



Análisis Multitemporal de Deforestación en el Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita para los Periodos 2017-2022

Leidy M. Barbosa Duarte

Jarol S. Benavides Cano

Luisa F. Delgado Callejas

Carolina Herranz Ramírez

Daniel J. Usma Franco

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

Tutora: Ana María Giraldo Patiño, Magíster (MSc) en Teledetección

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

2025

Cita	(Barbosa et al., 2025)
Referencia	Barbosa Duarte, L. M., Benavides Cano, J. S., Delgado Callejas, L. F., Herranz Ramírez, C., Usma Franco, D. J. (2025). <i>Análisis Multitemporal de Deforestación en el Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita para los Periodos 2017-2022</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

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, Gemini 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

Dedicatoria

Dedicamos esta tesis a nuestras familias y amigos, quienes, con su apoyo incondicional, amor y comprensión, han sido una fuente constante de motivación y fortaleza durante este proceso.

Agradecemos su presencia en nuestras vidas y su contribución a hacer posible este logro. De parte de todos nosotros, con gratitud y aprecio

Tabla de contenido

Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción	12
1 Planteamiento del problema	14
1.1 Descripción del Área Problemática	14
1.2 Formulación del Problema.....	16
1.3 Justificación del Problema	18
1.4 Antecedentes	21
2 Justificación.....	27
3 Objetivos.....	29
3.1 Objetivo general.....	29
3.2 Objetivos específicos	29
4 Marco teórico.....	30
4.1 Contexto global de la deforestación.....	30
4.2 Definición de vías de acceso y su relación con la deforestación	31
4.3 Impactos de las vías de acceso en la deforestación.....	31
4.3.1 Efectos de las vías terrestres	31
4.3.2 Efectos de las vías fluviales	32
4.4 Contexto nacional: la deforestación en Colombia	32
4.5 Análisis multitemporal en estudios de deforestación.....	33
4.5.1 Herramientas y métodos para el análisis multitemporal	33
4.5.2 Casos de estudio multitemporales de deforestación en Colombia y regiones amazónicas.....	34

4.6	Limitaciones y desafíos del análisis multitemporal en el contexto amazónico	35
5	Metodología.....	36
5.1	Enfoque metodológico	36
5.2	Tipo de estudio.....	36
5.3	Procedimiento	36
5.3.1	Obtención de información.....	38
5.3.2	Procesamiento y análisis de la información.....	38
5.3.2.2	Validación de información.....	40
5.3.2.3	Post-clasificación, conversión y cuantificación de áreas deforestadas.	41
5.3.2.4	Análisis espacial de coberturas por veredas.....	42
5.3.2.5	Comparación de los patrones de deforestación en áreas de influencia según acceso terrestre o fluvial.	42
5.3.2.6	Identificación de patrones de deforestación por actividad socioeconómica.....	44
6	Resultados.....	46
6.1	Análisis estadístico de la validación de resultados: Índice Kappa y Matriz de Confusión	46
6.2	Análisis multitemporal por medio de la clasificación supervisada.....	47
6.3	Influencia de los accesos terrestre y fluvial sobre los cambios en la cobertura terrestre.. ..	54
6.3.1	Cambios en la infraestructura vial	55
6.3.2	Cambios en el Área de Influencia de Acceso Terrestre	55
6.3.3	Cambios en el Área de Influencia de Acceso Fluvial	59
6.3.4	Comparación de cambios según el tipo de acceso	62
6.3.5	Comparación entre infraestructura vial y deforestación por vereda (2017-2022)	63
6.4	Comparación de cambios según actividad socioeconómica	66
6.4.1	Clases de actividades agroecológicas identificadas	67

7	Discusión	74
8	Conclusiones.....	80
8.1	Conclusión general.....	81
9	Recomendaciones	82
10	Referencias.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1 Ejemplo de Clasificación de coberturas.....	39
Tabla 2 Coeficiente Kappa y sus valores de concordancia	41
Tabla 3 Matriz de confusión y cálculo de Coeficiente de Kappa en el año 2017.....	46
Tabla 4 Matriz de confusión y cálculo de Coeficiente de Kappa en el año 2022.....	47
Tabla 5 Cálculo de clasificación supervisada año 2017.	48
Tabla 6 Cálculo de clasificación supervisada año 2022.	50
Tabla 7 Cambios de cobertura entre los años 2017 y 2022.	52
Tabla 8 Indicadores de alteración.	53
Tabla 9 Cálculo de área de bosque por vereda en el NDFAB para los años 2017 y 2022.	54
Tabla 10 Kilómetros de vías construidos para los años 2017 y 2022.....	55
Tabla 11 Cambio en coberturas en área de influencia de tipo de acceso terrestre.....	59
Tabla 12 Cambio en coberturas en área de influencia de tipo de acceso fluvial.	62
Tabla 13 Cambios de tipo de cobertura según el tipo de acceso.....	62
Tabla 14 Clases de uso principal de suelo en el NDFAB.....	66
Tabla 15 Análisis comparativo de área total y núcleo de desarrollo sobre clasificación de uso agrícola.....	73

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa base de ubicación del NDFAB.....	20
Figura 2 Diagrama de flujo del procedimiento.....	37
Figura 3 Mapa de clasificación del uso del suelo y cobertura vegetal, NDFAB en el año 2017. 49	
Figura 4 Mapa de clasificación del uso del suelo y cobertura vegetal, NDFAB en el año 2022. 51	
Figura 5 Cambios de cobertura por clase.....	53
Figura 6 Cambios en la infraestructura vial en el NDFAB entre 2017 y 2022.....	56
Figura 7 Clasificación supervisada en vías para el año 2017.	57
Figura 8 Clasificación supervisada en vías para el año 2022.	58
Figura 9 Cobertura del suelo en el área de influencia fluvial año 2017.	60
Figura 10 Cobertura del suelo en el área de influencia fluvial año 2022.	61
Figura 11 Relación de vías de acceso terrestre por veredas (2017-2022).	64
Figura 12 Infraestructura vial por veredas (2017-2022).....	64
Figura 13 Uso principal de suelo con información recolectada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) hasta el año 2020 en el NDFAB.....	67
Figura 14 Clases agroecológicas según condición del suelo en el área de San José del Guaviare.	67
Figura 15 Clases agroecológicas identificadas en el NDFAB.....	70
Figura 16 Clases agroecológicas según la condición del suelo en el NDFAB.	71

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CLC	Corine Land Cover
FCDS	Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
NDFAB	Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Diferencia Normalizada de la vegetación)
NDWI	Normalized Difference Water Index (Índice de Diferencia Normalizada del Agua)
NIR	Near Infrared (Infrarrojo Cercano)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
USAID	United States Agency for International Development

Resumen

El municipio de Calamar, departamento de Guaviare, cuenta con una alta tasa de deforestación en el país, siendo una de las causas más importantes de este fenómeno las actividades agroindustriales, y la expansión agrícola, de cultivos ilícitos y de infraestructura. Es por ello, que se decide realizar un análisis multitemporal con base a los índices de deforestación en el núcleo de desarrollo forestal Agua Bonita, en los periodos de 2017 a 2022. Se hizo uso de herramientas SIG para el procesamiento de capas de cobertura y uso del territorio en el núcleo de desarrollo forestal Agua Bonita con apoyo de la metodología de Corine Land Cover (CLC) para caracterizar, clasificar y comparar cambios en el uso de suelo en estos periodos. Posteriormente, se diferenciaron los impactos generados por el acceso de vías fluviales y terrestres ilegales, y los asentamientos humanos a su alrededor. Se compararon los accesos tanto fluvial como terrestre para obtener salidas gráficas en las que se permitió visualizar las áreas con mayor grado de afectación por deforestación en el área de estudio, teniendo en cuenta las actividades económicas y sociopolíticas.

Palabras clave: deforestación, suelo, índices, coberturas, vías, impactos, multitemporal

Abstract

Calamar town, Guaviare, has a high rate of deforestation in the country, with one of the most important causes of this phenomenon being agro-industrial activities, agricultural expansion, illicit crops growth and, in turn, infrastructure. For this reason, it was decided to carry out a multi-temporal analysis based on deforestation rates in the Agua Bonita Forest Development Core, in the periods from 2017 to 2022. GIS tools were used to process land cover and use layers in the country with the support of the Corine Land Cover methodology to characterize, classify and compare changes in land use in these periods. Subsequently, the impacts generated by illegal access to rivers and land routes, and the human settlements around them, were differentiated. The aim is to compare both river and land accesses to obtain graphic outputs in which the areas with the highest degree of deforestation impact in the study area can be visualized, considering economic and socio-political activities.

Keywords: deforestation, soil, indices, coverage, pathways, impacts, multi-temporal

Introducción

El Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita (NDFAB) en el municipio de Calamar, departamento de Guaviare, Colombia, enfrenta una de las tasas de deforestación más altas de la Amazonía (Vásquez López, 2023). Este estudio tuvo como objetivo principal analizar, mediante un enfoque multitemporal (2017–2022), las zonas con mayor pérdida de cobertura boscosa en el NDFAB, diferenciando entre áreas con acceso terrestre y fluvial. Además, se buscó relacionar estos patrones de deforestación con las actividades económicas predominantes en la región.

La metodología empleada combinó enfoques cuantitativos y cualitativos. Se procesaron imágenes satelitales Planet Scope, utilizando ArcGIS Pro y se aplicaron técnicas de clasificación supervisada basadas en la metodología Corine Land Cover (CLC), complementadas con la digitalización manual de elementos lineales como vías. El preprocesamiento incluyó correcciones radiométricas y atmosféricas para homogeneizar las condiciones de comparación temporal. Posteriormente, se aplicó una clasificación supervisada siguiendo la metodología Corine Land Cover (CLC), de la cual se definieron 5 clases a partir de puntos de referencia obtenidos mediante fotointerpretación y fuentes secundarias: Bosque, vegetación secundaria, áreas agrícolas, pastizales y suelo desnudo. Una vez definidas, se integraron variables espaciales relacionadas con la accesibilidad vial y fluvial. Por otro lado, se digitalizaron manualmente las vías informales y se delimitó un área de influencia a partir de buffers de distancia de 800 metros según el tipo de acceso con el fin de identificar gradientes de impacto. De igual manera, se incorporó la red hidrográfica oficial, considerando como acceso fluvial las áreas que refieren a cuerpos y corrientes de agua navegable que sirven de rutas para transporte y extracción de recursos. La superposición de estas capas con la información de cambio de cobertura permitió cuantificar y comparar las tasas de deforestación asociadas a cada tipo de acceso. Adicionalmente, se incorporaron datos del visor geográfico Foreland del Guaviare para vincular la vocación del suelo y las actividades agroecológicas con los cambios espaciales observados. La interpretación de los resultados se realizó conforme a las clases de uso del suelo definidas en la Resolución 261 de 2018 de Corpoamazonia y la Ley 2.^a de 1959.

Los resultados revelaron una pérdida significativa de cobertura forestal en zonas con acceso terrestre, con una reducción del 22.26% por kilómetro de vía construida entre 2017 y 2022. En

contraste, las áreas con acceso fluvial experimentaron una pérdida menor, del 6.35%. Se observó también un aumento en la cobertura de vegetación secundaria (+18.67%) y suelo desnudo (+26.15%), lo que sugiere un uso intensivo del territorio seguido de un abandono parcial. Además, se identificó un uso productivo inapropiado de suelos con vocación forestal, especialmente en las clases VI y VII, en contradicción con la normativa ambiental vigente.

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción del Área Problemática

El municipio de Calamar se encuentra ubicado en el Departamento del Guaviare, en el margen del Río Unilla, cerca al río Vaupés, a unos 74 km de la capital San José del Guaviare, dentro de sus mayores actividades económicas está la explotación forestal, ganadera, y la expansión agrícola (Gobernación del Guaviare, 2017).

Para Barbosa (2023), en la revista de rutas del conflicto, uno de los principales focos de deforestación y riesgo, son las vías. Sin embargo, no podemos dejar de lado lo esenciales que son para el abastecimiento y transporte de la población.

Esta área de influencia demarcada representa el segundo mayor núcleo de pérdida de bosques en el país para el año 2021 debido a la carretera Calamar – Miraflores, ubicado en el sur del Meta, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Esta expansión de vías no solo facilitó las dinámicas de la población, sino que a su vez la transformación de bosques en pastizales para expansión ganadera, agrícola, y cultivos de uso ilícito como la cocaína (Barbosa, 2023).

El trayecto de toda la selva destinada a crear nuevas vías pasa por dos sustracciones de reserva forestal de la Amazonía, alrededor de 483.000 ha, pero, después de un análisis realizado por el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA), todos los recursos naturales se destinaron a los proyectos viales, sin embargo, aún y con los impactos que traía consigo, no se cumplió con no perturbar un área protegida.

El contexto social y político, tampoco es muy favorable, gracias a la poca infraestructura del territorio, se vuelve insostenible traer productos que no se producen localmente, el acceso a hospitales e incluso, servicios públicos, la población de Calamar y Miraflores demanda una carretera, sin embargo, planeación y desarrollo no ha adecuado coordinar una estructura adecuada para el lugar (Barbosa, 2023).

En el departamento de Guaviare, son taladas miles de hectáreas de bosque natural para convertirlo en prados extensos a servicio de la ganadería, en el que se cambia el uso natural de los suelos. De acuerdo con la corporación para el desarrollo sostenible del norte y oriente amazónico

“la tasa de uso de tierra para la ganadería en el departamento es de una hectárea por cada animal, proporción nada sostenible (Restrepo et al., s.f.). Paralelamente, de acuerdo con el Ministerio de Ambiente, el 47% de la madera que se comercializa en el país es ilegal, contribuyendo también a la degradación de los bosques. Aun cuando todavía se encuentre en pie, ya no funcionará de la misma manera, causando un deterioro del ecosistema al punto de disminuir su capacidad para sustentar las especies que lo habitan (WWF, 2024).

El departamento de Guaviare tiene una extensa área en reserva forestal Ley Segunda, áreas protegidas y de titulación colectiva (resguardos indígenas), las cuales hacen parte de figuras ambientales de conservación y uso sostenible. Estas figuras ocasionan que no se pueda acceder formalmente a la tierra (titulación de predios), sin embargo, por su naturaleza ha permitido el acaparamiento ilegal de tierras, pagando entre 500.000 y 1.000.000 por la hectárea deforestada (Olaya, 2019). Los cultivos de uso ilícito han afectado las áreas protegidas (RNN Nukak) y zonas de reserva forestal Ley Segunda, donde el 31% de coca sembrada en el departamento se concentró en estas áreas destinadas a la conservación y uso sostenible (United States Agency for International Development [USAID], 2021)

En el Guaviare sigue aumentando la creación de nuevas vías, permitiendo la ocupación de tierras para cultivos ilícitos, comercialización de ganado, influyendo directamente en la pérdida de bosque. De acuerdo con el análisis multitemporal realizado por USAID, para el año 2021 se identificaron 5.282 km de vías en el departamento, de los cuales 116 km corresponden a trazados de nuevas vías entre el año 2020 y 2021 (USAID, 2021).

De acuerdo con Lara Rodríguez (2023), el crecimiento poblacional genera una mayor demanda de tierra, ya sea la producción de alimentos o la expansión de áreas urbanas. Como consecuencia, es posible que las personas que habitan en zona rural migren a áreas boscosas sin colonizar para asentarse.

Pese a que existe un marco regulatorio para la conservación y manejo de los bosques, no se ha logrado una implementación efectiva a nivel regional, debido a que se han generado interpretaciones contrarias, lo que lleva a dar un mensaje contradictorio con relación a la conservación (KPMG, 2020). La falta de control e interpretaciones contrarias del marco regulatorio por parte de los actores institucionales ha promocionado modelos poco sostenibles en

la amazonía, permitiendo dinámicas informales e ilegales que generan la degradación del bosque (KPMG, 2020).

1.2 Formulación del Problema

El área del NDFAB, ubicada en el municipio de Calamar, a 74 kilómetros de San José del Guaviare, está caracterizada por presentar grandes áreas de bosque amazónico, más o menos unas 440.000 hectáreas para el año 2019 (Visión Amazonía, 2020). El uso actual de la tierra en este departamento, debido a su gran potencial forestal, se basa fundamentalmente en la producción agropecuaria, aunque también se destaca la ganadería extensiva, y de forma no tan intensivas, planicies de tierra.

El IDEAM para el año 2018, en su libro “Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional. Período 2005-2015” (González et al., 2018), señalan que uno de los más grandes agentes transformadores de bosques son las actividades humanas, evidenciando aproximaciones en el territorio Amazónico que se originan en el uso de suelo, en el aprovechamiento de madera, y la expansión de actividades agrícolas de uso ilícito, así como la infraestructura vial informal que afecta a los bosques para facilitar el acceso a las intervenciones.

De acuerdo con Boletines del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, otra gran problemática de transformación de bosques es el establecimiento de pastizales no solamente usados para ganadería, sino para usurpación de tierras y valorización; las cifras para el año 2017, según Visión Amazonía, fueron de 9.597 – 9.962 ha distribuidos en 2.287 polígonos mayores a 10 ha y 3 polígonos mayores de 100 ha, según datos recogidos por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono.

Previo a los acontecimientos más actuales de los cuales tenemos información, para la década de los años 90’s, la expansión de cultivos de uso ilícito sucedió principalmente en la Amazonía (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ, 2017), incrementándose a su vez el cambio de cobertura boscosa por pastizales de poca productividad y con ello el incremento de sistemas productivos agroindustriales como la siembra de palma de aceite (González et al., 2018).

Las actividades antrópicas en todo el territorio están afectando la existencia de bosques, los asentamientos humanos, el incremento desbordado de tala, que para el IDEAM en los últimos 5 años llega a un 32%, los cultivos ilícitos, por supuesto la praderización que se traduce como uno de las principales problemáticas, según el reporte del IDEAM del boletín de Detección Temprana de Deforestación, veredas como Agua Bonita, Puerto Polaco y Puerto Cubarro han aumentado significativamente los índices, uno de ellos, siendo el objeto de estudio.

La consolidación y la ampliación de territorio para llevar a cabo estas actividades crea una ampliación a cielo abierto de vías de uso ilícito que también desarrollan y eliminan bosques primarios (Camacho Peña, 2022).

Bajo este contexto, el fenómeno de deforestación evidencia una necesidad de focalizar el impacto de creación de caminos que creen una conexión directa a zonas de conservación, resguardos indígenas, campesinas y toda la brecha boscosa del área, existen estudios en los que, durante el año 2019 y el primer trimestre de 2020, se realizaron 17 sobrevuelos en zonas afectadas por deforestación, de acuerdo con la información previa descargada con imágenes satelitales, además del uso de alertas tempranas del IDEAM.

En términos generales, se observa la concentración por actividades o proyectos como aperturas viales. Si bien estos proyectos tienen el objetivo de mejorar la accesibilidad, también han tenido efectos no deseados en el entorno natural, principalmente en la aceleración de la deforestación. La construcción de carreteras y caminos abre áreas previamente inaccesibles a actividades previamente descritas, para medir los impactos y disminuciones de cobertura con estudios de multitemporalidad se demuestra cómo la apertura de vías, sean ilegales o no, son las primeras actividades de la fase de deforestación que ensanchan posteriormente fronteras agrícolas y fomentan los cambios de uso y cobertura del suelo (Chuquibala Castro, 2022)), que pueden ser medidas con técnicas de teledetección, utilizando material de cartografía, imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica. Sin embargo, aunque este tipo de técnicas mencionadas logran captar una gran cantidad de datos conjuntamente, cubriendo una gran extensión de terreno, no logran delimitar plenamente las áreas de cambio entre bosque y no bosque en lapsos de tiempo determinados (Chuquibala Castro, 2022).

Con el fin de reducir las zonas de impacto en el departamento del Guaviare, el programa Visión Amazonía desde el área de Gobernanza forestal, ministerio de ambiente y corporaciones

regionales, avanza en la implementación de un modelo forestal llamado “Núcleos de Desarrollo Forestal” (NDF). Estas áreas localizadas son frentes estudiados por la región que tienen acelerados procesos de deforestación gracias a su oferta maderable y no maderable, estas áreas cuentan con accesos de vías fluviales y/o terrestres marcadas de forma ilegal. En los análisis de deforestación antes y después de los acuerdos de paz, que son los periodos donde la implementación de nuevos proyectos y asentamientos se crearon, se evidencia que entre los años 2015 y 2018 un factor que persiste es la presencia de vías que, para el caso de acceso a núcleos de desarrollo, se realizan aún en áreas incompatibles para su desarrollo, y que existen aún muchas de ellas como resultado del control ejercido por grupos al margen de la ley Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS, 2023).

