones antrópicas identificadas por Parques Nacionales Naturales de Colombia (2020), tales como: minería artesanal y legal, incendios forestales, vías, viviendas e incluso la ocurrencia de fenómenos naturales; por tanto, un incremento sostenido de este indicador junto con otras métricas, como la disminución del tamaño medio de los parches (AREA_MN) evidenciada, implican alertas tempranas para la priorización de acciones coordinadas con el fin de mitigar el riesgo de fragmentación progresiva en zonas estratégicas.

En efecto, los índices de forma promedio (SHAPE_MN - Shape Index Mean) y dimensión fractal o complejidad geométrica de los parches de bosque (FRAC_MN (Fractal Dimension Index Mean) incrementaron en 0.01, es decir, se mantuvieron básicamente constante durante el periodo de análisis; por consiguiente, no representan una variación morfológica significativa. En este sentido, valores cercanos a 1 indican parches de bosque con formas y líneas de bordes más

compactas y regulares, por lo que estos resultados sugieren que los parches conservan configuraciones morfológicas relativamente simples, sin evidenciar una marcada tendencia hacia la elongación o la irregularidad, favoreciendo la presencia de biodiversidad en la zona dado que formas más simples tienden a ser menos fragmentadas y formas más complejas tienden a estar más expuestas a efectos de borde, lo cual compromete la calidad del hábitat interior y afecta directamente la biodiversidad; sin embargo, este pequeño incremento debería ser monitoreado constantemente con el fin de identificar si existe una erosión progresiva de los bordes, probablemente más notoria en fragmentos grandes o en contacto con matrices altamente intervenidas.

Con respecto a los índices de proximidad medio (PROX) y contigüidad media (CONTING), se logra analizar el comportamiento de aislamiento y conectividad interna de los parches de bosques identificados entre los años 2017 y 2024. En este caso, se evaluó un radio de proximidad de 500 metros donde se evidenció un descenso del PROX equivalente a 1,67 %, asociado a que los parches están ligeramente más aislados o que algunos parches vecinos disminuyeron su tamaño o desaparecieron. Sin embargo, la variación porcentual del CONTIG corresponde a +3,33%, indicando una mejoría interna en la estructura, compactación y densidad del bosque; probablemente relacionado con procesos de restauración natural y con iniciativas de restauración ecológica adelantadas por Parques Naturales Nacionales. Si bien, existe menos dispersión dentro de cada fragmento identificado podría representar un indicio temprano sobre el aumento del aislamiento espacial del paisaje boscoso en la región.

Estos resultados deben ser leídos a la luz de las condiciones socioambientales del Oriente Caldense, una región que ha enfrentado históricamente presiones derivadas de la colonización rural, el uso agropecuario extensivo, la expansión del cultivo de café y, en ciertos sectores, actividades extractivas. Investigaciones recientes como las reportadas por Pfeifer *et al.*, (2022) han documentado que estas dinámicas siguen generando pérdida de cobertura boscosa y fragmentación en zonas andinas protegidas.

En concordancia con lo que podría esperarse en el contexto de un área protegida, los resultados indican ligeros procesos de fragmentación en zonas de influencia directa del PNN Selva de Florencia. Sin embargo, según lo planteado por Nita *et al.* (2022), la designación de áreas protegidas no es suficiente para garantizar la conservación efectiva si no se integran en sistemas de conectividad ecológica funcional y se acompañan de una gestión activa del territorio. Esto se

respalda claramente en el estudio ya que a pesar de que las coberturas boscosas han presentado incrementos significativos con relación a los reportados en los planes de manejo de años anteriores y se ve una clara tendencia conservacionista, las actividades antrópicas siguen siendo persistentes en los puntos críticos identificados mostrando un incremento en la fragmentación dentro del periodo analizado superior a las 100 ha de área protegida.

Aunque la disminución de la cobertura boscosa en un 1,15% podría sugerir un proceso de degradación del bosque, se evidenció que no existe una pérdida progresiva considerable de su calidad morfológica y estructural, Esto podría indicar una presión relativamente moderada sobre este ecosistemas estratégico de conservación nacional localizado en el oriente de Caldas, con procesos de borde y separación de parches que deben ser monitoreados continuamente, especialmente si aumentan las actividades antrópicas.

