



**Análisis multitemporal de deforestación en la zona sur del Parque Nacional
Natural Tinigua 2017-2024**

Daniel Felipe Ortega Zambrano

Ricardo Astolfo Duran Pérez

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

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

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita (Ortega Zambrano & Duran Pérez, 2025)

Referencia Ortega Zambrano, D. F. Duran Pérez R. A. (2025). *Análisis multitemporal de deforestación en la zona sur del Parque Nacional Natural Tinigua 2017-*

Estilo APA 7 (2020)

2024 [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.

RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Línea de Investigación Territorios Inteligentes y Sostenibles.

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, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], 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.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema	13
2 Antecedentes	16
3 Justificación.....	17
4 Objetivos	21
4.1 Objetivo general	21
4.2 Objetivos específicos.....	21
5 Marco teórico	22
6 Metodología	23
6.1. Parque Nacional Natural Tinigua.....	24
6.2. Procesamiento	26
7 Resultados	34
Índice de kappa y matriz de confusión.....	41
8 Discusión.....	60
9 Conclusiones	66
10 Recomendaciones.....	67
Referencias	69

Anexos.....	75
-------------	----

Lista de tablas

Tabla 1. Relación de imágenes satelitales descargadas de Planet Scope	25
Tabla 2. Periodos con mayor porcentaje de incremento de deforestación	34
Tabla 3. Cuantificación de áreas para las coberturas vegetales del año 2017.....	35
Tabla 4. Cuantificación de áreas de bosque y área deforestada por año	39
Tabla 5. Tasa promedio anual de deforestación y porcentaje de tasa de deforestación	40
Tabla 6. Porcentaje de incremento de deforestación.....	40
Tabla 7. Matriz de confusión año 2017.....	42
Tabla 8. Matriz de confusión año 2018.....	43
Tabla 9. Matriz de confusión año 2019.....	43
Tabla 10. Matriz de confusión año 2020.....	43
Tabla 11. Matriz de confusión año 2021	44
Tabla 12. Matriz de confusión año 2022.....	44
Tabla 13. Matriz de confusión año 2023.....	45
Tabla 14. Matriz de confusión año 2024.....	45
Tabla 15. Matriz de confusión e índice Kappa año 2019.....	58

Lista de figuras

Figura 1. Delimitación del Parque Nacional Natural Tinigua y área de estudio.....	25
Figura 2. Mosaico de imágenes satelitales PNN Tinigua.....	27
Figura 3. Herramienta Clip Raster	28
Figura 4. Recorte del mosaico al área de estudio	28
Figura 5. Asignación de polígonos de muestreo	29
Figura 6. Aplicación de la herramienta Create Signature	29
Figura 7. Aplicación de la clasificación Maximum Likelihood.....	30
Figura 8. Resultado de la conversión de raster a polígono de la clasificación supervisada.....	30
Figura 9. Aplicación de la clasificación supervisada CLC	32
Figura 10. Esquema metodológico del procesamiento de imágenes satelitales	33
Figura 11. Aplicación de la herramienta Create Accuracy Assesment Points.....	42
Figura 12. Aplicación de la herramienta Compute Confusion Matrix	42
Figura 13. Modelo espacial clasificación supervisada método Maximun Likelihood	46
Figura 14. Modelo espacial clasificación supervisada método Random Trees.....	47
Figura 15. Mapa de coberturas vegetales año 2017	48
Figura 16. Mapa de coberturas vegetales año 2018	48
Figura 17. Mapa de coberturas vegetales año 2019	49
Figura 18. Mapa de coberturas vegetales año 2020	50
Figura 19. Mapa de coberturas vegetales año 2021	51
Figura 20. Mapa de coberturas vegetales año 2022	52

Figura 21. Mapa de coberturas vegetales año 2023	53
Figura 22. Mapa de coberturas vegetales año 2024	54
Figura 23. Mosaico de imágenes clasificadas	55
Figura 24. Generación del mapa de segmentación.....	57