Se entiende que la presión por acceder a la selva a extraer madera, o minerales, mantener vivos emprendimientos agrícolas o ganaderos creando miles de kilómetros de rutas no oficiales por las condiciones sociales de la época. En Colombia e incluso en Ecuador, las áreas de deforestación están más asociadas a los ríos, que también son canales de comunicación dentro del río Amazonas.

Factores e instituciones gubernamentales que probablemente no tengan una correcta gestión del uso de suelo al ejecutar proyectos de esta magnitud, de igual manera, entender que, el acceso a territorio sigue teniendo un nivel de complejidad, y que la identificación de patrones de uso de suelo tendrá que realizarse con herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica para mapear a lo largo del tiempo los procesos de degradación forestal (FCDS, 2023).

1.3 Justificación del Problema

El enfoque fundamental de este proyecto radica en el estudio de los impactos antrópicos de las actividades de expansión de vías ilícitas fluviales y terrestres en los ecosistemas de bosque en el NDFAB ubicado en Calamar, Guaviare (Figura 1). Debido a los conflictos socio ambientales, no existen patrones muy específicos en estas áreas que demuestren las escalas del impacto sobre los proyectos y los asentamientos humanos alrededor.

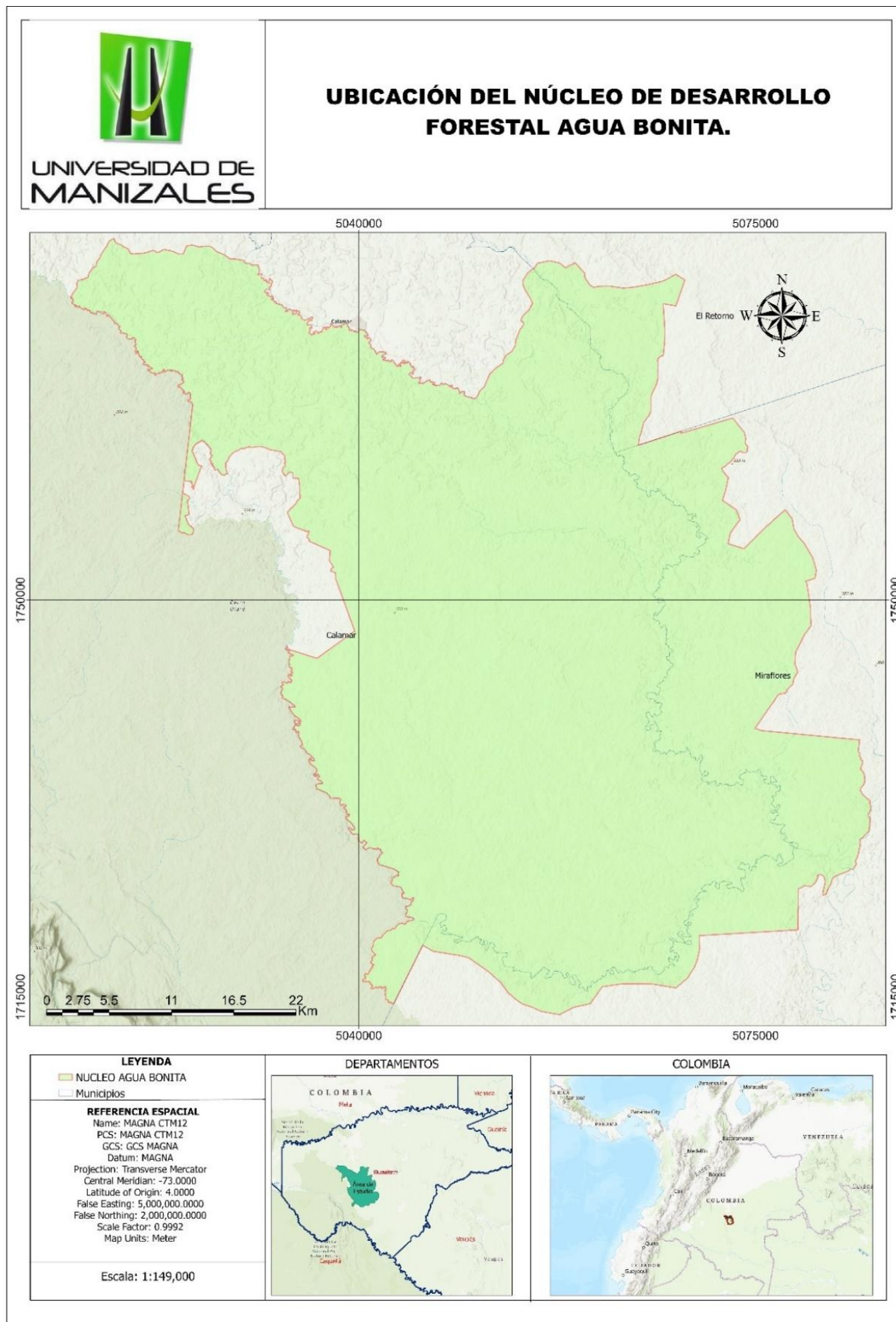
Los análisis multitemporales permiten comparar las coberturas interpretadas en las imágenes de satélite que se capturen, permite a su vez evaluar los cambios en la situación y la

repercusión de las actividades antrópicas para comparar y determinar los cambios que acontecen entre los años 2017 a 2022. Dado la disponibilidad de información satelital a través de plataformas como Landsat, Sentinel y los datos abiertos del IDEAM, la investigación trabaja de la mano con los sistemas de información geográfica para realizar un análisis detallado y preciso de cambio de cobertura.

Con el uso de índices se proporcionan fundamentos para el manejo de áreas de bosque específicos, indican la eficiencia y los defectos de usos de suelo que conllevan a establecer criterios sobre la correcta planificación y manejo de territorio.

Figura 1

Mapa base de ubicación del NDFAB.



1.4 Antecedentes

La deforestación en el departamento del Guaviare ha estado estrechamente ligada a factores históricos, sociales, económicos y ambientales, siendo el resultado de una combinación de conflictos armados, dinámicas territoriales descontroladas, economías extractivas y limitada gobernanza. En este contexto, diversos estudios han contribuido a comprender el fenómeno desde múltiples enfoques.

Amaya Arias et al. (2022) identifican cómo el conflicto armado, el ordenamiento territorial precario y la disputa por la tenencia de la tierra han impulsado la explotación de recursos naturales en el Guaviare, dando paso a monocultivos y sobreexplotación ganadera. Estos procesos han deteriorado los ecosistemas y reducido drásticamente la cobertura boscosa. El estudio resalta que, tras el Acuerdo de Paz con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), es crucial implementar herramientas como el catastro multipropósito y estrategias pedagógicas orientadas a la conservación, para lograr una recuperación ambiental sostenible.

En una línea complementaria, Riveros Gómez (2021) analiza las Zonas de Reserva Campesina (ZRC), creadas como instrumentos de ordenamiento del territorio rural y protección ambiental. No obstante, entre 2000 y 2019 se deforestaron aproximadamente 129.000 hectáreas en seis de estas zonas, siendo el Guaviare una de las más afectadas. Esta pérdida se agudizó en los años del proceso de paz (2012–2016) y después de la firma del acuerdo (2017–2019), cuando se intensificaron las dinámicas de acaparamiento y uso intensivo del suelo. López Loffsner (2018) refuerza esta lectura al evidenciar que en 2017 Colombia perdió más de 144.000 hectáreas de bosque amazónico, un 34 % más que en 2012, con focos de deforestación concentrados en el Caquetá y el Guaviare.

Estas investigaciones evidencian una paradoja: a pesar del contexto de paz, la ausencia de control institucional y de políticas efectivas permitió que se ampliara la frontera agrícola y se intensificara la degradación ambiental. Esto sugiere que los acuerdos por sí solos no garantizan protección ambiental, y que es necesaria una gobernanza territorial activa, con herramientas de seguimiento y participación comunitaria.

Montes Pinzón (2022) aporta una perspectiva desde la urbanización y el crecimiento poblacional, mostrando que entre 2000 y 2020 la expansión urbana en San José del Guaviare

transformó los paisajes naturales y fomenta la deforestación. La presión sobre los suelos del centro urbano, sumada al aumento de asentamientos humanos y nuevas economías, dio lugar a la conversión de selva en pastizales y áreas de cultivo. Mediante el análisis de imágenes satelitales, se identificaron patrones de cambio de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal, lo cual evidencia cómo los procesos de urbanización sin planificación ambiental también representan una amenaza para los ecosistemas amazónicos.

En este mismo marco, Erasso & Vélez Lesmes (2020) y GIZ (2017) hacen énfasis en la relación entre los cultivos ilícitos y la deforestación. Para 2017, aproximadamente el 24 % de las áreas deforestadas en Colombia se atribuían al cultivo de coca, particularmente en Putumayo, Nariño, Chocó y el Guaviare. Frente a esta situación, GIZ propone siete pilares estratégicos para atender la problemática, incluyendo la gobernanza forestal, la transformación productiva, el fortalecimiento institucional y la inclusión social. Estas propuestas plantean la necesidad de abordar la deforestación desde un enfoque integral, que combine medidas de control con alternativas sostenibles y el involucramiento de las comunidades rurales.

Estos estudios permiten comprender que la deforestación en el Guaviare tiene múltiples causas: urbanas, económicas, institucionales y sociales. La débil presencia del Estado, la inseguridad jurídica sobre la tenencia de la tierra y la falta de alternativas productivas reales son factores que alimentan una dinámica de apropiación y transformación del bosque. En este contexto, resulta necesario combinar mecanismos tecnológicos como el monitoreo satelital con acciones de gobernanza local, educación ambiental y restitución de derechos territoriales.

A continuación, se aborda el impacto ecológico de la deforestación. Córdoba Ariza (2020) analiza el ecosistema fluvial de la serranía de La Lindosa y demuestra cómo la pérdida de los bosques ribereños altera las redes tróficas acuáticas. La desaparición de recursos reduce la calidad y cantidad de nutrientes que ingresan a los cuerpos de agua, lo que pone en riesgo la biodiversidad de especies acuáticas y su equilibrio ecológico. Por su parte, Buriticá Silva & Méndez Niño (2022), mediante un modelo estadístico multidepartamental (Caquetá, Meta, Guaviare y Putumayo), identifican que la deforestación no solo implica pérdida de árboles, sino también la degradación del suelo, alteraciones climáticas y una disminución crítica en la biodiversidad.

Martínez Arias (2021), al evaluar los procesos de regeneración y conectividad de los bosques en zonas de asentamiento del Guaviare, muestra que, aunque los bosques secundarios se

han incrementado, estos no reemplazan del todo las funciones ecológicas de los bosques primarios. Advierte sobre la necesidad de implementar estrategias de conservación que no solo restauran áreas degradadas, sino que también protejan los remanentes de selva intacta. Estos trabajos convergen en señalar que el impacto ecológico de la deforestación es profundo, y que su mitigación requiere un enfoque de paisaje que considere conectividad, restauración y protección simultánea.

Otro factor determinante en la aceleración de la deforestación ha sido la expansión de infraestructura vial en zonas ambientalmente sensibles. González & Gómez (2020) examinan cómo la construcción de carreteras y trochas, muchas de ellas no planificadas, ha facilitado el ingreso de actividades ilegales, el tráfico de madera y el establecimiento de nuevos asentamientos en el Guaviare. A partir del análisis de imágenes satelitales y bases de datos de deforestación, identificaron que la mayor pérdida de cobertura boscosa ocurre en los primeros cinco kilómetros alrededor de estas vías, con una clara tendencia a la fragmentación del hábitat.

En el mismo sentido, el informe técnico de la Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (2023) advierte que, pese a las restricciones legales sobre transporte pesado y construcción en áreas protegidas (como la Ley 2ª de 1959), se continúa con el desarrollo vial informal en zonas clave como la serranía de La Lindosa y alrededores del Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. Esto no solo vulnera el régimen jurídico, sino que además evidencia la falta de una política clara de infraestructura verde.

Cano (2023) y Guzmán Raquejo (2020) aportan una mirada crítica sobre la relación entre el postconflicto y la expansión territorial. En sus estudios señalan que, tras la salida de las FARC de varias zonas rurales, se produjo un vacío de poder que fue rápidamente ocupado por nuevos actores (legales e ilegales), quienes impulsaron actividades extractivas y ampliaron las rutas viales, muchas veces sin control estatal. Esta apertura descontrolada facilitó el ingreso de nuevos colonos, la expansión ganadera y la transformación del uso del suelo, incluso dentro de áreas protegidas.

Frente a estas problemáticas, Castro Venegas (2021) y Soto Becerra (2020) plantean estrategias territoriales integrales que incluyan la restauración ecológica, la participación comunitaria y el impulso de economías sostenibles como la agroecología, el ecoturismo y sistemas productivos alternativos como la acuaponía. Estas investigaciones coinciden en que el Guaviare requiere un modelo de desarrollo adaptado a su fragilidad ecológica, que priorice la conservación de sus recursos naturales.

En síntesis, la evidencia sugiere que la infraestructura vial, cuando no se articula con una planificación ambiental rigurosa ni se acompaña de procesos de ordenamiento territorial y control institucional, se convierte en un potente detonante de la deforestación. Los estudios revisados muestran que esta dinámica de apertura de caminos, combinada con el abandono estatal y la falta de gobernanza, ha acelerado la transformación del paisaje en una región que ya enfrenta múltiples presiones sobre sus ecosistemas.

La deforestación también ha tenido repercusiones directas sobre la salud ambiental y el bienestar de las comunidades humanas. Roa Gómez & Collazos Tobar (2022) documentan cómo el deterioro ambiental en regiones rurales del Guaviare ha limitado el acceso a servicios básicos como el agua potable, el saneamiento y la atención médica. La contaminación de fuentes hídricas, la pérdida de coberturas vegetales que regulan el microclima y la creciente exposición a vectores de enfermedades reflejan una realidad donde la salud pública está estrechamente ligada al estado del ecosistema.

Este vínculo entre degradación ambiental y condiciones de vida se agrava en contextos de alta ruralidad y marginalidad, donde la ausencia del Estado ha permitido el establecimiento de economías ilegales y la permanencia de estructuras armadas. En este marco, González Giraldo (2022) explora la situación en la cuenca del río Guaviare, revelando que, pese a los esfuerzos institucionales como los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), persisten conflictos por el control del territorio, expansión de la frontera agrícola y minería ilegal. Esta continuidad de dinámicas violentas impide consolidar procesos de conservación, pues la seguridad ambiental está subordinada al poder de actores no estatales.

Ambos estudios coinciden en que la recuperación ambiental no puede desvincularse de una intervención integral que combine salud, educación, justicia ambiental y gobernabilidad local. La sostenibilidad en el Guaviare requiere tanto de acciones técnicas como de transformaciones estructurales que garanticen derechos básicos y frenen las condiciones sociales que alimentan la deforestación.

Desde el enfoque metodológico, el análisis multitemporal ha sido clave para la caracterización espacial de la deforestación. Camacho Peña (2022) desarrolló un modelo de regresión logística que permitió identificar las variables territoriales asociadas a la pérdida de bosque en el Guaviare entre 2005 y 2020. El estudio reveló que la cercanía a vías terciarias, la

fragmentación del paisaje y la altitud fueron factores determinantes en la aceleración de la deforestación. Con base en estos hallazgos, se proyectaron escenarios futuros hasta 2030, mostrando una posible pérdida significativa de cobertura boscosa en ausencia de intervenciones efectivas.

De manera complementaria, Murillo Malaver (2021) empleó nueve imágenes satelitales para evaluar la reserva Nukak antes y después del acuerdo de paz, logrando demostrar una disminución en el ritmo de deforestación del 59.3% entre 2016 y 2022. Adicionalmente Méndez Rojas (2020) realizó una clasificación supervisada en el cuadrante 6-59 del satélite Landsat mediante algoritmos de aprendizaje automático, mostrando la efectividad del método K-Nearest Neighbor, con una precisión de 93.3% para detectar pérdida de vegetación en parques como Chiribiquete y Nukak.

El patrón territorial también ha sido abordado por Benavides Manrique (2023), quien identificó zonas deforestadas en Mapiripán con patrones rectos que podrían estar asociados a infraestructuras no planificadas. Su estudio, junto con el de Assunção da Silva et al. (2023), demuestra que por cada kilómetro adicional de vía no oficial se incrementa la deforestación en 0.036 km².

Estos enfoques cuantitativos han sido fortalecidos por estudios internacionales que también utilizan tecnologías satelitales para el monitoreo ambiental. Cole et al. (2018) examinaron la evolución de la cobertura del suelo en Europa, proponiendo metodologías integradas con datos multitemporales y sensores remotos de alta resolución. Igualmente, Vilar et al. (2019) emplearon índices de vegetación para evaluar la regeneración forestal en la región mediterránea, destacando cómo las tendencias de recuperación pueden ser estimadas con precisión mediante series de tiempo satelitales. Por su parte, Pilli (2012) analizó el efecto de las políticas forestales en Italia utilizando modelos de simulación para comparar escenarios de conservación y explotación.

Estas experiencias internacionales ofrecen marcos comparativos y metodológicos útiles para el contexto amazónico colombiano. Demuestran que la combinación de datos satelitales, análisis espacial y modelado estadístico permite una comprensión más profunda de los patrones de cambio de cobertura, facilitando la toma de decisiones informadas para la gestión territorial.

Finalmente, investigaciones como las de Cotoa Hernández (2020) y Camacho-López et al. (2022). Cotoa, mediante el uso del Índice de Diferencia Normalizada de la vegetación (Normalized

Difference Vegetation Index – NDVI) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), caracterizó la deforestación en el norte de Perú entre 2000 y 2020, evidenciando la pérdida de selvas húmedas por la expansión agrícola. Camacho-López et al. (2022), enfocándose en el nororiente ecuatoriano, combinó análisis geoespacial con percepción remota para identificar cambios acelerados en los paisajes forestales.

La incorporación de estas referencias internacionales permite enriquecer el análisis local en el Guaviare, destacando la importancia de adoptar tecnologías avanzadas, metodologías integradas y políticas diferenciadas según la complejidad territorial. Estos estudios reafirman la urgencia de desarrollar sistemas de monitoreo robustos que no sólo identifiquen el cambio, sino que también faciliten su gobernanza y respuesta temprana.

2 Justificación

El presente proyecto tiene como propósito analizar los impactos antrópicos derivados de la expansión de vías tanto fluviales como terrestres, sobre los ecosistemas de bosque en el NDFAB, ubicado en el municipio de Calamar, Guaviare. Esta región presenta una alta tasa de deforestación a nivel nacional, impulsada principalmente por actividades agroindustriales, expansión agrícola no planificada, cultivos ilícitos y el desarrollo de infraestructura informal.

Dado el acceso a imágenes satelitales de la plataforma PlanetScope, y de los datos abiertos del IDEAM, se plantea un análisis multitemporal con herramientas de SIG, enfocado en la comparación de la cobertura de los suelos entre los años 2017 y 2022 para el núcleo de desarrollo forestal Agua Bonita en el departamento del Guaviare, entre los municipios de Miraflores y Calamar principalmente. La investigación se apoya en la clasificación de la metodología CLC para clasificar y caracterizar los cambios en el uso del suelo en el área de estudio, lo cual permite la evaluación progresiva de la transformación del paisaje debido a las dinámicas ilegales y no reguladas.

El uso de los índices de vegetación y deforestación no solo proporciona una visión técnica de la pérdida de cobertura boscosa, sino que también permiten identificar patrones espaciales de afectación diferenciada según el tipo de vía y su proximidad a los asentamientos humanos. Este enfoque metodológico combina técnicas geoespaciales ya establecidas con una aplicación contextualizada y dirigida a una problemática ambiental particular, lo que le confiere un carácter novedoso al integrar análisis espacial, temporal y casual.

Más allá de la generación de mapas, los resultados del estudio buscan aportar herramientas útiles para la gestión ambiental territorial, orientando estrategias de conservación, planificación del uso del suelo y toma de decisiones en políticas públicas. La integración de las cuatro bandas espectrales de las imágenes PlanetScope junto con los índices NDVI y el Índice de Diferencia Normalizada del Agua (Normalized Difference Water Index - NDWI) que permite optimizar la precisión de la clasificación supervisada, lo cual contribuye a una caracterización más detallada y confiable de los cambios en la cobertura vegetal. Este nivel de análisis fortalece el valor de los hallazgos, los cuales pueden ser de utilidad para entidades gubernamentales, organizaciones ambientales y comunidades locales interesadas en disminuir la deforestación y promover un uso sostenible del territorio en la Amazonía colombiana.