En cuanto a la reconexión o regeneración natural, el aumento en la complejidad de forma y bordes sugiere lo contrario: una pérdida progresiva de calidad estructural del bosque. Este patrón puede comprometer funciones ecológicas clave como la dispersión de semillas, el flujo genético entre poblaciones y la resiliencia ante perturbaciones climáticas o antrópicas según lo referenciado por Cushman *et al.*, (2021); para el caso puntual del área de estudio no se observa incremento en la complejidad de los bordes lo que es compatible con procesos de reconexión o regeneración natural activos.

En términos metodológicos, cabe señalar que el análisis se basó en datos satelitales de alta resolución (PlanetScope), lo que garantiza un buen nivel de detalle espacial. No obstante, factores como la alta nubosidad caracterizada por una precipitación media anual de 6.270 mm sobresaliendo como una de las zonas más lluviosas del país (Parques Nacionales Naturales, 2025), la estacionalidad y la topografía compleja pueden haber afectado la detección precisa y deseada de la cobertura de bosque. Aun así, la consistencia de los resultados entre años y métricas respalda con alto grado de confianza la validez de las tendencias observadas.

Finalmente, los hallazgos de esta investigación evidencian la necesidad urgente de reforzar estrategias de restauración ecológica, especialmente en zonas de borde y corredores entre fragmentos. Se recomienda que, las autoridades ambientales y locales integren estos resultados en los planes de ordenamiento territorial y manejo del PNN Selva de Florencia, reconociendo que la fragmentación del paisaje es un proceso dinámico, que requiere monitoreo permanente y acciones diferenciadas según el contexto ecológico y socioeconómico.

9. Conclusiones

- La disponibilidad actual de imágenes de satélite de alta resolución y capas de diferentes fuentes y geoportales de fuentes oficiales abiertas facilitaron la delimitación de las coberturas de bosques y áreas naturales del PNN Selva de Florencia de forma satisfactoria y el análisis multitemporal comparativo que se pretendía desarrollar.
- La investigación confirmó la utilidad de la teledetección y los SIG como instrumentos eficientes y eficaces para el estudio de diferentes métricas relacionadas con los procesos de fragmentación de los bosques que facilitan la generación de conocimiento técnico-científico y propuestas de manejo, especialmente en contextos de presión antrópica, zonas de difícil acceso o baja disponibilidad de recursos financieros.
- Se logró establecer que la cobertura boscosa del Parque Nacional Natural Selva de Florencia para la temporalidad 2017-2024 presenta fragmentación por presión antrópica sobre este ecosistema estratégico debido a actividades antrópicas presentes en el PNN Selva Florencia como la minería, incendios forestales, ganadería y agricultura que generan presiones negativas sobre los bosques, aumentando su vulnerabilidad a perturbaciones externas como los efectos de bordes que propician la degradación y fragmentación de los parches alterando sus condiciones microclimáticas y biológicas.
- El análisis multitemporal reveló que, en los últimos siete años, ha incrementado la pérdida de la conectividad ecológica, acompañada de una disminución en el tamaño medio de los fragmentos de bosque y un aumento en su aislamiento, debido principalmente al cambio de uso del suelo asociado a actividades agropecuarias, minería y expansión de infraestructura lo que pone en riesgo la biodiversidad de la región y los avances en las dinámicas conservacionistas desarrolladas por el área protegida.
- La comparación entre los dos periodos analizados permitió identificar áreas críticas donde la fragmentación es más severa, lo que constituye un insumo valioso para el diseño de estrategias de restauración ecológica y planificación territorial. Este estudio se constituye en una alerta temprana acerca de la dinámica de fragmentación en el PNN Selva Florencia con el propósito de que en las áreas mencionadas se realicen las acciones pertinentes para conservar este ecosistema de importancia nacional.