Lista de gráficas

Gráfica 1. Número de hectáreas bosque denso alto de tierra firme por año	37
Gráfica 2. Número de hectáreas Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales por año	38
Gráfica 3. Número de hectáreas pastos limpios por año	38
Gráfica 4. Número de hectáreas zonas quemadas por año	39
Gráfica 9. Porcentaje de incremento de deforestación	41

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
PNN	Parque Nacional Natural
CLC	Corine Land Cover
Esp.	Especialista
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
CAR	Corporación autónoma regional
PhD	Philosophiae Doctor
UManizales	Universidad de Manizales

Resumen

En la presente investigación se da a conocer la metodología, resultados, impactos esperados de un análisis de deforestación en la zona sur del Parque Nacional Natural (PNN) Tinigua, ubicado entre los municipios de La Macarena y La Uribe Meta. El PNN en los últimos años ha presentado importantes cambios en cuanto a coberturas vegetales por diferentes causas antrópicas, lo cual ha conllevado a que se presente una problemática ambiental, social y económica para el PNN ya que se presentan impactos altamente negativos en cuanto a pérdida de biodiversidad tanto de la fauna como de la flora presente en este importante parque que sirve de conexión para la región andina, orinoquía y amazonía del país, al estar geográficamente situado entre estas tres regiones, lo cual es causado principalmente por la tala y comercialización ilegal de madera, incendios forestales, la expansión de la frontera agrícola, entre otras causas. Para llevar a cabo la investigación se propone que mediante el uso de imágenes satelitales en un periodo de tiempo determinado, se pueda cuantificar e identificar de manera precisa la problemática de la deforestación, considerando lo anteriormente mencionado se realizará una metodología para el procesamiento de las imágenes satelitales obtenidas, así como la implementación de herramientas de sistemas de información geográfica para dicho procesamiento.

Palabras clave: Parque Nacional Natural Tinigua, deforestación, imágenes satelitales, sistemas de información geográfica, coberturas vegetales.

Abstract

This research presents the methodology, results, and expected impacts of a deforestation analysis in the southern area of the Tinigua National Natural Park (PNN), located between the municipalities of La Macarena and La Uribe Meta. In recent years, the PNN has presented important changes in terms of vegetation cover due to different anthropogenic causes, which has led to an environmental, social and economic problem for the PNN since there are highly negative impacts in terms of biodiversity loss of both the fauna and flora present in this important park that serves as a connection for the Andean, Orinoquía and Amazon regions of the country, being geographically located between these three regions, which is caused mainly by illegal logging and marketing of wood, forest fires, the expansion of the agricultural frontier, among other causes. To carry out the research, it is proposed that by using satellite images over a given period of time, the problem of deforestation can be accurately quantified and identified. Considering the above, a methodology will be developed for processing the satellite images obtained, as well as the implementation of geographic information system tools for said processing.

Keywords: Tinigua National Natural Park, deforestation, satellite images, geographic information systems, vegetation cover.

Introducción

Los procesos de deforestación se han desarrollado e intensificado durante la última década incrementando una problemática ambiental, económica y social en las comunidades acentuadas. Para el año 2019 el PNN Tinigua se posicionaba como una de las áreas protegidas con alto índice y porcentaje de deforestación en Colombia (IDEAM, 2019).

El incremento sustancial de los límites agrícolas y ganaderos sigue siendo un impulsor fundamental de la deforestación en Colombia. Tras alcanzar en 2023 la cifra más baja en 23 años, con 79 256 hectáreas deforestadas lo que representó una disminución del 36 % respecto a 2022, en 2024 se revirtió esta tendencia, registrándose cerca de 107 000 hectáreas deforestadas, un aumento del 35 %. Este repunte ha sido atribuido principalmente al avance de la ganadería extensiva, los cultivos ilícitos, la minería ilegal y el acaparamiento de tierras en la región amazónica. No obstante, durante el primer trimestre de 2025 se ha evidenciado una reducción del 33 % en la deforestación, al pasar de 40 219 hectáreas (en el mismo periodo de 2024) a 27 000, debido a una mayor presencia institucional, acuerdos con comunidades locales y acciones coordinadas contra actores ilegales. Estos patrones reflejan la complejidad de los procesos de transformación del territorio, los cuales están profundamente ligados a factores socioeconómicos y de gobernanza (Gómez, 2024; Ruiz, 2025).