La información obtenida permitió identificar, con buen nivel de detalle y respaldo técnico las zonas más afectadas en el NDFAB, diferenciando el impacto según el tipo de acceso (terrestre o fluvial) y vinculándose con las actividades socioeconómicas predominantes. Esta información no solo evidencia las áreas críticas donde la presión sobre el bosque es mayor, sino que también revela patrones espaciales que facilitan priorizar acciones de conservación y control. El valor de estos hallazgos radica en que brindan insumos claros, cuantificables y georreferenciados que pueden ser utilizados por entidades gubernamentales, organizaciones ambientales y comunidades locales para diseñar intervenciones más eficaces, orientar el ordenamiento territorial y fortalecer la gobernanza y manejo ambiental. Además, este estudio sienta las bases para un monitoreo continuo que contribuya a la sostenibilidad de no solo la escala regional, sino de toda la Amazonía del país.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la Deforestación en el Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita para los Periodos 2017-2022

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las zonas con mayor deforestación en el NDFAB entre los años 2017-2022.
- Comparar la deforestación en áreas accesibles por tierra y acceso fluvial, considerando factores como la infraestructura vial, fluvial y la proximidad a centros urbanos.
- Relacionar los patrones de deforestación con las actividades económicas de la zona.

4 Marco teórico

El bosque es un ecosistema fundamental en el equilibrio ecológico global, no solo por su biodiversidad, sino por los servicios ambientales que provee. Los bosques tropicales, como los de la cuenca amazónica, son cruciales para la regulación del clima, el ciclo del agua y la conservación de la biodiversidad. Según el IDEAM, el bosque natural es un área de tierra de mínimo una hectárea ocupada principalmente por árboles, palmas, guaduas, arbustos y lianas, en donde la cobertura de árboles es predominante con una densidad mínima del dosel de 30% y una altura no inferior a los 5 metros (Ministerio de Ambiente & IDEAM, 2023).

De acuerdo con La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2020), los bosques representan aproximadamente el 31% de la superficie terrestre del planeta, albergando cerca del 80% de las especies terrestres. Este complejo ecosistema se caracteriza por su capacidad para capturar y almacenar carbono, lo que desempeña un papel vital en la mitigación del cambio climático.

Sin embargo, las amenazas que enfrentan los bosques son cada vez más graves. El aumento de la deforestación en áreas clave como la Amazonía colombiana ha sido exacerbado por la falta de una gobernanza eficaz, el debilitamiento de las políticas ambientales y la presión de actividades económicas como la agricultura industrial. Estas actividades no solo destruyen el bosque, sino que también alteran la estructura del ecosistema, afectando la flora y fauna que dependen de él (González & Gómez, 2020).

4.1 Contexto global de la deforestación

La deforestación es uno de los mayores desafíos ambientales a nivel global, y su impacto se extiende más allá de la pérdida de árboles, afectando la biodiversidad, los ciclos del carbono y el equilibrio de los ecosistemas. A medida que las actividades humanas continúan expandiéndose, la tasa de destrucción de bosques ha alcanzado niveles alarmantes, especialmente en las regiones tropicales. Según la FAO (2020), cada año se pierden aproximadamente 10 millones de hectáreas de bosques en todo el mundo. La deforestación no solo está vinculada con la tala masiva de árboles para satisfacer las necesidades humanas, sino que también está profundamente relacionada con la expansión de la agricultura industrial, la urbanización y las actividades extractivas.

Las zonas tropicales son particularmente vulnerables a la deforestación, ya que albergan más de la mitad de los bosques del planeta, además de una rica biodiversidad que sustenta innumerables especies de flora y fauna. Estas áreas, que incluyen la cuenca del Amazonas, las selvas africanas y las regiones del sudeste asiático, experimentan altas tasas de deforestación debido principalmente a la conversión de tierras para la agricultura, la ganadería y la explotación maderera (Laurence, 2007). La deforestación en estas zonas tropicales tiene un impacto directo sobre el cambio climático, ya que los bosques actúan como sumideros de carbono, almacenando grandes cantidades de CO₂. La pérdida de estos ecosistemas incrementa la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global (Barber et al., 2014).

4.2 Definición de vías de acceso y su relación con la deforestación

Las vías de acceso se refieren a rutas de comunicación construidas para facilitar el transporte y la conectividad. Estas pueden ser terrestres (carreteras, caminos) o fluviales (ríos navegables, canales). Ambos tipos de vías tienen impactos directos en los ecosistemas forestales debido a su capacidad para alterar el uso de la tierra, facilitar la extracción de recursos naturales y modificar la dinámica de los ecosistemas (Castaño Uribe, 2004).

La deforestación, por otro lado, implica la conversión de bosques a otros usos del suelo, como la agricultura, la ganadería o la urbanización. De acuerdo con la FAO y PNUMA (2020), la expansión de la infraestructura vial es uno de los principales impulsores de la deforestación, especialmente en regiones tropicales y subtropicales, donde la biodiversidad es más vulnerable.

4.3 Impactos de las vías de acceso en la deforestación

4.3.1 Efectos de las vías terrestres

Las vías terrestres son, en muchos casos, las que presentan una mayor incidencia en la deforestación. La construcción de carreteras permite el acceso a áreas remotas, lo que facilita actividades como la tala ilegal, la minería, y la expansión de la agricultura y ganadería. Además, las carreteras crean "líneas de borde" que alteran el microclima de los bosques y favorecen el ingreso de especies invasoras (Laurence, 2007).

4.3.2 Efectos de las vías fluviales

Por otro lado, las vías fluviales, aunque menos discutidas que las terrestres, también tienen impactos importantes en la deforestación. Los ríos y los canales fluviales sirven de acceso para la extracción de recursos, como la madera, y el transporte de productos agrícolas y ganaderos hacia los mercados (González & Gómez, 2020). Además, la navegación en ríos implica la construcción de infraestructuras como puentes, diques y embarcaderos, lo que puede generar cambios en los ecosistemas ribereños y, por ende, contribuir a la deforestación.

4.4 Contexto nacional: la deforestación en Colombia

Colombia, al igual que otros países tropicales, enfrenta serios problemas vinculados a la deforestación. Según el informe de El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, 2024), en 2022 se registró la pérdida de más de 123.000 hectáreas de bosque, mientras que en 2023 la deforestación alcanzó las 70.256 hectáreas, siendo las regiones más afectadas la Amazonía, los Andes y la cuenca del Orinoco. En el caso específico de la Amazonía, las principales causas de la deforestación están relacionadas con la construcción de infraestructuras viales, la expansión de la frontera agrícola, el acaparamiento de tierras, la transformación de bosques en praderas, la ganadería extensiva y la siembra de cultivos ilícitos (González & Gómez, 2020).

De acuerdo con Castaño Uribe (2004), las vías de acceso son un factor clave en este proceso, ya que facilitan la explotación de los recursos naturales y promueven el crecimiento demográfico. A medida que se abren nuevas rutas de penetración, se desencadenan procesos de transformación del uso del suelo, alterando tanto los patrones de ocupación territorial como los asentamientos humanos en diversas regiones del país.

En cuanto a las vías fluviales, Colombia posee una vasta red de ríos navegables, especialmente en las regiones amazónicas y del Orinoco. Los ríos como el Putumayo, Caquetá y Guaviare han sido históricamente utilizados para el transporte de productos, y la construcción de puertos y embarcaderos ha alterado las dinámicas de los ecosistemas ribereños, contribuyendo indirectamente a la deforestación Castaño Uribe (2004).

De acuerdo con la FCDS, en Colombia, los departamentos del Guaviare, Caquetá y Meta son los más afectados por esta problemática (FCDS, 2023). Con el fin de reducir las zonas de

impacto en el departamento del Guaviare, el ministerio de ambiente y las corporaciones regionales, avanzan en la implementación de un modelo forestal llamado “Núcleos de Desarrollo Forestal” (NDF), buscando transitar de un modelo extractivista a un modelo sostenible; el NDFAB se encuentra ubicado en el municipio de Calamar, departamento del Guaviare (Visión Amazonía, 2020).

4.5 Análisis multitemporal en estudios de deforestación

El análisis multitemporal es una técnica metodológica utilizada para estudiar los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, mediante el uso de imágenes satelitales u otras fuentes de datos espaciales. Este enfoque permite observar y cuantificar la evolución de ciertos fenómenos, como la deforestación, el cambio de uso del suelo y los efectos de intervenciones humanas en los ecosistemas. Se basa en la comparación de imágenes obtenidas en diferentes momentos para identificar y analizar las dinámicas de cambio en el paisaje (Gil & Morales, 2016).

4.5.1 Herramientas y métodos para el análisis multitemporal

Las imágenes satelitales son esenciales para el análisis multitemporal debido a su capacidad para ofrecer datos detallados sobre grandes áreas geográficas. Satélites como Landsat, Sentinel-2 y MODIS han sido fundamentales en estudios sobre el cambio de uso del suelo y la deforestación. Landsat, por ejemplo, proporciona imágenes con una resolución de 30 metros y una frecuencia de adquisición cada 16 días. Por otro lado, los satélites Sentinel-2, con una resolución de hasta 10 metros, han revolucionado el análisis multitemporal al proporcionar imágenes de alta resolución y con una cobertura global casi continua (Bravo Morales, 2017).

El procesamiento de imágenes es otra herramienta crucial en el análisis multitemporal. Las imágenes satelitales, al ser captadas en diferentes momentos, pueden presentar variaciones debido a factores como las condiciones atmosféricas, la presencia de nubes o los cambios estacionales. Para corregir estos problemas, se utilizan técnicas de preprocesamiento, como la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, que aseguran que las imágenes sean comparables entre sí. Una vez procesadas, las imágenes pueden ser clasificadas mediante métodos como la clasificación supervisada o no supervisada, que permiten identificar distintas categorías de uso del suelo, como bosques, áreas agrícolas, zonas urbanas, entre otras (Hantson et al., 2011).

Los SIG son herramientas clave para integrar y analizar los datos espaciales obtenidos de las imágenes satelitales. A través de los SIG, se pueden combinar imágenes multitemporales con otras capas de información (topográficas, hidrológicas, sociales) y realizar análisis de patrones espaciales y temporales, lo que facilita el estudio de procesos como la deforestación o la expansión agrícola (Gil & Morales, 2016).

4.5.2 Casos de estudio multitemporales de deforestación en Colombia y regiones amazónicas

En Colombia, la Amazonía ha experimentado una significativa pérdida de bosques debido a la expansión de la frontera agrícola, la explotación ilegal de recursos naturales y el narcotráfico. La investigación multitemporal ha permitido identificar las causas subyacentes de la deforestación en diversas zonas del país. Un estudio de Hansen et al. (2013), realizado a nivel global, mostró cómo la deforestación en el Amazonas brasileño se aceleró en las décadas de 1990 y 2000 debido a la expansión de carreteras y caminos, que impulsaron la colonización agrícola y ganadera. Utilizando imágenes de satélite de alta resolución, los investigadores pudieron observar cómo la deforestación no solo afectó a Brasil, sino también a las áreas fronterizas de Colombia, donde la deforestación sigue siendo un desafío importante. El análisis multitemporal en esta región reveló que, aunque las políticas de conservación como la creación de áreas protegidas han reducido las tasas de deforestación en algunas zonas, el crecimiento de la infraestructura vial sigue siendo un impulsor clave de la pérdida de bosques.

De manera similar, un estudio realizado por Benavides Manrique (2023), en donde a través de un análisis multitemporal entre los años 2015 a 2022 fue posible evidenciar el aumento en la deforestación en la zona amazónica del municipio de Mapiripán en el departamento del Meta, para el año 2015 paso de 586 polígonos de deforestación con un área de 1595,31 ha a 1039 polígonos con un área de 5591.63 para el año 2022. Con base en información del Ministerio de Ambiente y IDEAM (2023) desde el 2019 se pudo observar un patrón en los polígonos de deforestación asociados a las infraestructuras no planificadas o vías terciarias que facilitan la tala de bosques y la agricultura migratoria.

Otro ejemplo relevante es el análisis de deforestación en los departamentos de Caquetá y Putumayo en Colombia, un área que ha sido profundamente afectada por la expansión de cultivos de coca y la construcción de nuevas carreteras ilegales. Murad & Pearse (2018) usaron imágenes Landsat para identificar los cambios en la cobertura forestal entre 2000 y 2016, demostrando que

la construcción de carreteras no solo ha facilitado la expansión de la frontera agrícola, sino también el aumento de actividades ilícitas como la minería y la tala ilegal.

4.6 Limitaciones y desafíos del análisis multitemporal en el contexto amazónico

El análisis multitemporal de la deforestación, aunque es una herramienta poderosa para monitorear cambios en el uso del suelo y la cobertura forestal, enfrenta diversas limitaciones y desafíos en su aplicación. Estos retos están relacionados con la calidad de los datos, la complejidad de los procesos de cambio en estos ecosistemas, y la integración de factores socioeconómicos y ambientales que influyen en la deforestación.

Una limitación importante es la escasa disponibilidad de datos complementarios, como los relacionados con actividades humanas informales e ilegales, lo que hace difícil correlacionar los cambios observados con sus causas latentes. La deforestación en áreas amazónicas a menudo está relacionada con actividades informales o ilegales, cuya información es difícil de obtener y difícil de integrar en modelos multitemporales (Gil & Morales, 2016)

5 Metodología

5.1 Enfoque metodológico

La investigación se planteó con un enfoque metodológico de tipo mixto. Los procesamientos digitales de imágenes utilizan información cuantitativa para representar y obtener resultados gráficos; Estas imágenes satelitales producto del procesamiento digital también se representan con información cuantitativa, guardada como valores únicos en cada píxel de la imagen. Por otro lado, la interpretación de las imágenes obtenidas se realiza mediante la asignación de categorías cualitativas a los rangos cuantitativos resultado del procesamiento y el álgebra de mapas llevado a cabo con las diferentes bandas de las imágenes. La obtención de mapas de uso del suelo y cobertura vegetal se da de manera cualitativa, mientras que el cálculo de la deforestación promedio se interpreta en valores cuantitativos. La concentración de pérdida de cobertura boscosa se da en cinco rangos cualitativos: baja, media, alta, muy alta y extremadamente alta.

5.2 Tipo de estudio

Este estudio es de tipo descriptivo y de tipo correlacional. El estudio de tipo descriptivo se basa en determinar la información inherente al fenómeno de la deforestación como son las tasas de deforestación anual promedio y la concentración de la pérdida de cobertura boscosa, identificando cómo se dan estas variaciones año tras año en el periodo estudiado.

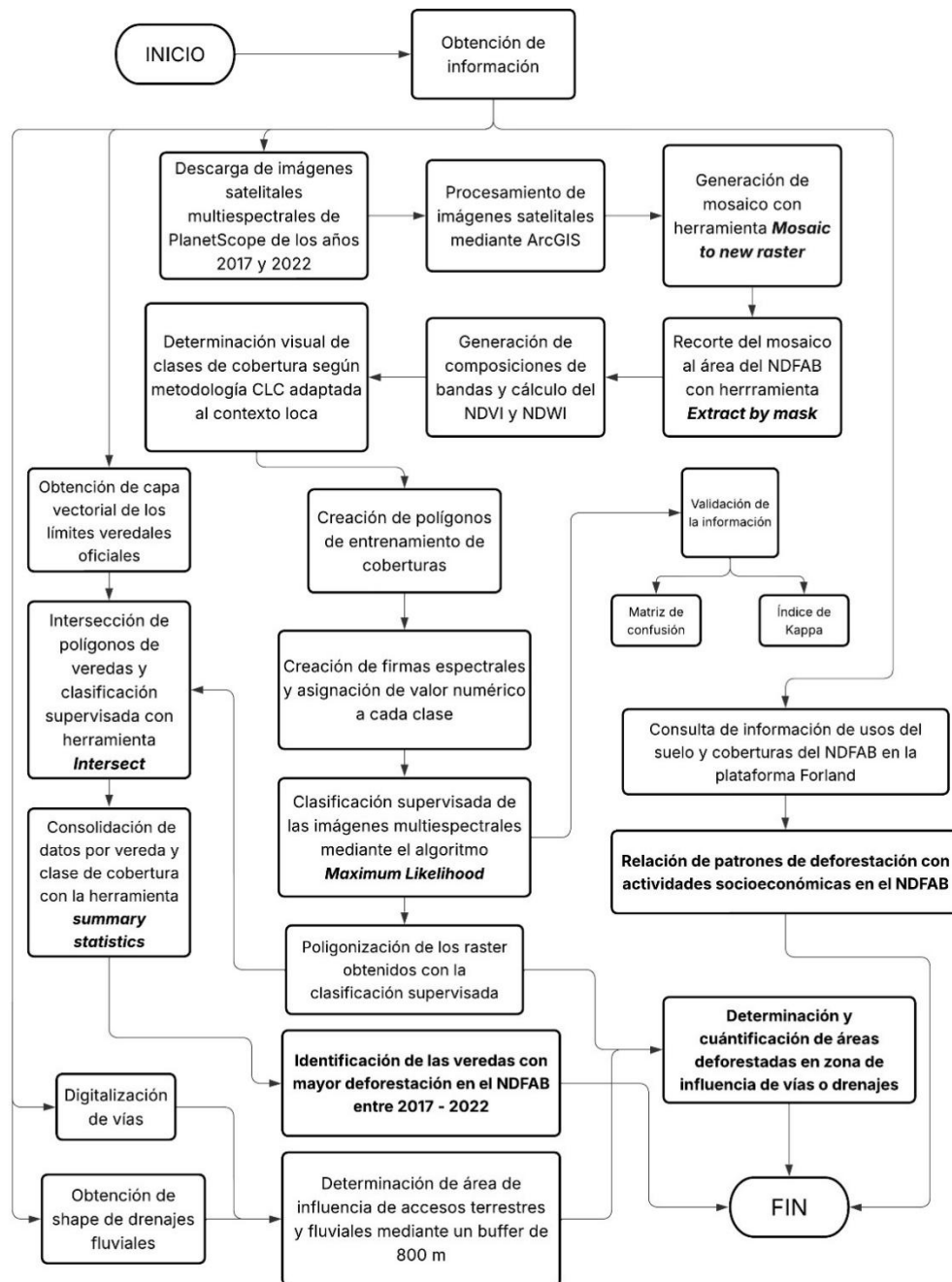
El tipo de estudio correlacional se da al explicar la relación entre las actividades económicas de la zona amazónica, su variación en los periodos determinados y los cambios en los usos del suelo y cómo estas variaciones se relacionan con el aumento de la deforestación, identificando patrones que permitan hacer modelos predictivos.

5.3 Procedimiento

En esta sección se describe en detalle el procesamiento y análisis de la información implementados para alcanzar los objetivos propuestos. En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo del procedimiento utilizado.

Figura 2

Diagrama de flujo del procedimiento



5.3.1 *Obtención de información*

Se descargaron las imágenes satelitales de Planet Scope desde la página web de planet.com, con una resolución espacial de 3,8 m. Se seleccionó la opción *Basemaps Viewers* en el menú Planet Applications, donde se filtró por imágenes mensuales, y se buscaron imágenes de diciembre de 2017 y diciembre de 2022, para abarcar el periodo de estudio y que las imágenes fueran del mismo mes. Se obtuvo la delimitación geográfica del área, vías y fuentes hídricas del área de estudio NDFAB, por medio de información secundaria suministrada por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y Oriente Amazónico (CDA), quien brindó la información en formato ShapeFile.

Mediante el software ArcGIS, se desplegaron las imágenes descargadas de Planet Scope, 16 imágenes con cuatro bandas en total para cubrir el área de estudio, y se realizó un mosaico para combinarlas en una sola imagen de cuatro bandas, mediante el geoproceso **ArcToolbox> Data Management Tools > Raster > Raster Dataset > Mosaic to new raster**.

Con la herramienta de extracción por máscara, se recortó la imagen mosaico ráster en función del archivo ShapeFile de la delimitación del NDFAB, esto con el objetivo de que todo procesamiento se realice solamente en el área de estudio. Se generaron combinaciones de bandas por medio del geoprocesamiento **ArcToolbox>Data Management Tools>Raster Processing> Composición de bandas**. Finalmente, se calculó el NDVI para las imágenes de ambas fechas.