- La cobertura de Bosque en el PNN Selva Florencia presentó más abundancia en comparación con áreas de no bosque, sin embargo, se observó mayor fragmentación y complejidad espacial en los parches identificados. De igual modo, el LPI señala condiciones positivas para la biodiversidad presente en la zona especialmente en las áreas de bosque más denso.

10. Recomendaciones

- Implementar programas de restauración ecológica en las zonas identificadas con procesos de fragmentación, priorizando aquellas que permiten la conexión entre parches remanentes de bosque.
- Fomentar la creación y fortalecimiento de corredores biológicos que integren el PNN Selva de Florencia con áreas adyacentes y demás ecosistemas relevantes, garantizando la movilidad de especies.
- Involucrar activamente a las comunidades locales en los procesos de conservación, a través de estrategias de educación ambiental y participación en actividades de monitoreo y restauración.
- Promover la actualización y uso regular de tecnologías SIG en las entidades ambientales regionales para mantener el seguimiento de los cambios en la cobertura boscosa y la fragmentación del paisaje.
- Considerar los resultados de esta investigación como base para futuras políticas de ordenamiento territorial en los municipios de Pensilvania y Samaná, incluyendo la regulación de la expansión agropecuaria y la prevención de actividades ilegales en zonas de amortiguamiento.

Referencias

- Arroyo-Rodríguez, V., Mandujano, S., Benítez-Malvido, J., & Cuende-Fantón, C. (2017). Factors driving secondary succession and forest fragmentation dynamics in tropical human-modified landscapes. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 92(1), 326–340. <https://doi.org/10.1111/brv.12229>
- Ayram, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., & Rodríguez-Buriticá, S. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117, 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Bedoya, A., Sánchez-Cuervo, A. M., & Pérez, J. (2020). Evaluación de la fragmentación del bosque en el Parque Nacional Natural La Paya mediante sensores remotos y métricas de paisaje. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 45–62. <https://doi.org/10.15446/rcg.v29n2.85873>
- Da Silva, M. A., Lima, J. R., & Rodrigues, F. H. G. (2020). Fragment shape and size, landscape permeability and fragmentation level as predictors of primate occupancy in a region of Brazilian Cerrado. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 42, e51406. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v42i1.51406>
- De Jesús, C. (2024). *La investigación cuantitativa*. Corporación Universitaria de Asturias.
- Eos Data Analytics. (2025). ¿Qué es la resolución espacial en una imagen satelital? Blog Teledetección. <https://eos.com/es/blog/resolucion-espacial/>
- ESRI. (2021). ¿Qué es la clasificación de imagen? <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/extensions/spatialanalyst/image-classification/what-is-image-classification-.htm>
- Etter, A., Díaz-Timoté, J., Libro, A., & Rodríguez, S. (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*, 117, 106630. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106630>
- Futurside. (2022). Geospatial technology: Important things you need to know. <https://futurside.com/geospatial-technology-will-help-us-design-a-better-future/>
- García, R., Vargas, J., & Martínez, L. (2022). Fragmentación de ecosistemas forestales: impactos y servicios ecosistémicos. *Ecología y Desarrollo Sustentable*, 18(2), 45–60.
- García-R, J. C., & Wasko, D. K. (2019). Biodiversity and ecosystem services: A new perspective on the Colombian Andes. *Mountain Research and Development*, 39(3). <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00065.1>