Partiendo de lo anteriormente mencionado, un factor importante que genera estos procesos de deforestación es el tema del conflicto armado que vivencia en la mayor parte del país, sobre todo en las regiones donde los organismos de control no generan un seguimiento adecuado, muchas veces por falta de presupuesto para las corporaciones autónomas regionales (CAR), gobernaciones, alcaldías, Parques Nacionales Naturales, entre otras entidades; o simplemente por temas de oren público en las zonas de intervención.

(Rodríguez, 2020) en su estudio evidencia los puntos de vista que afrontan los campesinos que habitan en la zona protegida, evidenciando una problemática y abandono total por parte de los entes gubernamentales.

El análisis multitemporal de la cobertura forestal en el Parque Nacional Natural Tinigua (PNN Tinigua) se fundamenta en un marco normativo integral que respalda el uso de tecnologías avanzadas para la gestión ambiental, asegurando el cumplimiento de la normatividad nacional y compromisos internacionales. El Parque Nacional Natural Tinigua fue creado a través del Decreto 1989 del 1 de septiembre de 1989, en el cual se definieron sus límites, se declaró el Área de Manejo

Especial La Macarena y la Reserva Sierra de La Macarena, además de establecer la clasificación y zonificación de su territorio. Esta última conforma varios PNN y áreas de conservación con el fin de tener una conexión entre la región andina, la Orinoquia y la Amazonía colombiana. La Ley 99 de 1993 pondera los lineamientos para las políticas ambientales en el país, priorizando la protección de áreas estratégicas como los parques nacionales. Declara a los parques como patrimonio de la nación, bajo un régimen especial de conservación, garantizando la sostenibilidad de los recursos naturales frente a actividades humanas adversas. Esta norma subraya la importancia de investigaciones científicas, como las relacionadas con el monitoreo de deforestación, para la toma de decisiones informadas.

En el presente estudio se analizan y evidencian los procesos de deforestación para el PNN Tinigua para el periodo comprendido entre 2017 y 2024, sus causas, impactos y consecuencias en el territorio a través de clasificaciones supervisadas y software de sistemas de información geográfica evidenciando una impactante problemática ambiental que afronta actualmente el PNN.

El fenómeno de la deforestación tiene especial gravedad en la Amazonía, y particularmente en el Parque Nacional Natural Tinigua (PNN Tinigua), donde la pérdida de bosques ha aumentado de forma acelerada, según el (IDEAM & MinAmbiente, 2020), para ese año Tinigua ya se encontraba entre las áreas protegidas con mayores niveles de afectación, con más de 10.000 hectáreas de bosque arrasadas. Las principales causas identificadas incluyen el avance descontrolado de la frontera agropecuaria, la presencia de cultivos ilícitos y el asentamiento irregular de pobladores.

Al mismo tiempo, en regiones periféricas como La Macarena, San Vicente del Caguán y Vista Hermosa, se han consolidado procesos informales de ocupación del territorio. Esto ha sido propiciado por la persistente ausencia del Estado, la falta de implementación de políticas agrarias y la continuidad de dinámicas asociadas al conflicto armado y al narcotráfico. Una vez concluida la firma del Acuerdo de Paz en 2016, la retirada de actores armados como las FARC dejó un vacío de control institucional que facilitó la apropiación ilegal de tierras, situación ampliamente evidenciada por investigaciones ambientales y reportes periodísticos (FCDS, 2022; Morgan, 2024)

El avance de la frontera agrícola y ganadera se ha convertido en uno de los motores más potentes de deforestación en el país. Esta tendencia está relacionada con condiciones estructurales como la débil institucionalidad estatal en zonas rurales, la herencia del conflicto armado y la limitada capacidad de las políticas públicas para frenar el cambio de uso del suelo en territorios

estratégicos para la conservación. En el caso del PNN Tinigua, (Rodríguez, 2020), documenta cómo las comunidades campesinas se enfrentan a un contexto de abandono institucional, sin acceso a derechos claros sobre la tierra ni a medios de vida sostenibles.