5.3.2 *Procesamiento y análisis de la información*

5.3.2.1 **Clasificación supervisada.**

Se utilizaron las cuatro bandas espectrales disponibles en las imágenes PlanetScope, correspondientes a: Banda 1: Azul, Banda 2: Verde, Banda 3: Rojo, Banda 4: Infrarrojo cercano (NIR). Con base en las bandas anteriores se calcularon dos índices complementarios que permiten mejorar la discriminación de cobertura NDWI y NDVI, posteriormente se combinaron las seis bandas resultantes en una sola imagen para su posterior análisis y clasificación.

Una vez realizada la composición de bandas, se procedió a comparar e interpretar visualmente las coberturas presentes en el área de estudio siguiendo los lineamientos de la metodología CLC adaptada al contexto local, se definieron cinco clases de coberturas o

vegetación representativos Tabla 1, para cada clase se delimitaron polígonos de entrenamiento en distintas áreas de la imagen, seleccionando muestras representativas de cada clase de cobertura con base en la interpretación visual y conocimiento del área de estudio. Estas muestras se usaron para extraer la firma espectral característica por medio del geoprocesamiento Herramienta de Spatial Analyst > Multivariante > Crear firmas, asignando un valor numérico a cada clase.

Tabla 1

Ejemplo de Clasificación de coberturas.

TEMÁTICAS POR IMPLEMENTAR	
GRIDCODE	CLASIFICACIÓN CLC
1	Bosques (CLC 31)
2	Vegetación secundaria (CLC 324)
3	Suelo desnudo (CLC 333)
4	Aguas Superficiales (CLC 51)
5	Zonas artificiales (CLC 1)

Fuente: los autores

Con estas firmas, se generó un archivo espectral que representa estadísticamente el comportamiento espectral de cada clase en las seis bandas utilizadas, permitiendo que el algoritmo reconozca patrones específicos por clase, por último, se aplicó una técnica de clasificación supervisada, como el Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood) o Máxima Similitud Espectral, usando el archivo de firmas generado anteriormente. El algoritmo asigna una clase a cada píxel de la imagen, en función de su similitud con las firmas espectrales.

5.3.2.2 Validación de información.

La validación de la clasificación supervisada obtenida del conjunto de imágenes satelitales se realizó mediante el método Matriz de confusión.

5.3.2.2.1 *Matriz de confusión.*

Para evaluar la precisión de la clasificación se calculó la matriz de confusión de kappa, para esto se usó la herramienta crear puntos de evaluación de precisión en Arcgis Pro, la cual crea puntos aleatorios asignándoles una clase en base al archivo ráster de la clasificación supervisada, este proceso busca determinar el grado de coincidencia entre la clase asignada por el algoritmo de la clasificación y la clase real observada mediante fotointerpretación, y de esta forma se comparan los puntos de referencia con los resultados de la clasificación en las mismas ubicaciones, para toda la zona de estudio se usaron 200 puntos aleatorios.

Con los puntos de validación generados, se elaboró la matriz de confusión mediante la herramienta matriz de confusión, esta herramienta compara el valor real de la clase con el valor de la clase clasificada, generando una tabla cruzada que permite analizar la precisión de cada categoría.

5.3.2.2.2 *Índice de Kappa.*

El índice de Kappa es el método que corrige el azar de acuerdo con la concordancia observada, usando la siguiente ecuación:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}$$

Fuente: Cortés-Reyes et al. (2010)

Siendo:

$P_0 =$ concordancia observada

$P_e =$ concordancia esperada por azar

$1 - P_e =$ máxima concordancia potencial no correspondida a la casualidad.

De acuerdo con lo definido para el índice de Kappa, la concordancia definida, se muestra en la Tabla 2, propuesta por Landis y Koch (1977).

Tabla 2

Coefficiente Kappa y sus valores de concordancia

Coefficiente de Kappa	Fuerza de Acuerdo
<0,00	Pobre
0,00 – 0,20	Leve
0,21-0,40	Aceptable
0,41-0,60	Moderado
0,61-0,80	Excelente
0,81-1,00	Casi perfecta

Nota: Tomado de Landis & Koch (1977).

5.3.2.3 Post-clasificación, conversión y cuantificación de áreas deforestadas.

Para evaluar los cambios en las coberturas en los periodos de estudio se realizó el proceso de vectorización de la clasificación supervisada en Arcgis Pro, es decir, el archivo ráster resultado de la clasificación supervisada fue transformado en archivo vectorial para realizar la cuantificación de área deforestada por las actividades antrópicas.

5.3.2.3.1 Tasa promedio anual (ha).

Para el cálculo de la tasa promedio anual de deforestación, se usó la ecuación que calcula el índice de deforestación propuesta por la FAO en 1995 (Puyravaud, 2003)

$$TMAD = \frac{AB_{t1} - AB_{t2}}{n}$$

Donde:

$TMAD$ = tasa promedio anual de deforestación

AB_{t1} = área de bosque inicial (ha)

AB_{t2} = área de bosque final (ha)

n = diferencia de años entre el bosque inicial y el bosque final ($t1 - t2$)

5.3.2.2.2 *Tasa Anual (%)*.

Para el cálculo de la tasa anual de deforestación, se usó la ecuación (Forero Riaño & Polanco Puerta, 2021)

$$Td = \left(\frac{AB_{t1} - AB_{t2}}{AB_{t1} * n} \right) * 100$$

Td = tasa de deforestación anual

AB_{t1} = área de bosque inicial (ha)

AB_{t2} = área de bosque final (ha)

n = diferencia de años entre el bosque inicial y el bosque final ($t1 - t2$)

5.3.2.4 Análisis espacial de coberturas por veredas.

Para identificar la distribución y extensión de las diferentes clases de coberturas identificada por medio de la clasificación supervisada, dentro de los límites de cada vereda del área de estudio, se obtuvo la capa vectorial de los límites veredales oficiales por medio de la entidad gubernamental.

Se realizó una intersección espacial entre el archivo Shape de veredas y el archivo shape resultante de la clasificación supervisada, mediante la herramienta *Intersect* en Arcgis Pro, esta herramienta permite obtener una nueva capa vectorial en la cual cada geometría representa la intersección entre una clase de cobertura y una vereda específica, a cada polígono resultante de la intersección se le calculó el área en hectáreas y posteriormente se utilizó la herramienta *summary statistics* para consolidar los datos por vereda y clase de cobertura.

5.3.2.5 Comparación de los patrones de deforestación en áreas de influencia según acceso terrestre o fluvial.

Para establecer la relación entre los patrones de deforestación y la accesibilidad según tipo de infraestructura (vial y fluvial), se implementó una metodología basada en el análisis espacial multitemporal, integrando imágenes satelitales de alta resolución y fuentes cartográficas oficiales.

En primera instancia, se realizó la digitalización manual de la red vial presente en el NDFAB, utilizando como insumo imágenes PlanetScope de alta resolución, las cuales permitieron identificar y trazar con precisión las vías más recientes. Por otro lado, la red de drenajes fluviales fue obtenida del portal oficial Colombia en Mapas.

Posteriormente, en ArcGIS Pro, se generaron zonas de influencia para ambos tipos de accesibilidad (vías terrestres y drenajes fluviales), mediante la herramienta Buffer, se definió un radio de 800 m para la generación de las zonas de influencia a partir de vías terrestres y drenajes fluviales. La elección de este valor respondió a criterios prácticos y analíticos, más que a la adopción de un umbral previamente establecido en la literatura. Por un lado, una distancia mayor habría ocasionado una superposición excesiva entre las áreas de influencia de las diferentes vías, reduciendo la capacidad de diferenciar los patrones de accesibilidad y de presión antrópica. Por otro lado, el radio seleccionado permitió mantener una escala adecuada para captar variaciones en la cobertura, garantizando una muestra representativa tanto de zonas de deforestación como de suelos desnudos y coberturas arbóreas. De este modo, los 800 m se definieron como un compromiso metodológico entre la precisión espacial y la necesidad de contar con áreas de análisis suficientemente amplias para reflejar los impactos asociados al acceso, tanto para el periodo inicial (2017) como para el final del análisis (2022). A continuación, se realizó una intersección espacial (spatial join) entre los polígonos de cambio de cobertura de la tierra (generados previamente a partir del análisis multitemporal) y las zonas de influencia vial y fluvial. Este procedimiento permitió extraer la superficie de cada clase de cobertura (bosque, suelo desnudo y vegetación secundaria) contenida dentro de las áreas de influencia, para cada uno de los periodos analizados.

Dado que la longitud de la red vial aumentó con el paso del tiempo, se aplicó una normalización por kilómetro de vía, con el fin de obtener valores comparables en el tiempo. Para ello, se calculó el área promedio por kilómetro de vía para cada tipo de cobertura, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Área por km de vía} = \frac{\text{Área cobertura}}{\text{Longitud total de vías}}$$

En el caso de las fuentes hídricas, se asumió que su longitud permaneció constante durante el periodo de análisis, por lo que se evaluaron los cambios en cobertura mediante los siguientes indicadores:

Cambio absoluto: Área 2022 - Área 2017

Cambio porcentual $\left(\frac{\text{Área 2022}-\text{Área 2017}}{\text{Área 2017}}\right) \times 100$

Con los datos obtenidos, se desarrolló un análisis comparativo que permitió identificar las zonas con mayor pérdida o ganancia de cobertura boscosa, los sectores donde se incrementó el suelo desnudo, y los patrones espaciales de transformación más asociados a cada tipo de acceso (terrestre o fluvial).

Adicionalmente, con el fin de profundizar en la posible incidencia del crecimiento de la infraestructura vial sobre la deforestación a escala local, se realizó un análisis espacial específico por veredas. Para ello, se utilizó la capa oficial de veredas del NDFAB (San José del Guaviare) y se efectuó una intersección espacial entre esta capa y las vías terrestres, tanto para el año 2017 como para el 2022, empleando la herramienta **Intersect** en ArcGIS Pro. Este procedimiento permitió calcular la longitud total de vías terrestres por vereda en ambos años.

5.3.2.6 Identificación de patrones de deforestación por actividad socioeconómica

Para la identificación de patrones de deforestación en el NDFAB, se tuvieron en cuenta las actividades agroecológicas identificadas en el marco normativo y las arrojadas por la plataforma Forland del Guaviare (Gobernación del Guaviare, 2017). Esta actividad hace parte del análisis multitemporal previamente realizado de uso del suelo en el marco de una investigación sobre dinámicas socioambientales y procesos de deforestación. El procedimiento se apoyó en el uso de la plataforma Forland del Guaviare, la cual brinda acceso a información geoespacial detallada sobre usos del suelo, coberturas, zonificaciones ambientales y planificación participativa. Según la Resolución 261 de 2018 del Ministerio

de Agricultura y Desarrollo Rural, se establece el marco conceptual y normativo para el desarrollo sostenible en los núcleos de desarrollo forestal del departamento.

Para la recolección de información gráfica se utilizó el visor geográfico de Forland Guaviare. Este visor permite activar capas temáticas de planificación, como núcleos de desarrollo forestal, actividades agroecológicas, límites prediales, coberturas vegetales, entre otros (Gobernación del Guaviare, 2017).

El procedimiento metodológico en la plataforma se traduce en:

Se accedió al visor web de Forland Guaviare en el módulo de planificación. Dentro del entorno se seleccionó el repositorio “Planeación” y se cargaron las capas correspondientes a núcleos de desarrollo forestal y actividades agroecológicas.

Se activaron las capas “Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita” y “Actividades Agroecológicas”.

Mediante navegación interactiva se inspeccionaron los polígonos visibles dentro del NDFAB. Al hacer clic sobre cada polígono, el visor desplegó la categoría de actividad agroecológica correspondiente.

Con base en la Resolución 261 de 2018, se hizo una descripción normativa de cada una de las clases identificadas, a fin de vincular el análisis espacial con los principios socioeconómicos que rigen en la región, finalmente se observa la trazabilidad de la zona hasta la actualidad.

6 Resultados

6.1 Análisis estadístico de la validación de resultados: Índice Kappa y Matriz de Confusión

Para la matriz de confusión y la creación de puntos aleatorios se fijaron 200 puntos por la extensión del área de estudio para cada año; la Tabla 3, correspondiente al año 2017, muestra un coeficiente de kappa de 0,714, lo que indica un nivel de concordancia excelente entre la clasificación realizada y los datos de referencia, evidenciando que la clasificación del año 2017 presenta una calidad cartográfica sólida y confiable, siendo adecuada para su uso y análisis.

Tabla 3

Matriz de confusión y cálculo de Coeficiente de Kappa en el año 2017.

Clasificación	Bosque	Vegetación secundaria	Suelo desnudo	Aguas Superficiales	Zonas Artificiales	Total	Precisión	Coeficiente de Kappa
Bosque	158	1	0	0	0	159	0,993711	0
Vegetación secundaria	12	10	0	0	0	22	0,454545	0
Suelo desnudo	0	0	17	0	0	17	1	0
Aguas Superficiales	4	1	2	3	0	10	0,3	0
Zonas Artificiales	0	0	5	0	5	10	0,5	0
Total	174	12	24	3	5	218	0	0
Precisión	0,908046	0,833333	0,708333	1	1	0	0,885321	0
Coeficiente de Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,714749

La Tabla 4, correspondiente al año 2022, muestra un coeficiente de kappa de 0,82, lo que indica un nivel de concordancia excelente entre la clasificación realizada y los datos de referencia, evidenciando que la clasificación del año 2022 presenta una calidad cartográfica sólida y confiables, siendo adecuada para su uso y análisis.

Tabla 4*Matriz de confusión y cálculo de Coeficiente de Kappa en el año 2022.*

Clasificación	Bosque	Vegetación secundaria	Suelo desnudo	Aguas Superficiales	Zonas Artificiales	Total	Precisión	Coeficiente de Kappa
Bosque	147	1	0	0	0	148	0,993243	0
Vegetación secundaria	3	19	4	0	0	26	0,730769	0
Suelo desnudo	0	0	21	0	1	22	0,954545	0
Aguas Superficiales	3	2	0	5	0	10	0,5	0
Zonas Artificiales	0	0	4	0	6	10	0,6	0
Total	153	22	29	5	7	216	0	0
Precisión	0,960784	0,863636	0,724138	1	0,857143	0	0,916667	0
Coeficiente de Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,828587

6.2 Análisis multitemporal por medio de la clasificación supervisada

A partir del análisis multitemporal por medio de la clasificación supervisada de las imágenes satelitales, se identificó para el periodo 2017, que la cobertura de Bosque mostró una dominancia, ocupando una superficie de 200.578,37 hectáreas, equivalente al 79,82 % del área total del NDFAB; la vegetación secundaria corresponde a la segunda cobertura más representativa, con 26.782,73 hectáreas (10,66%), mientras que el suelo desnudo representó el 8,31 % del total, con 203.874,58 hectáreas; por otra parte, las aguas superficiales ocupan un área mucho menor (1% del área total) con 2.523,16 hectáreas, mientras que las zonas artificiales (vías) representaron apenas el 0,20% con 514,46 hectáreas, mostrando un nivel bajo en desarrollo de infraestructura vial en el área de estudio para este periodo. En la Tabla 5 se presentan los resultados resumidos.

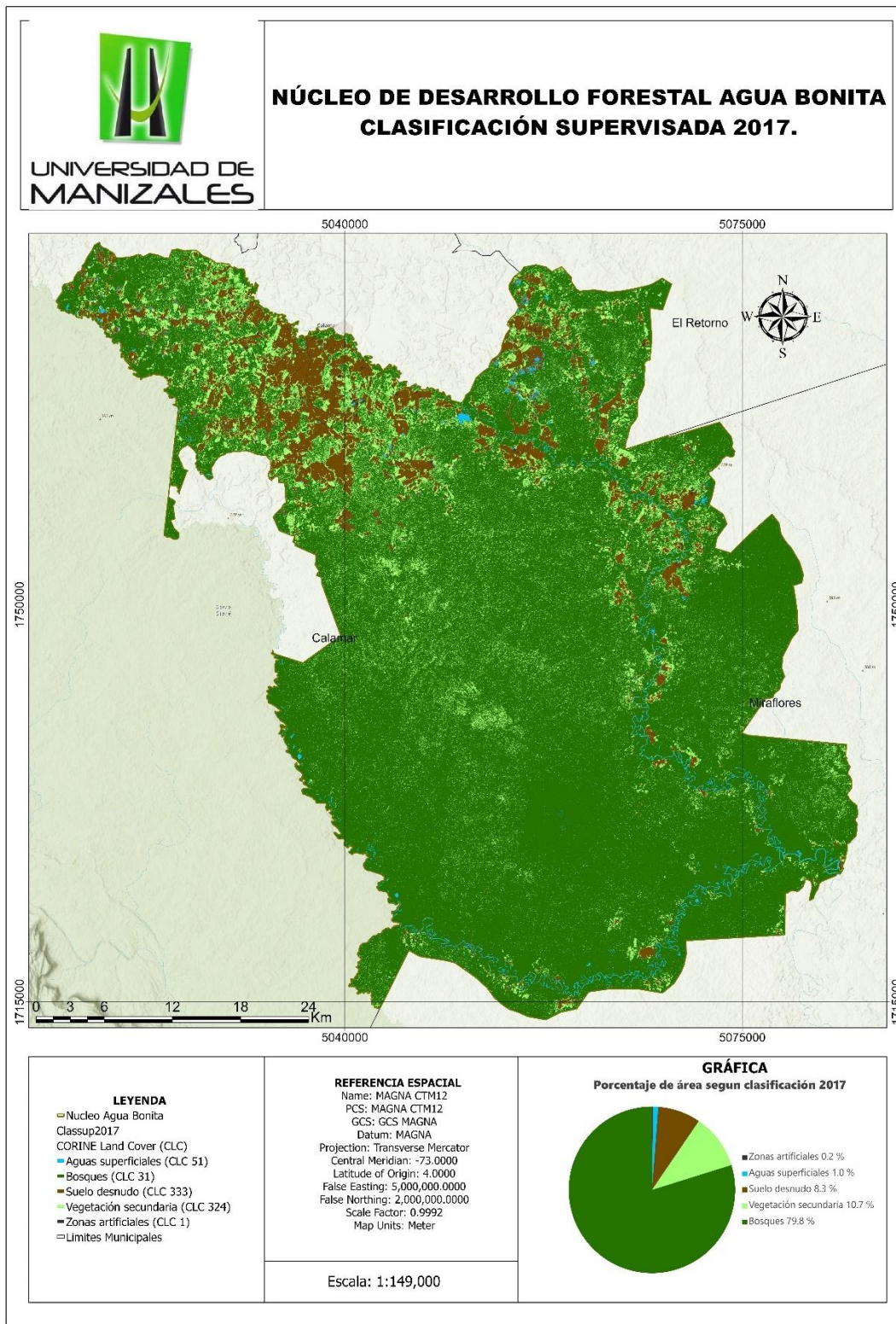
Tabla 5*Cálculo de clasificación supervisada año 2017.*

Clasificación	Área (ha) 2017	Porcentaje de Área 2017
Bosque	200.578,3657	79,824784
Vegetación secundaria	26.782,72988	10,658805
Suelo desnudo	20.874,57694	8,307519
Aguas Superficiales	2.523,166078	1,004152
Zonas Artificiales	514,456446	0,20474
Total	251.273,295	100

A continuación, en la Figura 3 se presenta la composición de mapas de la zona de estudio para el periodo 2017.

Figura 3

Mapa de clasificación del uso del suelo y cobertura vegetal, NDFAB en el año 2017.



Para el periodo 2022, se observa una disminución del área de bosque, que pasó a ocupar un área de 187.267,57 hectáreas, lo que representa el 74,52% del total del área NDFAB; por otro lado, la vegetación secundaria mostró un incremento considerable, alcanzando 31.755,12 hectáreas, lo cual equivale al 12,64% de la superficie; el suelo desnudo también evidenció una expansión, con 28.215,28 hectáreas, correspondientes al 11,23% del área total; por otro lado, las aguas superficiales aumentaron ligeramente, cubriendo ahora 3.631,78 hectáreas (1,45%); finalmente, las zonas artificiales ocuparon 412,62 hectáreas lo que representa apenas el 0,16% del área. En la Tabla 6 se presentan los resultados resumidos.