- Gaviria, J., Armenteras, D., & Anderson, L. O. (2020). Identificación de patrones de fragmentación en bosques andinos colombianos. *Bosque*, 41(1), 45–56. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000100045>
- Gaviria, J., Arias, L., & Cuartas, L. (2020). Estructura del bosque remanente en el corredor del Oso de Antejos en Antioquia. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 24(1), 70–85.
- Gómez-Ruiz, L., Rodríguez, J. A., & López, A. (2021). Fragmentación de la cobertura boscosa en áreas protegidas del sur de Colombia: un análisis multitemporal con imágenes satelitales. *Acta Biológica Colombiana*, 26(1), 111–123. <https://doi.org/10.15446/abc.v26n1.85467>
- Guisao-Betancur, A., Álvarez, J., Jiménez, A., & Restrepo, J. (2024). Forest/nonforest segmentation using Sentinel-1 and -2 data fusion in the Bajo Cauca subregion in Colombia. *Remote Sensing*, 16(1), 5. <https://doi.org/10.3390/rs16010005>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., ... Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
- Hermosilla, T., et al. (2021). Deforestation and fragmentation trends of seasonal dry tropical forests in Ecuador. *Forest Ecosystems*, 8, 29. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00329-5>
- IDEAM. (2020). Informe del estado del medio ambiente en Colombia 2020. Bogotá, Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). Formatos y escalas de mapas. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/formatos-y-escalas-de-mapas>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). Instructivo - Procesamiento y análisis de firmas espectrales. <https://igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/IN-IIA-PC02-03%20Instructivo%20Procesamiento%20%20y%20Análisis%20de%20Firmas%20Espectrales.pdf>
- Jones, K. M., et al. (2021). Impacts of forest fragmentation on bird functional and taxonomic diversity in tropical Andes. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14083>
- Latorre-Cárdenas, M. C., et al. (2023). Estimating fragmentation and connectivity patterns of the temperate forest in an avocado-dominated landscape. *Land*, 12(3), 631. <https://doi.org/10.3390/land12030631>
- Laurance, W. F., et al. (2018). Efectos de la fragmentación sobre ecosistemas tropicales.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information systems and science* (4th ed.). Wiley.
- Martínez, L., & Herrera, I. (2023). Manual paso a paso para el uso de FRAGSTATS.

- Martínez-Harms, M. J., et al. (2022). Habitat connectivity and fragmentation across the tropical Andes. *Global Ecology and Conservation*, 34, e02048. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02048>
- Martínez-Harms, M. J., Bryan, B. A., Balvanera, P., Law, E. A., & Rhodes, J. R. (2022). Ecosystem services in the face of global change: A review of the past decade. *Ecosystem Services*, 55, 101404. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101404>
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press.
- Montes-Rojas, J. A., et al. (2024). Agroforestry corridors for connectivity in Andean landscapes. *Colombian Journal of Forest Research*.
- Mota, A. H., et al. (2024). Altitudinal shifts of endemic Andean birds under climate change. *Frontiers in Conservation Science*, 5, 1412440. <https://doi.org/10.3389/fcosc.2024.1412440>
- Murcia, C., Rodríguez, S., & González, A. (2020). Presiones antrópicas sobre áreas protegidas en Colombia tras el acuerdo de paz. *Revista Colombiana de Conservación*, 12(1), 10–24.
- NASA. (2023). Satellite data for disaster response. <https://www.nasa.gov>
- OpenStax. (2021). *Física universitaria volumen 2 – El espectro electromagnético*. <https://openstax.org/details/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2>
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2020). *Plan de manejo del Parque Nacional Natural Selva de Florencia 2020–2025*. Bogotá D.C.: Parques Nacionales Naturales de Colombia.
- Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2025). *Parque Nacional Natural Selva de Florencia*. https://old.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-natural-selva-de-florencia/?utm_source=chatgpt.com
- Peñuela Lizcano, J. D. (2021). *Incidencia del cambio en la cobertura de la tierra del alto río Sogamoso en el marco del desarrollo territorial sostenible*. https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/5860/Tesis_Doctoral_JD_APL.pdf
- Pérez, A. T., & Gutiérrez, J. A. (2022). Análisis de fragmentación del bosque seco tropical de la Baja Guajira. *Universidad de Manizales*.
- Pérez-Escobar, O. A., et al. (2022). The biodiversity of the Tropical Andes: Knowledge gaps and conservation priorities. *Diversity and Distributions*, 28(6), 1072–1089. <https://doi.org/10.1111/ddi.13549>