Tabla 6

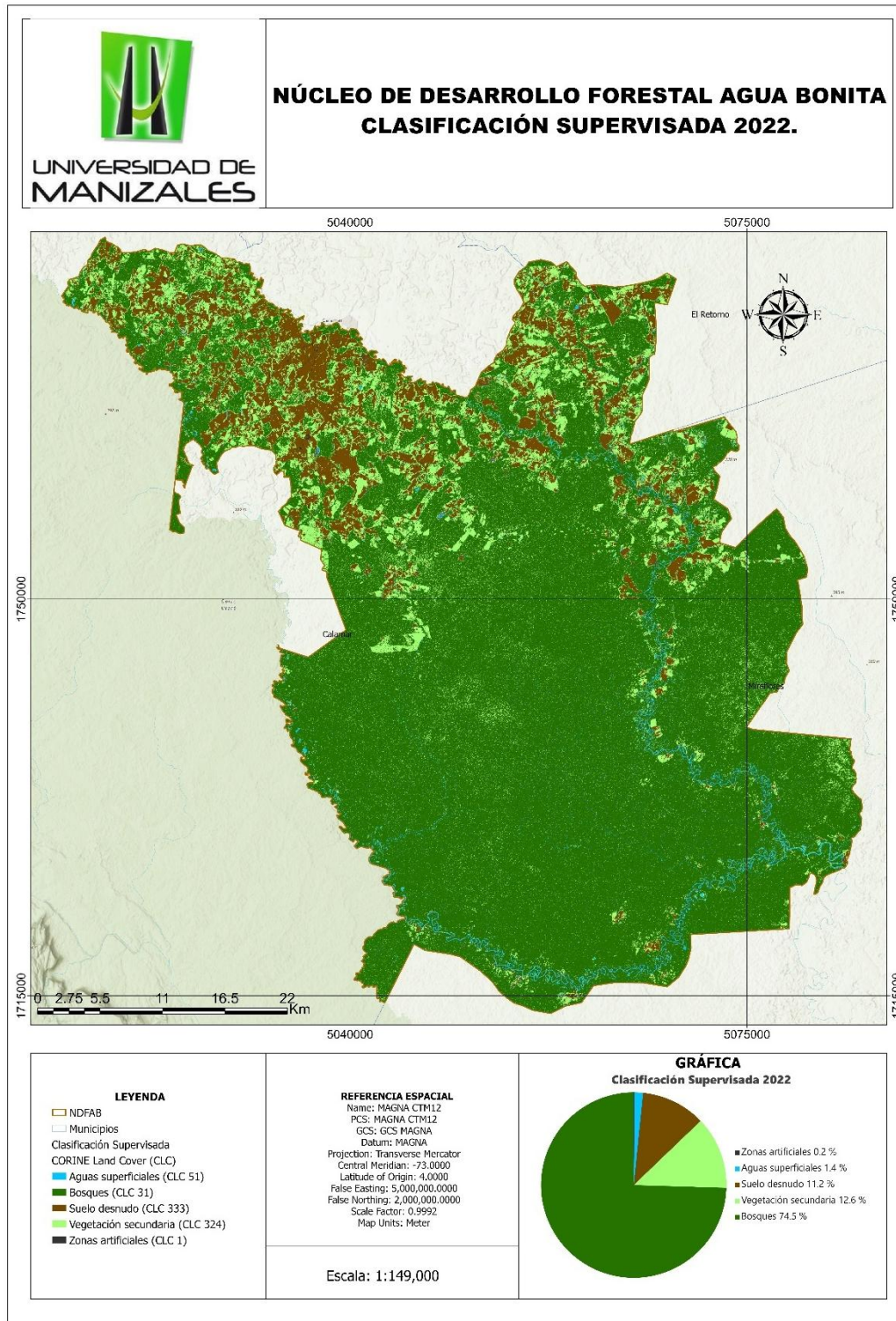
Cálculo de clasificación supervisada año 2022.

Clasificación	Área (ha) 2022	Porcentaje de Área 2022
Bosque	187.267,572	74,524752
Vegetación secundaria	31.755,1172	12,637224
Suelo desnudo	28.215,28387	11,228517
Aguas Superficiales	3.631,783878	1,4453
Zonas Artificiales	412,624235	0,164207

A continuación, en la Figura 4 se presenta la composición de mapas de la zona de estudio para el periodo 2022.

Figura 4

Mapa de clasificación del uso del suelo y cobertura vegetal, NDFAB en el año 2022.



La Tabla 7 y la Figura 5 muestran en resumen los cambios de cobertura entre los años 2017 y 2022, en que se identifican procesos simultáneos de pérdida de bosque, regeneración de la vegetación secundaria, aumentó del suelo desnudo y una ligera expansión del área de aguas superficiales.

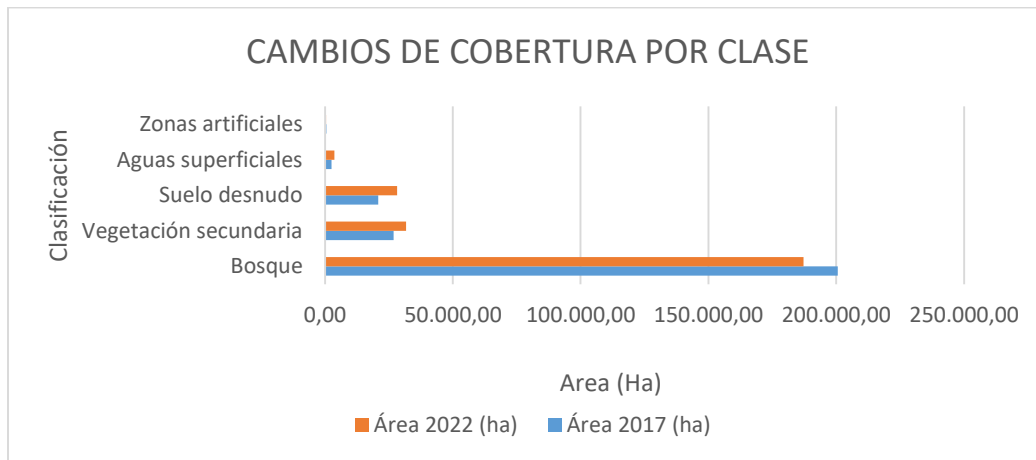
La cobertura boscosa registró una pérdida de 13.318,79 hectáreas, equivalente a una pérdida relativa del 6,64% en cinco años, lo que se traduce en una tasa anual de deforestación del 1,37%, en contraste, la vegetación secundaria registró un incremento de 4.972,39 hectáreas (18,57%), con una tasa anual de aumento del 3,41%.

El suelo desnudo presentó un aumento de 7.340,71 hectáreas (35,17%), con una tasa de crecimiento del 6,03%, las aguas superficiales incrementaron en 1.108,62 hectáreas (43,94%) con una tasa anual de 7,28%, se presenta una disminución en el área de las zonas artificiales en la clasificación supervisada del 2020 con una reducción del 19,79%, con una tasa de decrecimiento del -4,41%.

Tabla 7

Cambios de cobertura entre los años 2017 y 2022.

Clasificación	Área 2017 (ha)	Área 2022 (ha)	Cambio (ha)	Cambio (%)	Tasa Anual (%)
Bosque	200.578,37	187.267,57	13.310,79	-6,64%	1,37%
Vegetación secundaria	26.782,73	31.755,12	4.972,39	18,57%	3,41%
Suelo desnudo	20.874,58	28.215,28	7.340,71	35,17%	6,03%
Aguas superficiales	2.523,17	3.631,78	1.108,62	43,94%	7,28%
Zonas artificiales	514,46	412,62	-101,83	-19,79%	-4,41%

Figura 5*Cambios de cobertura por clase.*

Como parte del análisis del cambio de cobertura, se calcularon tres indicadores para interpretar el grado de presión antrópica, transformación ecológica y capacidad de regeneración del paisaje, el indicador de presión antrópica con un valor del 11,39% indica una presión humana moderada, pero creciente sobre el ecosistema, el IRE con el 0,37 indica que el 37% del bosque deforestado está en proceso de regeneración, indicando una recuperación parcial del NDFAB, el índice LTI con un porcentaje de 13% implica que el paisaje conserva buena parte de su estructura natural, con señales de alteración progresiva. Los indicadores calculados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8*Indicadores de alteración.*

Indicador	Valor
Presión antrópica (%)	11,39 %
Índice de recuperación ecológica	0,37
Índice de transformación del paisaje (LTI)	0,13

Tras la intersección espacial entre la cobertura de bosque y el límite de veredas del NDFAB, se identificó el comportamiento de pérdida de bosque en 18 veredas del área de estudio, con

variaciones importantes tanto en área como en porcentaje. El cálculo del área de bosque por vereda se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Cálculo de área de bosque por vereda en el NDFAB para los años 2017 y 2022.

N°	Vereda	Bosque 2017 (ha)	Bosque 2022 (ha)	Deforestado (ha)	% Pérdida
1	Agua Bonita Baja	5.436,24	4.027,58	1.408,65	25.91%
2	Agua Bonita Media	6.198,21	3.898,77	2.299,45	37.11%
4	Brisas Del Itilla	4.706,98	3.179,00	1.527,98	32.47%
5	Caño Caribe	2.344,11	1.927,30	416,81	17.78%
6	El Triunfo	2.210,05	1.831,46	378,59	17.13%
7	Itilla	7.817,07	7.692,70	124,37	1.59%
8	La Ceiba	2.636,87	1.906,66	730,21	27.70%
10	La Cristalina Baja	2.536,90	1.988,98	547,93	21.60%
11	La Esmeralda 3	630,25	521,30	108,95	17.29%
12	La Reforma 2	4.681,06	4.631,37	49,69	1.06%
13	La Tigrera	1.743,65	1.184,86	558,79	32.04%
14	La Union 1	5.898,45	5.380,76	517,69	8.78%
15	Las Palmas	1.897,54	1.622,69	274,85	14.49%
16	Nuevo Horizonte	1.712,80	1.185,45	527,34	30.78%
18	Patio Bonito Bajo	1.627,00	1.602,65	24,36	1.50%
19	Puerto Cubarro	25,12	24,90	0,22	0.87%
20	Puerto Nuevo	4.961,88	4.743,24	218,64	4.41%
21	Puerto Polaco	773,21	389,87	383,34	49.58%

Las veredas con mayor pérdida absoluta de bosque fueron la vereda Agua Bonita Media, con una pérdida de 2.299,45 hectáreas, seguido de Brisas de Itilla, con una pérdida de 1.527,98 hectáreas, y por último la vereda de Agua Bonita baja, con una pérdida de 1.408,65 hectáreas.

Se logró identificar que las veredas con mayor deforestación en términos porcentuales fueron en primer lugar Puerto Polaco, con el 49.58% seguido por la vereda Agua Bonita Media con el 37.11% y Brisas del Itilla con el 32,74% de pérdida de su bosque entre 2017 y 2022.

6.3 Influencia de los accesos terrestre y fluvial sobre los cambios en la cobertura terrestre

6.3.1 *Cambios en la infraestructura vial*

La red de infraestructura vial del NDFAB experimentó un incremento significativo durante el periodo de estudio. Según los datos recopilados, la longitud total de vías pasó de 236 km en 2017 a 413 km en 2022, lo que representa un aumento de 177 km, como se muestra en la Tabla 10. Este crecimiento en la conectividad terrestre sugiere una intensificación del acceso humano y, potencialmente, una mayor presión sobre la cobertura vegetal.

Tabla 10

Kilómetros de vías construidos para los años 2017 y 2022.

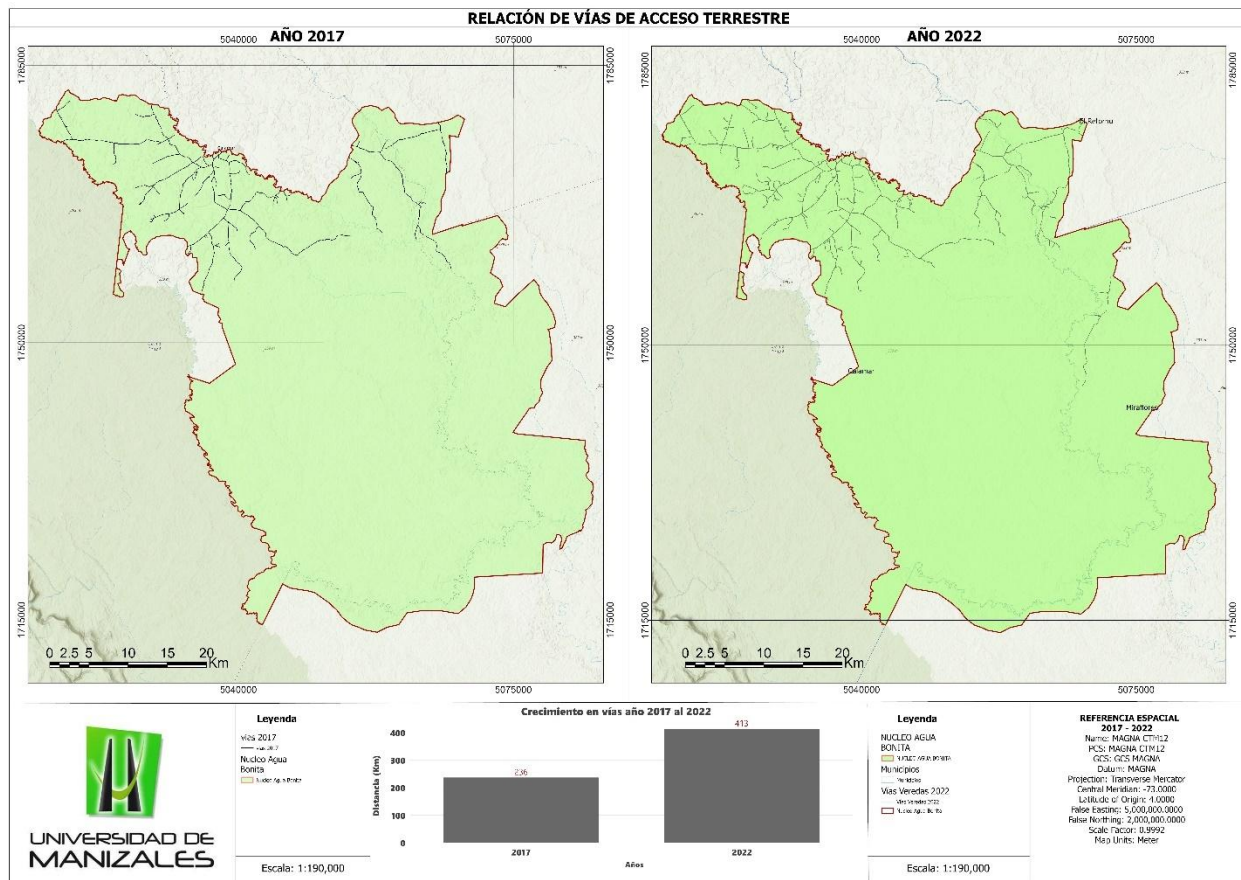
2017	2022
236 km	413 km

6.3.2 *Cambios en el Área de Influencia de Acceso Terrestre*

Para analizar la influencia de los accesos terrestres sobre los cambios en la cobertura del suelo en el NDFAB, se generaron mapas temáticos a partir de imágenes clasificadas para los años 2017 y 2022, los cuales se muestran en la Figura 6. A partir de estos mapas, se delimitaron áreas de influencia de 800 metros en torno a las principales vías, con el fin de extraer y comparar las coberturas predominantes.

Figura 6

Cambios en la infraestructura vial en el NDFAB entre 2017 y 2022.

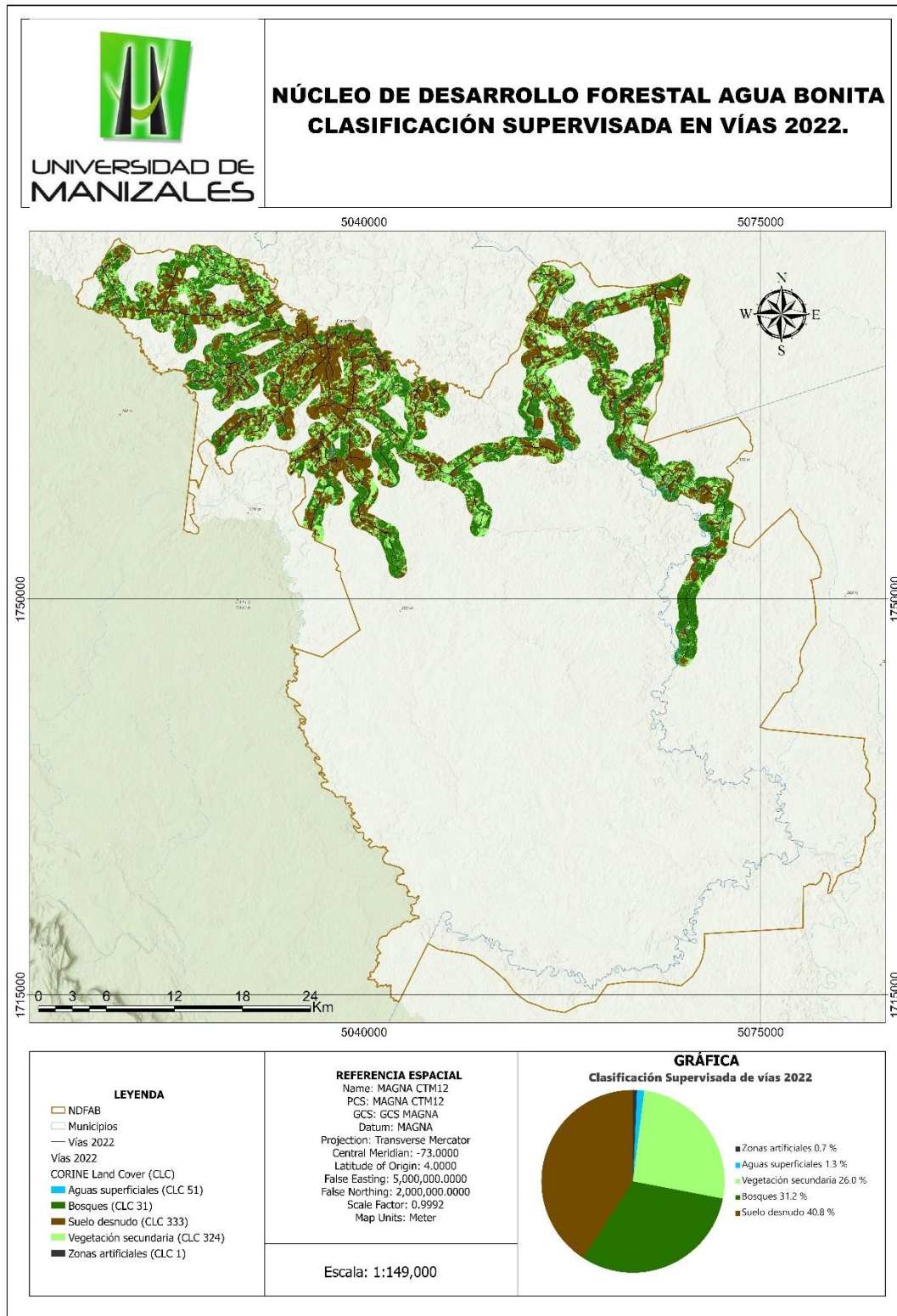


El análisis comparativo de los mapas de cobertura terrestre para 2017 y 2022 (Figura 7 y Figura 8) muestran una reducción notable de áreas cubiertas por bosque en las zonas de influencia vial, especialmente alrededor de las vías recientemente construidas. Así mismo, se observa una expansión de la vegetación secundaria en áreas previamente dominadas por cobertura boscosa, lo que indica un proceso activo de transformación del paisaje.

Por otro lado, las zonas clasificadas como suelo desnudo disminuyeron en varios sectores, lo que refuerza la hipótesis de una transición hacia coberturas vegetales secundarias o usos productivos.

Figura 8

Clasificación supervisada en vías para el año 2022.



Los resultados del análisis multitemporal muestran que en las zonas con acceso terrestre se presentó una pérdida significativa de cobertura boscosa, que disminuyó un 22,26 % por kilómetro de vía entre 2017 y 2022. La vegetación secundaria mostró un leve aumento del 4,66 %, mientras que el suelo desnudo presentó una reducción del 4,89 % por kilómetro, lo cual sugiere un proceso de transición hacia otros usos del suelo o regeneración natural. Los resultados se presentan en la Tabla 11:

Tabla 11

Cambio en coberturas en área de influencia de tipo de acceso terrestre.

Tipo de cobertura	Área 2017 (ha)	Área 2022 (ha)	Área 2017 (ha/km)	Área 2022 (ha/km)	Cambio (%)
Cobertura Boscosa	11.619	15.801	49,23	38,27	-22,26 %
Vegetación Secundaria	7.195	13.200	30,48	31,97	+4,66 %
Suelo Desnudo	13.032	21.681	55,22	52,50	-4,89 %

6.3.3 Cambios en el Área de Influencia de Acceso Fluvial

El análisis de las imágenes correspondientes a las áreas de acceso fluvial, mostradas en la Figura 9 y la Figura 10, muestra que la pérdida de cobertura boscosa es menos agresiva que en las zonas viales, manteniéndose en franjas más continuas y densas. Sin embargo, se identifican manchas dispersas de suelo desnudo y vegetación secundaria, concentradas principalmente en puntos cercanos a los cauces principales. Estas variaciones pueden estar asociadas con actividades de ocupación temporal o explotación puntual de recursos naturales. En comparación con el acceso terrestre, la intervención sobre el paisaje fluvial se presenta de manera más fragmentada y menos extensiva.

Los resultados, presentados en la Tabla 12, indican una reducción de la cobertura boscosa del 6,35 %, lo que refleja una presión menor en comparación con las áreas viales. No obstante, se evidencia un incremento significativo en la vegetación secundaria (+18,67 %) y en las zonas de suelo desnudo (+26,15 %). Este patrón sugiere que el acceso fluvial favorece procesos de ocupación dispersa y actividades extractivas puntuales a lo largo de los ríos, lo que impacta la dinámica de uso del suelo en estos entornos.

Tabla 12

Cambio en coberturas en área de influencia de tipo de acceso fluvial.

Tipo de cobertura	Área 2017 (ha)	Área 2022 (ha)	Cambio (ha)	Cambio (%)
Cobertura Boscosa	119.473	111.882	-7.591	-6,35 %
Vegetación Secundaria	16.929	20.090	+3.161	+18,67 %
Suelo Desnudo	16.967	21.404	+4.437	+26,15 %

6.3.4 Comparación de cambios según el tipo de acceso

La Tabla 13 presenta una síntesis comparativa de los cambios porcentuales en la cobertura del suelo, evidenciando que el tipo de acceso tiene una influencia diferenciada sobre la dinámica de transformación del paisaje.

Tabla 13

Cambios de tipo de cobertura según el tipo de acceso.

Tipo de cobertura	Cambio % en zona vial (por km)	Cambio % en zona fluvial
Cobertura Boscosa	-22,26 %	-6,35 %
Vegetación Secundaria	+4,66 %	+18,67 %
Suelo Desnudo	-4,89 %	+26,15 %

Estos resultados permiten concluir que las zonas con acceso terrestre presentan una mayor pérdida relativa de cobertura boscosa, posiblemente debido a una expansión más agresiva de actividades agrícolas, pecuarias o de asentamientos. Por otro lado, aunque el acceso fluvial muestra menor deforestación directa, sí evidencia un aumento considerable de suelo desnudo y vegetación secundaria, lo cual puede indicar procesos de intervención más dispersa, menos extensiva pero aún significativos en términos de impacto ambiental.

La disminución del suelo desnudo en zonas terrestres podría explicarse por dos fenómenos: transformación hacia coberturas antrópicas estables como pastos o cultivos, o procesos de regeneración natural que llevaron a la reclasificación de estas áreas como vegetación secundaria en 2022.

6.3.5 Comparación entre infraestructura vial y deforestación por vereda (2017-2022)

El análisis espacial realizado mediante la herramienta *Intersect* permitió calcular la longitud total de vías terrestres por vereda para los años 2017 y 2022 en el NDFAB como se muestra en la Figura 11 y Figura 12. Los resultados evidencian un crecimiento significativo de la infraestructura vial en la mayoría de las veredas durante el periodo de estudio.

Figura 11

Relación de vías de acceso terrestre por veredas (2017-2022).

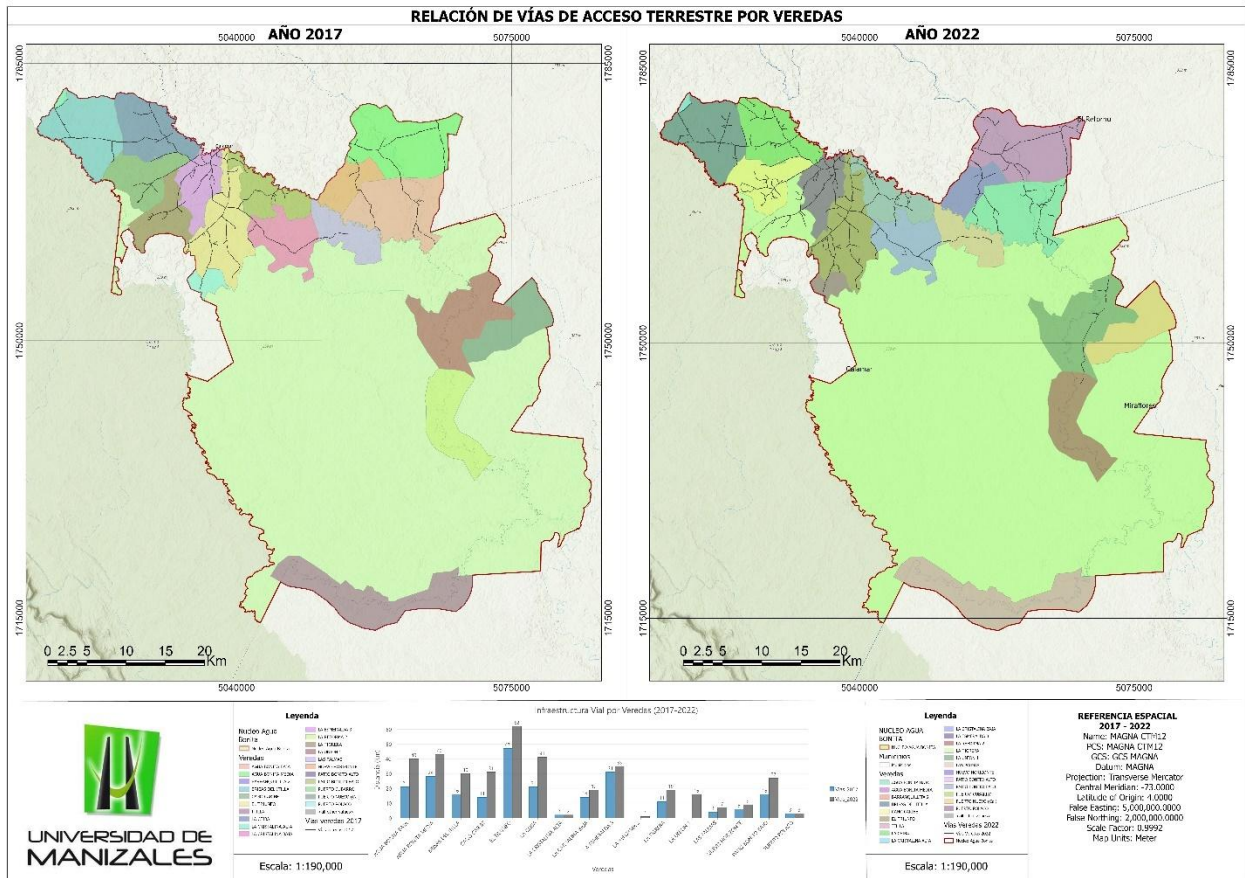
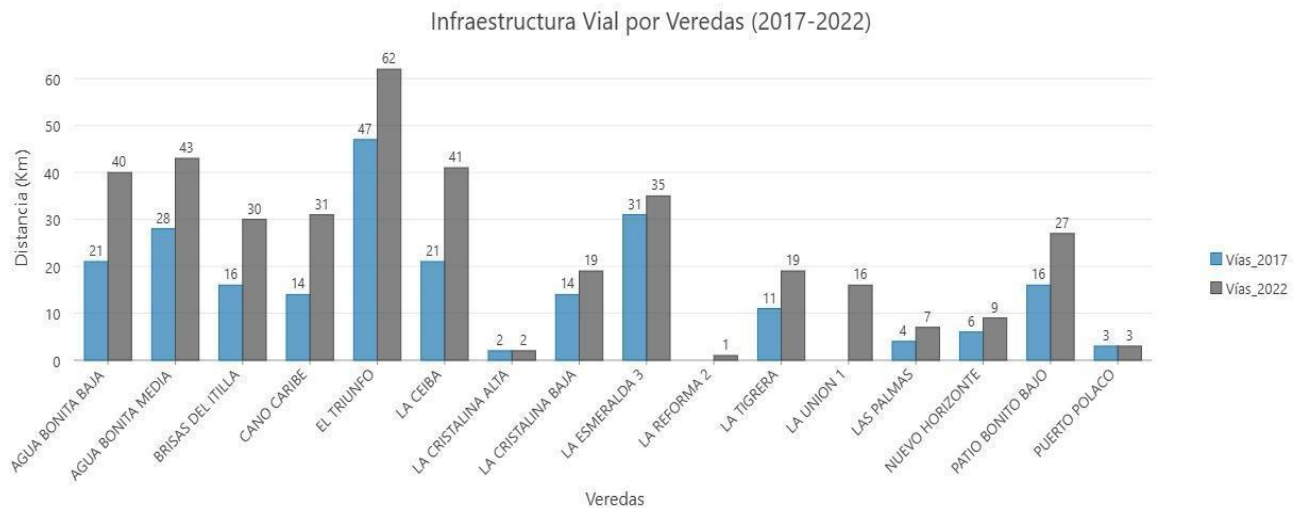


Figura 12

Infraestructura vial por veredas (2017-2022).



Las veredas que registraron el mayor aumento en longitud vial fueron:

- El Triunfo: de 47 km en 2017 a 62 km en 2022 (+15 km)
- Agua Bonita Baja: de 21 km a 40 km (+19 km)
- La Ceiba: de 21 km a 41 km (+20 km)
- Agua Bonita Media: de 28 km a 43 km (+15 km)
- La Unión 1: de 11 km a 19 km (+8 km)

Al comparar esta información con los datos de pérdida de bosque por vereda (Tabla 9), se observa una relación directa en varias zonas. Por ejemplo:

- Agua Bonita Media, que tuvo un incremento vial de 15 km, presentó la mayor pérdida absoluta de bosque (2.299,45 ha) y una pérdida porcentual del 37,11 %.
- Brisas del Itilla, con un aumento de 14 km de vías (de 16 km a 30 km), reportó la segunda mayor pérdida absoluta de bosque (1.527,98 ha) y una pérdida porcentual del 32,47 %.
- Agua Bonita Baja, que duplicó su infraestructura vial (de 21 km a 40 km), registró una pérdida de 1.408,65 ha de bosque (25,91 %).
- La Ceiba, con 20 km adicionales de vías, también mostró una pérdida considerable de 730,21 ha de bosque (27,7 %).

Asimismo, veredas como Nuevo Horizonte y Puerto Polaco presentaron pérdidas significativas de cobertura boscosa pese a tener menor infraestructura vial. Por ejemplo, Puerto Polaco mantuvo una red vial reducida (3 km en ambos años), pero tuvo la pérdida porcentual más alta (49,58 %), lo que indica que en algunos casos otros factores como el acceso fluvial o dinámicas socioeconómicas locales también pueden incidir fuertemente en la deforestación.

En contraste, veredas como La Reforma 2 y Patio Bonito Bajo, con niveles bajos o estables de infraestructura vial y sin incrementos sustanciales entre 2017 y 2022, presentaron pérdidas de bosque mínimas, con solo 49,69 ha (1,06 %) y 24,36 ha (1,50 %) respectivamente.

Esta comparación resalta la posible influencia del aumento de accesibilidad terrestre sobre la transformación del uso del suelo, especialmente en aquellas veredas donde la infraestructura vial ha tenido un crecimiento acelerado.

6.4 Comparación de cambios según actividad socioeconómica

Los resultados del análisis multitemporal, integrados con los datos de vocación de uso de suelo y actividades agroecológicas permiten evidenciar una correlación entre patrones de deforestación y actividades económicas predominantes en la zona.

Los datos procesados en ArcGIS Pro evidenciaron que el uso principal del suelo en el NDFAB se concentra en cinco clases de actividades agroecológicas: agrosilvícola con cultivos permanentes, silvopastoril, protección-producción, forestal de protección y zonas urbanas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2021), las cuales fueron definidas oficialmente en la Resolución 261 de 2018 (Tabla 14). La mayor área fue destinada a actividades agrosilvícolas con cultivos permanentes (143.138,6154 ha), seguidas por actividades de protección (62.619,87 ha), y uso silvopastoril (39.201,59 ha) (Figura 13). Estas cifras reflejan un avance significativo de las fronteras agropecuarias sobre los bosques primarios.

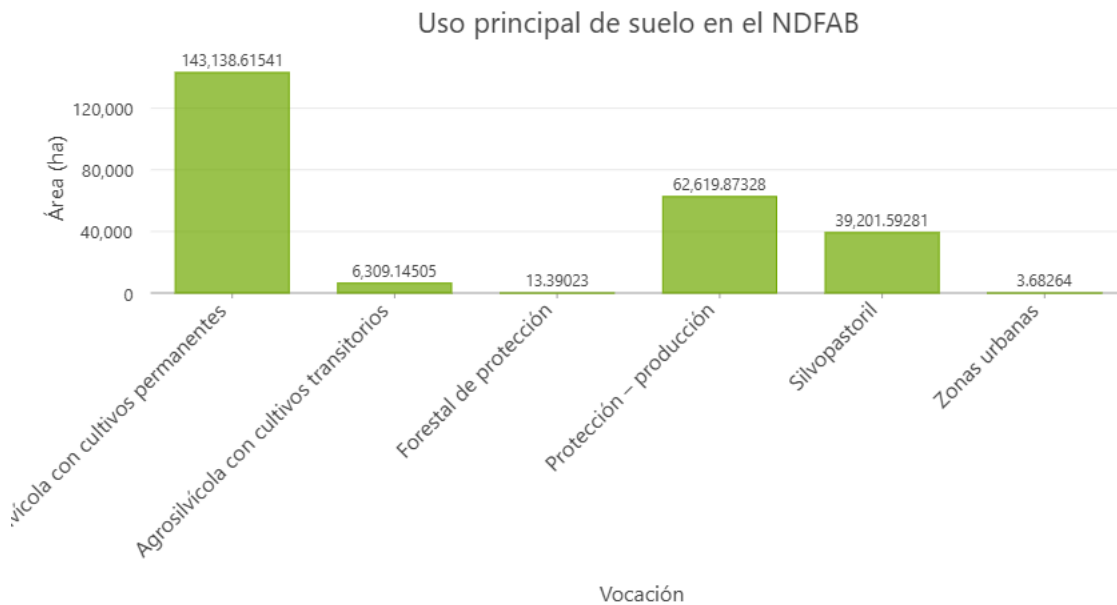
Tabla 14

Clases de uso principal de suelo en el NDFAB.

Clase (Uso del suelo)	Área (ha)	Descripción normativa o funcional
Agrosilvícola con cultivos permanentes	143.138,61541	Sistema agroecológico que integra árboles y cultivos de largo plazo, promoviendo la diversificación productiva y la conservación del suelo.
Agrosilvícola con cultivos transitorios	6.309,14505	Uso agrícola mixto donde se combinan árboles con cultivos de ciclo corto, de carácter transitorio, que requieren rotación frecuente y técnicas de conservación.
Forestal de protección	13,39023	Áreas destinadas a la protección de recursos naturales, como cuerpos de agua o pendientes fuertes; no tienen fines productivos directos, sino ecológicos.
Protección – producción	62.619,87328	Suelos que permiten actividades productivas
Silvopastoril	39.201,5928	Sistema que combina árboles, ganado y pasturas en la misma unidad, permitiendo la regeneración forestal y el manejo sostenible de la ganadería.
Zonas urbanas	3,68264	Áreas construidas, destinadas a infraestructura urbana o rural, sin aprovechamiento agroecológico o forestal relevante.

Figura 13

Uso principal de suelo con información recolectada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) hasta el año 2020 en el NDFAB.

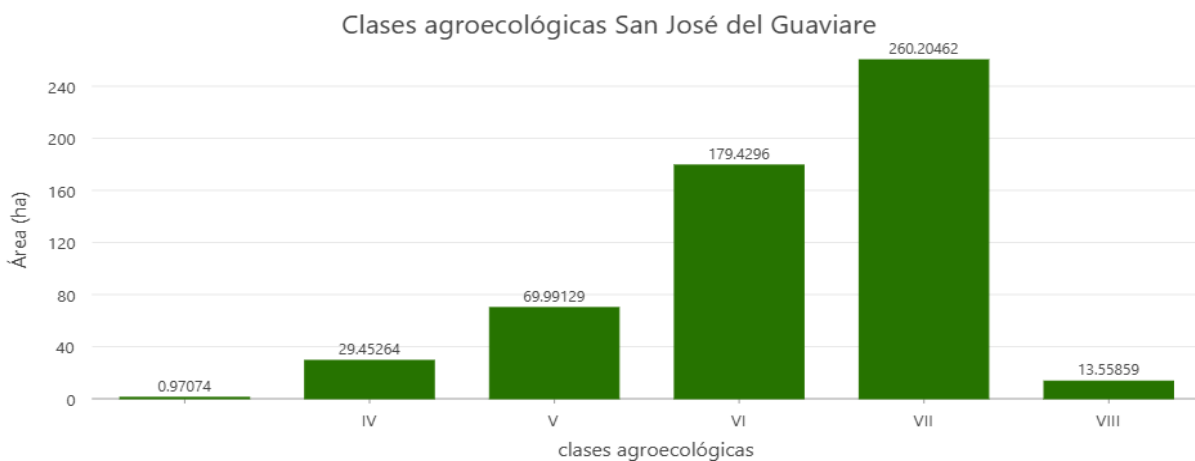


6.4.1 Clases de actividades agroecológicas identificadas

Conforme al análisis espacial, las clases agroecológicas encontradas en el área de San José del Guaviare se sintetizan en la Figura 14.

Figura 14

Clases agroecológicas según condición del suelo en el área de San José del Guaviare.



- Clase IV – Área: 0,9707 ha

Los suelos clase IV presentan limitaciones moderadas para la agricultura y deben destinarse preferentemente a cultivos permanentes con manejo técnico. Su baja representación en el área total indica una disponibilidad limitada de suelos agrícolas. Según la Ley 2ª de 1959, este tipo de suelo podría aprovecharse de manera agroforestal, siempre y cuando se respeten los principios de conservación.

- Clase V – Área: 29,4526 ha

Estos suelos son generalmente inapropiados para agricultura mecanizada, pero viables para uso forestal, silvopastoril o de conservación. La extensión intermedia de esta clase en el área total sugiere una presión por usos agropecuarios. El Ministerio del Medio Ambiente, para el año 2018, establece que estas tierras deben mantenerse bajo cobertura vegetal y ser aprovechadas bajo modelos sostenibles como la agroforestería o reforestación comercial.

- Clase VI – Área: 179,4296 ha

Corresponde a suelos con limitaciones severas para agricultura, pendientes pronunciadas y susceptibilidad a la erosión. La elevada proporción de esta clase en el NDFAB es alarmante, ya que evidencia que una gran parte del territorio está siendo utilizada de manera inadecuada. El artículo 1 de la Ley 2ª de 1959 establece que tales suelos deben declararse de uso forestal exclusivo, lo que en este contexto implica que su actual utilización para ganadería extensiva o cultivos pone en riesgo la integridad ecológica del área (IGAC, 2021).

- Clase VII – Área: 260,2046 ha

Es la clase de mayor área y dominancia. Estos suelos presentan restricciones para cualquier tipo de uso agropecuario y deberían ser destinados exclusivamente a conservación, protección de cuencas hídricas y reforestación. El uso actual de estos suelos en actividades productivas representa una clara contradicción con el mandato legal de la Ley 2ª de 1959, lo cual refuerza la urgencia de implementar mecanismos de vigilancia, recuperación ecológica y ordenamiento ambiental (IGAC, 2021).

- Clase VIII – Área: 13,5586 ha

Suelos con uso exclusivo para conservación. No deben ser sometidos a ningún tipo de intervención productiva. Su ocupación indica una posible afectación grave a zonas de alta fragilidad ambiental. Se debería considerar su reforestación obligatoria y declaración como reserva forestal estricta (IGAC, 2021).