- Pfeifer, M., et al. (2022). Conservation value of fragmented forest landscapes in the tropics: An urgent need for restoration and connectivity. *Biological Conservation*, 265, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109402>
- Planet Labs PBC. (2023). PlanetScope imagery product specifications. https://assets.planet.com/docs/Planet_PSScene_Imagery_Product_Spec_letter_screen.pdf
- Rivera, L., & Armenteras, D. (2021). Agroforestry systems as biodiversity refuges: A case study in the Colombian Andes. *Agroforestry Systems*, 95(1), 83–97. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00570-z>
- Rodríguez, J., González, J., Reyes, L., & Martínez, P. (2020). Impacto de la fragmentación en la conectividad de los bosques secos tropicales en la región Caribe colombiana. *Ecología y Desarrollo Regional*, 8(2), 45–59.
- Rodríguez, L., & León, D. (2023). Análisis de la fragmentación del bosque en la Sierra Nevada de Santa Marta mediante PlanetScope y FRAGSTATS. *Ecologías Tropicales*, 8(1), 112–127.
- Rojas, M., Sánchez, P., & Castaño, A. (2020). Evaluación de la conectividad ecológica en la Cuchilla Miraflores, Caldas. *Revista Colombiana de Ecología*, 28(1), 45–62.
- Ramos-Mosquera, V., López-Delgado, E., & Moreno-Palacios, M. (2025). Fragmented habitats, fragmented functions: Unveiling the role of habitat structure in Andean bird communities. *Ecologies*, 6(3), 52. <https://doi.org/10.3390/ecologies6030052>
- Sánchez-Cuervo, A. M., Etter, A., & Pérez, J. (2018). Dinámica de la cobertura forestal y fragmentación del paisaje en la Serranía de los Yariguíes, Colombia. *Boletín Científico del Centro de Museos*, 22(1), 8–20. <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>
- Silva, J. A., Morales, M., & Vargas, J. (2021). Land-use change and forest fragmentation in Colombia: Implications for biodiversity conservation. *Journal of Environmental Management*, 293, 112837. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112837>
- Silva, J. M., Zambrano, L., & Parra, C. (2021). Drivers and consequences of forest fragmentation in the Andes of Colombia. *Journal of Environmental Management*, 295, 113081.
- Taubert, F., Fischer, R., & Huth, A. (2023). Forest edge dynamics and biodiversity loss. *Nature Ecology & Evolution*, 7, 134–142. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01970-9>
- Taubert, F., Fischer, R., Groeneveld, J., Lehmann, S., Müller, M. S., Rödig, E., Wiegand, T., & Huth, A. (2023). Global patterns of tropical forest fragmentation. *Nature Sustainability*, 6(2), 173–181. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00971-4>
- Torres, L., et al. (2022). Vertebrate return and corridor maturity in restored tropical forest. *Restoration Ecology*, 30(4), e13556. <https://doi.org/10.1111/rec.13556>
- USGS. (2023). Digital elevation models (DEM). <https://www.usgs.gov>

- Vermeulen, L. M. (2020). An integrated approach to grassland productivity modelling using spectral mixture analysis, primary production and Google Earth Engine (Tesis doctoral). Stellenbosch University.
- Villota, F., Ramírez, P., & López, M. (2021). Cambios en la fragmentación de la cobertura boscosa en el suroccidente colombiano usando Sentinel-2. *Revista Colombiana de Geografía*, 25(3), 67–81.
- World Wildlife Fund. (2022). ¿Qué son los bosques tropicales? <https://www.wwf.org.co/?329990/Glosario-ambiental-Que-son-los-bosques-tropicales>
- Zambrano, A., Sierra, F., & Morales, K. (2020). Retos para la observación de áreas nubosas en ecosistemas montañosos con alta pluviosidad: el caso del PNN Selva de Florencia.
- Zamora, D., & Rincón, A. (2021). Dinámica espacio-temporal de la cobertura boscosa en el piedemonte andino-amazónico. *Acta Biológica Colombiana*, 26(2), 348–359.
- Zamora, J., & Rincón, A. (2021). Factores de presión sobre áreas protegidas de los Andes Centrales colombianos. *Revista de Ecología y Conservación*, 18(2), 55–70. <https://doi.org/10.22370/rec.2021.18.2.2763>
- Zamora, J., & Rincón, A. (2021). Evaluación de la fragmentación del paisaje en el piedemonte andino-amazónico mediante series temporales Landsat. *Boletín de Investigaciones Ambientales*, 29(4), 200–215.