Posterior al análisis general sobre las dinámicas de deforestación y los usos del suelo en el municipio de San José del Guaviare, se enfoca en el NDFAB, donde se identificaron diversas clases de uso del suelo con características agroecológica en las que se identifica especial prevalencia en las zonas con limitaciones severas de agricultura y conservación. Las clases agroecológicas identificadas en el NDFAB se muestran en la Figura 15, información que se sintetiza en la Figura 16.

Figura 15

Clases agroecológicas identificadas en el NDFAB.

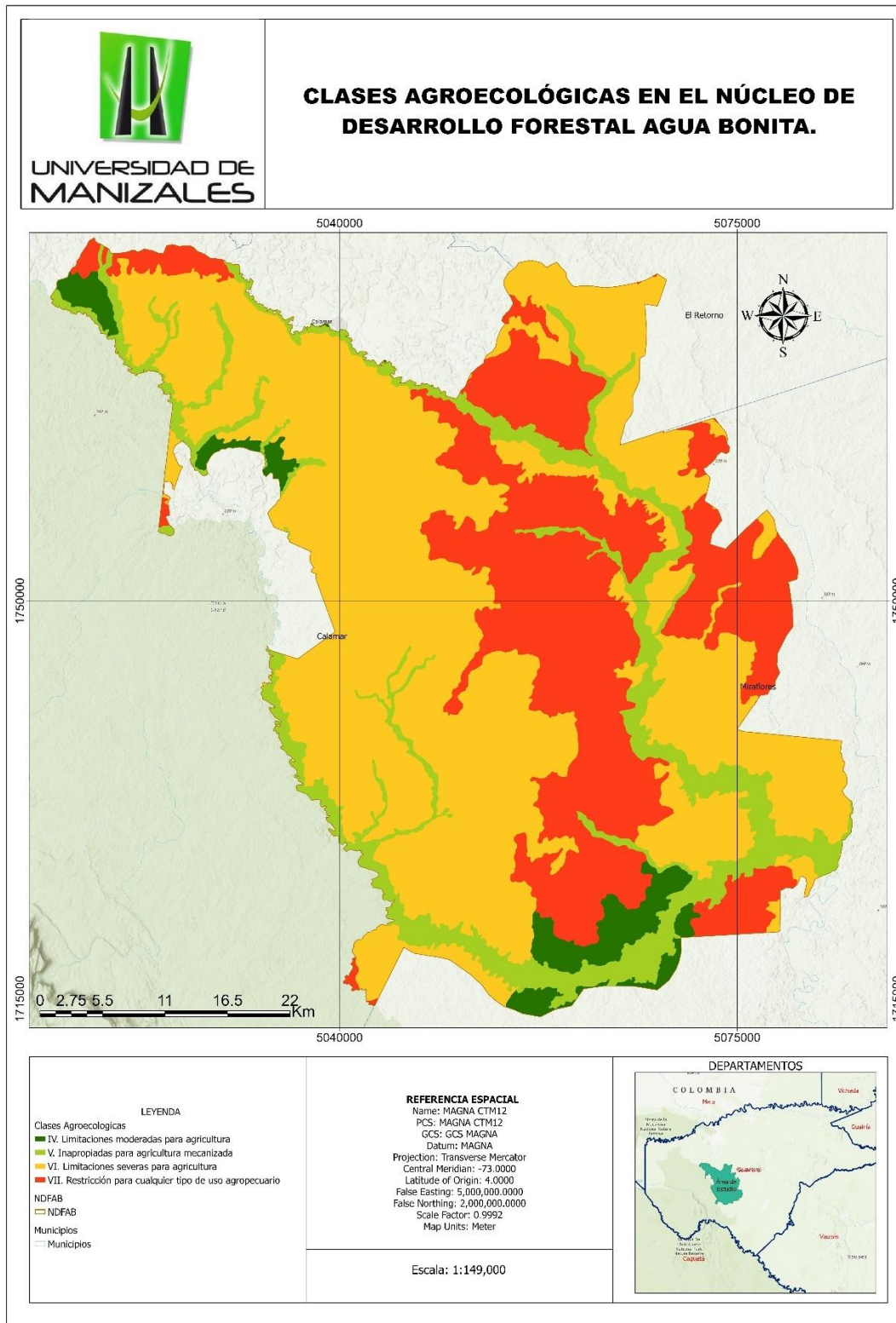
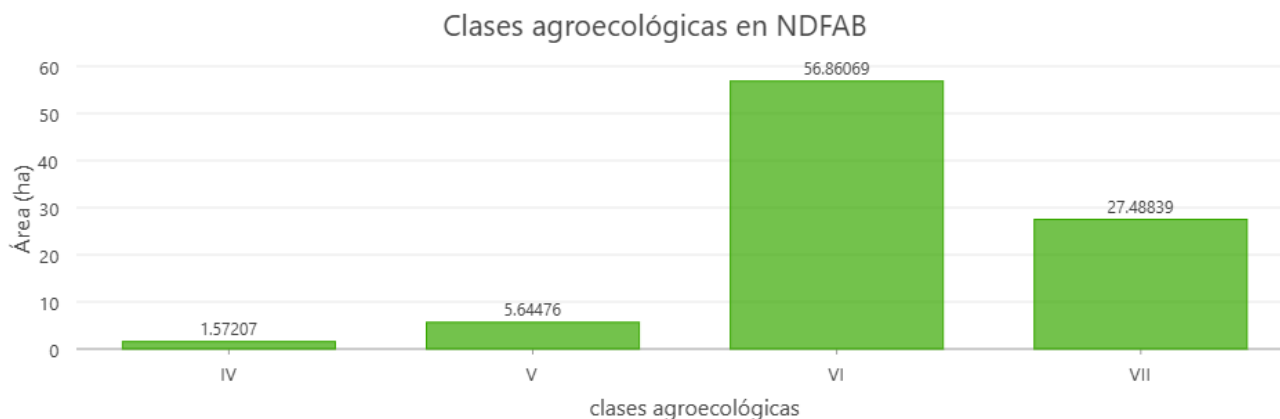


Figura 16

Clases agroecológicas según la condición del suelo en el NDFAB.



Posteriormente se representa la distribución espacial de las diferentes clases agroecológicas dentro del área de estudio. Este análisis clasifica el territorio según su idoneidad para actividades agropecuarias, utilizando las categorías establecidas por el sistema de clases agroecológicas sacados por la plataforma Forland: desde terrenos con limitaciones moderadas para la agricultura (clase IV), hasta aquellos con restricciones severas o inapropiados para cualquier tipo de uso agropecuario (clases VI y VII). La cartografía evidencia la heterogeneidad del territorio, lo que permite orientar la planificación del uso del suelo y la toma de decisiones frente a su aprovechamiento sostenible.

Dándole continuidad a la representación geográfica, la gráfica de barras cuantifica las áreas correspondientes a cada clase agroecológica identificada en el mapa. Esta representación estadística resalta que la mayor proporción del NDFAB está conformada por terrenos clasificados como clase VI - limitaciones severas para la agricultura, seguidos por las áreas de clase VII, que presentan restricciones para cualquier tipo de uso agropecuario. En contraste, las clases IV y V abarcan superficies significativamente menores. Esta distribución refleja la realidad agroecológica del territorio y refuerza la importancia de considerar sus limitaciones en la planificación territorial y productiva.

- Clase IV – Área: 1,5721 ha

La clase IV representa suelos con limitaciones moderadas para agricultura mecanizada, que requieren manejo cuidadoso, conservación de cobertura vegetal y prácticas sostenibles. Aunque

esta clase tiene una participación mínima, su existencia indica que hay pequeñas franjas del territorio donde podrían desarrollarse actividades agropecuarias de bajo impacto, preferiblemente sistemas agroforestales mixtos. La Ley 2.^a de 1959 permitiría su aprovechamiento condicionado, siempre que no afecte la función ecológica del entorno (IGAC, 2021).

- Clase V – Área: 5,6448 ha

Suelos con severas limitaciones para agricultura mecanizada. Son aptos principalmente para silvopastoreo controlado, conservación forestal o restauración ecológica asistida. El artículo 1° de la Ley 2^a de 1959 sugiere que estos suelos deben tratarse como parte del patrimonio forestal nacional. Aunque ocupan un área intermedia, no se recomienda su transformación agrícola intensiva en ninguna circunstancia. Su mal manejo puede generar erosión y pérdida de fertilidad (IGAC, 2021).

- Clase VI – Área: 56,8607 ha

Es la clase con mayor presencia en este análisis. Se trata de suelos con limitaciones muy fuertes para la agricultura y alta vulnerabilidad a procesos erosivos. Están destinados exclusivamente al uso forestal y a la conservación, de acuerdo con la normativa vigente. Su aprovechamiento en actividades productivas (como pastoreo extensivo o cultivos permanentes) constituirá una infracción directa a la Ley 2^a de 1959, comprometiendo la integridad ecológica de la zona. La magnitud del área sugiere una intervención humana significativa, lo que indica la necesidad urgente de restauración ecológica (IGAC, 2021).

- Clase VII – Área: 27,488386 ha

Esta clase representa suelos que no deberían tener ningún tipo de intervención agropecuaria. Según la ley, estos deben destinarse a la protección de cuencas, recuperación de coberturas vegetales y reforestación con especies nativas. La ocupación de esta clase con actividades económicas contrarias al uso de conservación genera daños irreversibles en la funcionalidad ambiental del territorio. Es imperativo que esta clase sea incluida dentro de figuras de protección ambiental o reservas forestales comunitarias (IGAC, 2021).

Los suelos con restricciones severas (clases VI y VII) dominan el paisaje, mientras que los suelos con posible uso agrícola (clase V) son escasos. La legislación vigente (Ley 2.^a de 1959) exige que estos suelos se conserven con vocación forestal exclusiva, prohibiendo el uso agropecuario intensivo.

En la Tabla 15 se presenta un análisis comparativo de las clases de suelos de uso agrícola entre el área total y el área del NDFAB.

Tabla 15

Análisis comparativo de área total y núcleo de desarrollo sobre clasificación de uso agrícola.

Clase	Área total (ha)	Área núcleo (ha)	Análisis comparativo
IV	0,9707	1,5721	Aunque sigue siendo mínima, el área específica muestra una leve presencia mayor. Ambos valores indican que este suelo es muy escaso en el NDF y, por tanto, poco apto para la agricultura.
V	29,4526	5,6448	Disminuye significativamente en la zona específica. Su uso debería restringirse a sistemas agroforestales o silvopastoriles técnicamente manejados.
VI	179,4296	56,807	Es la clase dominante en ambas escalas. Estos suelos deben destinarse exclusivamente a uso forestal según la Ley 2. ^a de 1959. Su alta proporción en ambas áreas es crítica.
VII	179,4296	27,488386	Aunque su área es menor en el análisis local, sigue representando una proporción significativa. Esta clase no debe tener ningún uso productivo.
VIII	13,5586	<i>No presente</i>	Exclusiva para conservación. Su ausencia en la zona específica puede deberse a criterios de selección espacial o a su localización en zonas marginales.

7 Discusión

Un hallazgo significativo en el análisis multitemporal realizado fue la disminución del área clasificada como zonas artificiales (vías) entre el año 2017 y 2022, que pasó de tener un área de 514,46 hectáreas a 412,62 hectáreas, lo cual representa una disminución del 19,79%. Este resultado, se debe a la similitud espectral entre las superficies artificiales y otras coberturas como el suelo desnudo. Esta similitud puede ocasionar que las firmas espectrales sean similares, especialmente en zonas con condiciones atmosféricas variables. Según Jensen (2005) y Chuvieco (2020), este fenómeno de confusión entre coberturas con características espectrales similares es común; señalando que puede haber una alta probabilidad de confusión espectral si no se usan las suficientes muestras de entrenamiento y que las clases como vías, áreas de construcción sin vegetación o suelo desnudo tienen a solaparse en los índices de reflectancia del visible e NIR.

En este sentido, es probable que estas áreas hayan sido reclasificadas como la clase de suelo desnudo para el periodo 2022, debido a su firma espectral similar. Sin embargo, esta situación no compromete la validez del análisis multitemporal de deforestación, ya que la clasificación de la cobertura de bosque, insumo principal para calcular la pérdida de bosque en el NDFAB, tiene una diferencia espectral, como se evidencia en la precisión de los resultados obtenidos. Por tanto, aunque se presentan limitaciones en la clasificación con firmas espectrales similares, esto no representa una afectación significativa en los objetivos del estudio, ya que no compromete la precisión del análisis de la cobertura boscosa.

Adicionalmente, en este estudio, además de la clasificación supervisada, se realizó una digitalización manual de las vías a partir de las imágenes satelitales de resolución espacial 3,8m, contando con un insumo geográfico más preciso para el análisis de la infraestructura vial en la dinámica del cambio de la cobertura. La inclusión de áreas artificiales en el proceso de clasificación tuvo como objetivo evitar que quedaran áreas sin clasificar o sin información, pero no constituye el único insumo para el análisis.

De manera paralela, se observó un aumento del área clasificada como aguas superficiales, la cual pasó de 2.523,16 hectáreas en 2017 a 3.631,78 en 2022 (un aumento del 44%), este incremento no responde necesariamente a una expansión natural de los cuerpos de agua, por el contrario, puede estar influenciado por factores como la transformación de áreas boscosas en

reservorios o pozos artificiales o las condiciones hidrológicas temporales en el momento de la captura satelital.

Este fenómeno ha sido señalado en estudios como los de González et al. (2018), donde en las áreas recientemente deforestadas en regiones de la amazonia, como el área de estudio, en las que se desarrollan prácticas de conversión de uso del suelo a actividades ganaderas, es común la construcción de pozos artificiales o pozos reservorios para el almacenamiento de agua, que pueden ser captados como cuerpos de agua pequeños, estos pozos reservorios pueden tener un área entre 400 y 2.500 m² (0,04 a 0,25 ha), estas áreas dentro de zonas extensas de transformación del paisaje, puede generar un aumento notable de su densidad, lo que favorece la formación de espejos de agua, así mismo, las lluvias recientes en la fecha de la captura de la imagen satelital del periodo 2022 pudieron contribuir a una mayor presencia de agua superficial, lo que puede representar un aumento en la clasificación de aguas superficiales para el año 2022, estos cambios, de acuerdo Jensen (2005), pueden presentar también firmas espectrales similares a las de los cuerpos de agua naturales, lo que explica su aparición en la clasificación supervisada para la clase aguas superficiales.

La pérdida de bosque observada en el proceso de clasificación supervisada responde a la tendencia documentada en la amazonia Colombia, asociada a la expansión de la frontera agrícola, la ganadería extensiva y la apertura de vías ilegales, Según Álvarez et al. (2018), en los departamentos amazónicos colombianos la deforestación ocurre principalmente por la ocupación de tierras para pastos, seguida por la construcción de infraestructura básica y actividades extractivas, legales o ilegales. Esta dinámica resulta en una transformación del paisaje en mosaicos agropecuarios con baja cobertura boscosa, fragmentación del hábitat y pérdida de servicios ecosistémicos.

En paralelo a esta pérdida de bosque primario, se evidenció un aumento de la cobertura clasificada como vegetación secundaria, lo cual se relaciona con procesos de regeneración natural temprana en áreas previamente deforestadas y abandonadas, Martínez Arias (2021) señala que este proceso de regeneración de los bosques en la estructura espacial, la conectividad y la composición sucesional permite la preparación del terreno y conectividad de nuevo con el bosque, sin embargo su presencia no implica una recuperación completa del ecosistema, así mismo refleja una tendencia en el NDFAB de uso cíclico y transitorio, en el que se realiza un uso intensivo del área y luego un abandono, generando parches de regeneración.

Los resultados del análisis multitemporal evidencian que la transformación de la cobertura vegetal en el NDFAB varía significativamente según el tipo de acceso (terrestre o fluvial), reflejando una estrecha relación entre la infraestructura y la presión sobre los ecosistemas. La expansión de la red vial que creció un 75 % entre 2017 y 2022 se asocia con una pérdida relativa de cobertura boscosa notablemente mayor (-22,26 % por km), en comparación con las zonas influenciadas por drenajes fluviales (-6,35 %).

Este patrón puede explicarse por múltiples factores interrelacionados:

Desde el punto de vista territorial, la expansión vial mejora la conectividad física del paisaje, facilitando el ingreso de personas, insumos y maquinaria. Esto habilita la apertura de nuevos frentes agrícolas y ganaderos, así como parcelaciones sin ordenamiento adecuado, lo que intensifica la fragmentación del bosque. Según Armenteras & Rodríguez Eraso (2014), la construcción de carreteras en áreas con ecosistemas sensibles incrementa exponencialmente la deforestación, actuando como un factor desencadenante del cambio de uso del suelo.

En contraste, el acceso fluvial, aunque menos agresivo, también evidencia presiones sobre el paisaje. El incremento de vegetación secundaria (+18,67 %) y suelo desnudo (+26,15 %) sugiere procesos de ocupación dispersa y prácticas extractivas puntuales a lo largo de los cauces. Estas dinámicas, aunque menos intensivas, pueden representar una forma de transformación más progresiva, común en territorios de baja densidad de población y débil presencia institucional. Como señala Rorato et al. (2021), las vías fluviales pueden facilitar el acceso a áreas remotas, promoviendo la extracción de recursos con menor intensidad, pero con impactos acumulativos significativos sobre la biodiversidad.

Desde la perspectiva social, el desarrollo de infraestructura vial responde a intereses locales y externos que promueven la expansión de la frontera agropecuaria, incluyendo actividades informales o ilegales. Esta conectividad estimula la migración interna, la ocupación sin titulación de tierras y la transformación acelerada del bosque. En zonas fluviales, las transformaciones obedecen a lógicas de subsistencia, con menor escala e intensidad, pero igualmente con potencial de degradación si no se gestionan de forma adecuada.

A nivel institucional, el avance no planificado de la infraestructura vial refleja vacíos de gobernanza territorial. Muchas de las vías detectadas no cuentan con autorización ni seguimiento, lo cual evidencia la débil implementación del ordenamiento ambiental del territorio. La falta de herramientas de planificación participativa y control efectivo ha permitido que las

transformaciones avancen sin una respuesta oportuna. De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (2021), la ausencia de regulación territorial efectiva ha generado zonas de expansión sin criterios de sostenibilidad, donde la deforestación se acelera ante la falta de mecanismos de control.

Adicionalmente, al analizar la distribución espacial del crecimiento vial por vereda, se observa una relación directa entre el incremento de infraestructura terrestre y los niveles de deforestación. Veredas como Agua Bonita Media, Brisas del Itilla y Agua Bonita Baja no solo registraron los mayores aumentos en kilómetros de vías (entre 14 y 19 km adicionales), sino también las mayores pérdidas de bosque, superando las 1.400 hectáreas en todos los casos y alcanzando porcentajes de pérdida del 25 % al 37 %. Este patrón evidencia cómo el acceso terrestre actúa como facilitador directo de la transformación del paisaje, habilitando el avance de la frontera agrícola y la apropiación informal del territorio.

El caso de El Triunfo refuerza esta tendencia: con la red vial más extensa del núcleo (62 km en 2022) y un crecimiento de 15 km en cinco años, presenta también una pérdida de bosque significativa (378,59 ha), aunque menor en términos relativos. Por el contrario, veredas como La Reforma 2 y Patio Bonito Bajo, con poco crecimiento vial y sin cambios marcados en su infraestructura, muestran niveles de deforestación mínimos (por debajo del 2 %), lo que sugiere que la accesibilidad terrestre es un factor clave en la intensificación de la presión sobre el bosque.

Sin embargo, se identifican excepciones que ponen en evidencia la influencia de otras variables. El caso de Puerto Polaco, con solo 3 km de vías y sin incremento vial entre periodos, presentó la mayor pérdida relativa de cobertura boscosa (49,58 %). Esta anomalía sugiere que otras formas de acceso, como la fluvial, así como factores socioeconómicos específicos o actividades extractivas ilegales, pueden explicar procesos de deforestación en contextos con baja conectividad terrestre.

En conjunto, los resultados muestran que el tipo de acceso no solo condiciona la magnitud del cambio, sino también la lógica territorial detrás de la transformación del paisaje. Comprender estas dinámicas resulta clave para orientar estrategias de manejo diferenciado y conservación efectiva, considerando tanto los factores de accesibilidad como las condiciones sociales e institucionales que los rodean.

Los resultados obtenidos a través del análisis multitemporal de coberturas, combinados con la evaluación de la vocación y uso del suelo, revelan una presión creciente sobre los recursos

naturales. Esta presión está directamente asociada con patrones de deforestación que responden a dinámicas económicas, sociales y territoriales impulsadas por la expansión de la frontera agropecuaria (Resolución 261, 2018).

Estos hallazgos permiten visibilizar contradicciones estructurales entre el marco legal de protección, establecido principalmente por la Ley 2ª de 1959, y las formas actuales de ocupación del suelo, las cuales no solo generan impactos ambientales severos, sino que también perpetúan conflictos socioambientales y vulnerabilidad ecológica (IGAC, 2021).

Uno de los hallazgos más relevantes es la fuerte discrepancia entre la vocación natural del suelo y el uso efectivo que se le está dando en el territorio. A pesar de que los análisis muestran que una gran proporción del suelo posee vocación forestal o agroforestal, el uso predominante identificado corresponde a prácticas como ganadería extensiva, agro-silvicultura intensiva y cultivos permanentes. Este uso no se ajusta al régimen legal que rige sobre los suelos de reserva forestal, que según el artículo 1º de la Ley 2ª de 1959, deben estar orientados prioritariamente a actividades forestales de conservación o manejo racional (IGAC, 2021).

Los dos gráficos analizados revelan un patrón consistente: predominancia de las clases VI y VII, que representan suelos con fuertes o muy fuertes limitaciones para uso agropecuario. En el análisis del área total del núcleo, la clase VII abarca más de 260 ha y la clase VI más de 170 ha. En la zona específica muestreada, la clase VI vuelve a predominar con más de 50 ha², mientras que la clase VII se mantiene presente, aunque en menor proporción.

Estas clases, de acuerdo con el IGAC y la Ley 2ª de 1959, deben destinarse exclusivamente a conservación, regulación hídrica y reforestación. La presencia de actividades productivas en estos suelos contraviene no sólo las disposiciones legales, sino también los principios básicos de sostenibilidad del territorio. Además, el uso inapropiado de suelos en estas clases puede acelerar procesos de erosión, pérdida de fertilidad, fragmentación de hábitats y degradación ecosistémica irreversible.

El NDFAB ha sido escenario de fuertes presiones antrópicas asociadas a la expansión de la frontera agrícola, muchas veces ilegal, impulsada por la construcción de vías, la ocupación informal del territorio y la búsqueda de tierras para actividades agropecuarias. La vía Calamar-Miraflores, como eje articulador del territorio, ha facilitado el ingreso a zonas con restricciones ambientales, promoviendo transformaciones del uso del suelo incompatibles con su vocación.

Estudios como los de USAID (2021) y González et al. (2018) señalan que, en el Guaviare, una de las principales causas de la deforestación es la apropiación ilegal de tierras, seguida de la ganadería extensiva y cultivos ilícitos. Estas dinámicas coinciden con los patrones observados en el NDFAB, lo que sugiere una tendencia regional que requiere intervención articulada entre entidades estatales, comunidades locales y actores ambientales.

La ocupación de suelos no aptos para actividades agropecuarias no solo constituye una infracción legal, sino que además genera una cascada de impactos ecológicos negativos.

El uso productivo de suelos en clases VI y VII constituyen varias afectaciones ecológicas del territorio y genera efectos que pueden comprometer incluso el bienestar de las comunidades rurales que dependen de los recursos naturales.

La comparación entre el análisis del núcleo completo y el área del núcleo revela que, a pesar de las diferencias en superficie y cobertura, el patrón estructural se mantiene: predominio absoluto de suelos con vocación forestal y de conservación. La clase VI es constante y dominante en ambos casos, lo cual refuerza la conclusión de que el territorio debe ser manejado bajo criterios ecológicos.

La ausencia de suelos clase VIII en la zona de estudio puede deberse a un sesgo espacial de selección, pero no modifica el mensaje general: el núcleo está siendo afectado, impactado, y continúa teniendo diferentes actividades antrópicas desde múltiples frentes y las actividades económicas actuales no están alineadas con la sostenibilidad ecológica ni con la legislación nacional.

8 Conclusiones

En relación con el Objetivo específico 1: Identificar las zonas con mayor deforestación en el NDFAB entre los años 2017-2022, se concluye que la disminución de zonas artificiales (vías) en la clasificación del periodo 2022 no se debe a su desaparición, sino a errores de confusión espectral del clasificador con coberturas como suelo desnudo, lo que resalta la importancia de validar los procesos de clasificación.

La pérdida de bosque no solo implica la reducción de la cobertura vegetal, sino que introduce nuevos elementos hidrológicos inducidos por acción humana, modificando las dinámicas del ecosistema local.

La disminución del bosque y el aumento de la vegetación secundaria responden a procesos interconectados: la presión antrópica elimina el bosque natural y, cuando esta disminuye, se permite la regeneración de la cobertura vegetal; sin embargo, esta dinámica no compensa la pérdida ecológica del bosque primario.

En relación con el Objetivo específico 2: Comparar la deforestación en áreas accesibles por tierra y acceso fluvial, considerando factores como la infraestructura vial, fluvial y la proximidad a centros urbanos, se encuentra que el tipo de acceso influye directamente en la intensidad y patrón de deforestación en el NDFAB. Las zonas con acceso terrestre presentaron mayores niveles de pérdida de bosque (-22,26 % por km de vía), frente a las zonas con acceso fluvial (-6,35 %), lo que confirma el papel determinante de la infraestructura vial en la transformación acelerada del paisaje

Entre 2017 y 2022, la red vial creció un 75 %, consolidándose como un factor de presión clave que facilita la colonización y apertura de nuevos frentes agrícolas, muchas veces sin planificación institucional.

Las veredas Agua Bonita Media, Brisas del Itilla y Agua Bonita Baja mostraron simultáneamente mayor expansión vial y mayor pérdida de cobertura boscosa, evidenciando la correlación directa entre ambos fenómenos.

Existen, sin embargo, excepciones como la vereda El Triunfo, que pese a presentar crecimiento vial, no registró altas tasas de deforestación. Esto indica que la infraestructura por sí sola no determina el cambio de uso del suelo, sino que intervienen factores como la vocación productiva, la presencia institucional y el modelo de ocupación.

En áreas de acceso fluvial, los patrones de transformación son más lentos, aunque presentes. El aumento de vegetación secundaria y suelo desnudo sugiere ocupación dispersa y prácticas extractivas de baja escala, que aun así requieren estrategias de manejo diferenciadas.

En relación con el Objetivo específico 3: Relacionar los patrones de deforestación con las actividades económicas de la zona, es claro que el NDFAB presenta una ocupación territorial incompatible con su vocación de uso: suelos con clases agrológicas VI y VII se destinan a actividades agropecuarias, a pesar de estar amparados por la Ley 2.^a de 1959 para conservación y uso forestal.

La expansión de la frontera agropecuaria está directamente vinculada con los patrones de deforestación y responde a factores económicos como la ganadería y los cultivos, en interacción con dinámicas de ocupación no regulada y la infraestructura vial informal.

Existe una contradicción entre el marco legal colombiano y el uso real del suelo, lo que refleja una débil capacidad de control institucional y una necesidad urgente de reforzar el seguimiento y sanción en áreas de reserva forestal.

La presión sobre suelos de baja aptitud agrícola genera impactos ecológicos severos: pérdida de biodiversidad, alteración de cuencas hídricas, fragmentación de hábitats y disminución de servicios ecosistémicos clave para las comunidades locales y la región amazónica.

8.1 Conclusión general

De manera global, los hallazgos permitieron cumplir con el objetivo general de analizar la deforestación en el Núcleo de Desarrollo Forestal Agua Bonita durante 2017-2022, evidenciando que la dinámica de pérdida de bosque está estrechamente vinculada con el crecimiento vial, los patrones de acceso y las actividades agropecuarias, lo que subraya la importancia de fortalecer la gestión territorial y ambiental en áreas de reserva forestal.

9 Recomendaciones

Fortalecer el ordenamiento territorial y ambiental, restringiendo la apertura de nuevas vías en zonas de alta sensibilidad ecológica mediante planes de uso del suelo basados en evidencia espacial.

Implementar sistemas de monitoreo satelital continuo, integrados a alertas tempranas que permitan detectar nuevas vías y cambios en la cobertura del suelo para facilitar respuestas institucionales oportunas.

Diseñar estrategias de manejo diferenciadas: control estricto en zonas con alta densidad vial, y acompañamiento social y productivo en zonas fluviales, mediante proyectos sostenibles que reduzcan la presión sobre el bosque.

Incentivar procesos de restauración ecológica en zonas con pérdida crítica de bosque por accesibilidad terrestre, integrando esquemas de pago por servicios ambientales y acuerdos comunitarios de conservación.

Fortalecer la gobernanza territorial, asegurando presencia institucional en áreas estratégicas del núcleo forestal a través de programas de titulación de tierras, vigilancia ambiental y apoyo al desarrollo rural sostenible.

10 Referencias

- Álvarez, Pérez, & Rodríguez. (2018). Deforestación, cuerpos de agua y ganadería extensiva en la Amazonia Colombiana. *Revista Geográfica Del IGAC*.
- Amaya Arias, A. M., Perry, K., & Weinthal, E. (2022). *Gobernanza ambiental para la paz en Colombia* [Universidad Externado de Colombia]. <https://publicaciones.uexternado.edu.co/gpd-gobernanza-ambiental-para-la-paz-en-colombia-9789587909470.html>
- Armenteras, D., & Rodríguez Eraso, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de latino américa: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(2), 233–146. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>
- Assunção da Silva, C. F., Oliveira de Andrade, M., Mota dos Santos, A., & Nogueira de Melo, S. (2023). Road network and deforestation of indigenous lands in the Brazilian Amazon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119.
- Barber, C., Cochrane, M., Souza Jr, C., & Laurance, W. (2014). Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, 177, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>.
- Barbosa, F. (2023). *Carreteras de doble vía: entre la deforestación y la movilidad en el Guaviare*. <https://Rutasdelconflicto.Com/Notas/Carreteras-Doble-La-Deforestacion-La-Movilidad-El-Guaviare>.
- Benavides Manrique, H. N. (2023). *Análisis multitemporal de pérdida de bosque de la región amazónica del municipio de Mapiripán en el Departamento del Meta entre los años 2015 a 2022*. <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/8f76bedb-dc62-428f-a10c-09a327123560/content>
- Bravo Morales, N. (2017). *Teledetección espacial LANDSAT, SENTINEL2, ASTER LIT y MODIS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA.
- Buriticá Silva, S. Y., & Méndez Niño, H. M. (2022). *Factores que intervienen en la deforestación, en los departamentos de Caquetá, Antioquia, Meta, Guaviare y Putumayo de 2012-2016*.
- Camacho Peña, J. F. (2022). Análisis de regresión logística aplicado al modelamiento espacial de las causas de deforestación en el departamento del Guaviare durante el periodo 2005-2020 y proyección de escenarios de deforestación a 2030. *Cuadernos de Geografía: Revista*

- Colombiana de Geografía*, 31(2), 255–280.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.98012>
- Camacho-López, C. O., Jara-Franco, N. E., & González-Rivadeneira, J. L. (2022). *Análisis multitemporal de la deforestación y cambio de la cobertura del suelo en Morona Santiago*. 7(1), 797–807. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3511>
- Cano, G. V. (2023). *La deforestación en la Amazonia colombiana tras la firma del Acuerdo de Paz, entre el Gobierno de Colombia y las FARC-EP*.
- Castaño Uribe, C. (2004). *Vías, bosques y conflicto social en Colombia*.
- Castro Venegas, V. (2021). *UMAC – Unificación de manejo ambiental de Calamar* [[Trabajo de grado, Fundación Universidad de América] Repositorio Institucional Lumieres]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8255>
- Chuquibala Castro, E. M. (2022). Análisis multitemporal de índices de deforestación en el distrito de Yambrasbamba, Amazonas, Perú. *Revista Científica UNTRM: Ciencias Naturales E Ingeniería*, 5(1), 20–28. <https://doi.org/10.25127/ucni.v4i3.803>
- Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach* (3rd ed.).
- Cole, B., Smith, G., & Balzter, H. (2018). Acceleration and fragmentation of CORINE land cover changes in the United Kingdom from 2006–2012 detected by Copernicus IMAGE2012 satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.003>
- Córdoba Ariza, P. G. (2020). *Cambios en la red trófica ligados a la pérdida del bosque de ribera en un ecosistema fluvial en la Serranía de La Lindosa (San José del Guaviare, Colombia)*.
- Cortés-Reyes, É. T., Andrés Rubio-Romero, J., & Gaitán-Duarte, H. (2010). Métodos estadísticos de evaluación de la concordancia y la reproducibilidad de pruebas diagnósticas. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 61(3), 247–255.
- Cotoa Hernández, G. J. (2020). *Análisis multitemporal de la deforestación en la Ciénaga de Ayapel mediante el procesamiento de imágenes de satelitales en el periodo 2010 – 2020* [Universidad de Córdoba]. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/9862abd5-520a-4e06-b403-17ccb2597f00>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ. (2017). *Coca y deforestación: Mensajes de acción para la planeación del desarrollo*. Programa Protección del bosque y

- clima, Programa Global de Políticas de Drogas y Desarrollo – PGPDD, Naciones Unidas Contra la Droga y el Delito UNODC e Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas. www.giz.de/en/worldwide/34700.html
- Erasso, C., & Vélez Lesmes, M. A. (2020). *¿Los cultivos de coca causan deforestación en Colombia?* <https://hdl.handle.net/1992/69529>
- FAO y PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. In *El estado de los bosques del mundo 2020*. FAO and UNEP. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- FCDS. (2023). *La biodiversidad del Guaviare que está en riesgo por las vías*. <https://fcds.org.co/la-biodiversidad-del-guaviare-que-esta-en-riesgo-por-las-vias/>
- Forero Riaño, J. A., & Polanco Puerta, M. F. (2021). Análisis de la deforestación en La Macarena, antes y después de los acuerdos de paz. In *Colombia Forestal* (Vol. 24, Issue 2, pp. 9–23). Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16479>
- Gil, P. A., & Morales, M. E. (2016). Información espacial, herramientas de análisis en la transformación de las coberturas vegetales. *Revista UniCordoba*, 15–22.
- Gobernación del Guaviare. (2017). *Municipio de Calamar*. <https://www.guaviare.gov.co/Territorios/Municipio-de-Calamar-903249>.
- González; G.I., & Gómez, L. A. (2020). Vía al bosque amazónico ¿para qué y cómo? Preguntas clave. *Revista Colombia Amazónica*. <https://www.>
- González Giraldo, L. F. (2022). *Fronteras agrícolas, mercado y conflicto Persistencia de la violencia en la Cuenca del Guaviare*. <https://doi.org/10.5821/siiu.10243>
- González, J., Cubillos, A., Chadid, M., Cubillos, A., Arias, M., Zúñiga, E., Joubert, F., Pérez, I., & Berrío, V. (2018). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM-. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Programa ONU-REDD Colombia. www.fao.org/contact-us/licence-request
- Guzman Raquejo, I. C. (2020). *Evaluación del plan de desarrollo con enfoque territorial de la subregión Macarena-Guaviare como mecanismo para contrarrestar la deforestación*.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., & Turubanova, S. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 850–853.

- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Cristóbal Rosselló, J., Peces, J. J., & Tejero, J. A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51. https://www.researchgate.net/publication/236900182_Cadena_de_pre-procesamiento_estandar_para_las_imagenes_Landsat_del_Plan_Nacional_de_Teledeteccion
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021). *Clasificación de las tierras por su capacidad de uso*.
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (3rd ed., Issue 3). Prentice Hall.
- KPMG. (2020). *Análisis político y económico de la deforestación en regiones afectadas por el conflicto en Colombia. Caso de Caquetá, Meta y Guaviare*. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/co/pdf/2020/08/kpmg-co-analisis-politico-y-economico-en-regiones-afectadas-por-el-conflicto-en-colombia.pdf>
- Landis, & Koch. (1977). *Ayuda de Concordancia y consistencia*.
- Lara Rodríguez, N. E. (2023). Deforestación y desigualdad de la tierra: un análisis econométrico en el posconflicto colombiano (2015-2019). *Cuadernos de Economía*, 89(42), 203–232. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/cuad.econ.v42n89.94607>
- Laurence, W. F. (2007). Have we overstated the tropical biodiversity crisis? Trends in Ecology and Evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(2), 65–70.
- López Loffsner, F. (2018). *Deforestación, justicia ambiental y post-acuerdo en el noroccidente del Guaviare*.
- Martínez Arias, V. (2021). *Evaluación multitemporal de la deforestación y regeneración de bosques: implicaciones sobre la estructura espacial, la conectividad y la composición de los bosques secundarios del Guaviare (2000-2020)*.
- Méndez Rojas, J. (2020). *Deforestación en la RNN Nukak, el PNN Chiribiquete y sus alrededores entre 1990 y 2020, utilizando algoritmos de Machine Learning y sus cálculos de precisión*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c1135354-aa01-4c5b-8e2f-440f0b52c342/content>
- Ministerio de Ambiente, & IDEAM. (2023). *Descubriendo los bosques 2. Información clave sobre los bosques naturales de Colombia, su biodiversidad y su papel esencial en la vida*.

- Montes Pinzón, J. E. (2022). *La construcción espacial de las periferias en la Amazonia Occidental colombiana: Procesos de urbanización y deforestación en San José del Guaviare 2000-2020*. Universidad Externado de Colombia.
- Murad, C. A., & Pearse, J. (2018). Landsat study of deforestation in the Amazon region of Colombia: Departments of Caquetá and Putumayo. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 161°171-171.
- Murillo Malaver, C. A. (2021). *Análisis comparativo del cambio del uso del suelo y la deforestación en la reserva nacional natural nukak producto de la firma de los acuerdos de paz en Colombia*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/c27fd1e9-5aee-4ba8-870e-c9280166ca06/content>
- Olaya, C. (2019). *El invisible acaparamiento de tierras*. <https://www.dejusticia.org/column/el-invisible-acaparamiento-de-tierras/>
- Pilli, R. (2012). Calibrating CORINE land cover 2000 on forest inventories and climatic data: An example for Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(1), 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.016>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- Resolución 261 (2018).
- Restrepo, M. C., Guzmán, D., Guarnizo, J., Monsalve, J., & Flórez, J. (n.d.). *El verde Palidece: Guaviare - La Selva a Mordiscos*. Retrieved July 18, 2025, from <https://especiales.semana.com/deforestacion/guaviare.html>
- Riveros Gómez, C. (2021). *Análisis ambiental de la deforestación en la Zona de Reserva Campesina del Guaviare*. Universidad Nacional de Colombia.
- Roa Gomez, A. M., & Collazos Tobar, I. J. (2022). *Relación entre los avances del desarrollo en los territorios rurales y el impacto en el estado de salud del ambiente, seres humanos, fauna y flora de la Región Amazónica, año 2021*. Institución Universitaria Antonio José Camacho.
- Rorato, A. C., Picoli, M. C. A., Versteegen, J. A., Camara, G., Bezerra, F. G. S., & Escada, M. I. S. (2021). Environmental threats over amazonian indigenous lands. *Land*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/land10030267>

- Soto Becerra, M. C. (2020). *Kui Hign Kui (estrella atada a estrella) - Plataforma de transformación e interacción para plantas ancestrales.(Trabajo de grado)* [Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/7758>
- USAID. (2021). *Análisis Multitemporal de los motores de deforestación y pérdida de biodiversidad en Guaviare*. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs
- Vásquez López, P. A. (2023). *Análisis de la dinámica de deforestación en el departamento del Guaviare (Colombia) entre los años 2014 y 2018*. Universidad Antonio Nariño.
- Vilar, L., Garrido, J., Echavarría, P., Martínez-Vega, J., & Martín, M. P. (2019). Comparative analysis of CORINE and climate change initiative land cover maps in Europe: Implications for wildfire occurrence estimation at regional and local scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.019>
- Visión Amazonía. (2020). *De focos de deforestación a Núcleos de Desarrollo Forestal. Aprovechamiento sostenible como estrategia de conservación*. <https://visionamazonia.minambiente.gov.co/content/uploads/2022/09/De-Focos-NDF.pdf>
- WWF. (2024). *¿Qué es la deforestación y cómo impacta a nuestro planeta?* <https://www.wwf.org.co/?389690/que-es-la-deforestacion>