A esto se le suma que la capacidad de las autoridades ambientales ha sido claramente insuficiente. La falta de personal, recursos técnicos y financiación para entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las gobernaciones y la Dirección de Parques Nacionales ha permitido que actores ilegales impongan sus propias reglas de ocupación del territorio. Esto ha contribuido no solo a la aceleración de la deforestación, sino también al empeoramiento de las condiciones de pobreza y vulnerabilidad en las comunidades rurales. (Rodríguez, 2020) resalta que este tipo de escenarios generan tensiones entre los objetivos de conservación ambiental y las necesidades sociales de la población.

Por otro lado, iniciativas como la Operación Artemisa, promovida por el Gobierno Nacional para controlar la deforestación en parques naturales, han tenido resultados cuestionables. Estudios recientes señalan que, más allá de su despliegue militar, esta estrategia ha provocado tensiones con las comunidades locales sin resolver las causas estructurales del problema, como el tráfico de tierras y la economía ilícita (Tarazona & Parra de Moya, 2023). La Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS) en su informe MONITOREO DE PÉRDIDA DE COBERTURA VEGETAL 15 DE FEBRERO A 31 DE MARZO DE 2022 advirtió que durante los primeros meses de ese año, el PNN Tinigua fue la zona más afectada por la deforestación en Colombia, con más de 1.800 hectáreas arrasadas, principalmente por actividades ganaderas ilegales dentro de zonas núcleo del parque.

Por otra parte, la expansión de economías ilícitas también ha influido fuertemente en la transformación del territorio. (Morgan, 2024) describe cómo redes de narcotráfico han establecido corredores logísticos dentro de áreas protegidas, abriendo trochas clandestinas y convirtiendo extensas áreas de bosque en cultivos ilícitos o pastizales para el ganado.

Desde el punto de vista normativo, el PNN Tinigua cuenta con un marco jurídico sólido definido en la Ley 99 de 1993 y el Decreto 1989 de 1989, que lo declaran como un área de protección ambiental con categoría especial. Sin embargo, la distancia entre este marco legal y las condiciones reales del territorio ha puesto en evidencia la necesidad de enfoques integrales que combinen el conocimiento técnico, el respeto por los derechos de las comunidades rurales y los principios de justicia ambiental.

En este contexto, el presente estudio realiza un análisis multitemporal de la deforestación en el PNN Tinigua entre 2017 y 2024, utilizando herramientas de análisis geoespacial y sistemas de información geográfica (SIG). La investigación identifica los patrones espaciales de pérdida de bosque, sus causas directas e indirectas, y los impactos ecológicos y sociales asociados. El propósito es aportar conocimiento útil para fortalecer una gestión ambiental más participativa, eficaz y centrada en la armonía entre conservación ambiental y justicia social.

1 Planteamiento del problema

En Colombia, la reducción de la cobertura boscosa incide directamente sobre la dinámica del ciclo del agua. Esto provoca menor disponibilidad de agua para los ecosistemas y las comunidades, al mismo tiempo, incrementa la vulnerabilidad del territorio frente a fenómenos como inundaciones y deslizamientos. (Cabrera, 2020).

Además, Gracias a su localización, cumple un rol clave como corredor ecológico que enlaza la Amazonía con la Orinoquía, jugando un papel clave en el control de las condiciones climáticas y el CH. Sin embargo, el PNN Tinigua ha presenta una intensificación de amenazas vinculadas al avance agropecuario, la extracción ilegal de madera y la ocupación de predios dentro del área protegida. Estas actividades han llevado a la disminución de grandes áreas de boscosas, generando un desequilibrio en los ecosistemas del parque y poniendo en peligro las acciones de conservación.

La presencia histórica de actores armados ha obstaculizado la protección y el control del territorio.

Y a su vez ha debilitado la resiliencia ecológica del parque y amenazado los medios de vida de las comunidades vinculadas a sus servicios ecosistémicos.

Es esencial abordar esta problemática en el PNN Tinigua con un enfoque integral que contemple tanto las perspectivas mundiales como las nacionales.

Es indispensable que las soluciones planteadas tengan en cuenta las condiciones propias del territorio y de las comunidades que lo habitan. Esto supone fortalecer los sistemas de monitoreo y vigilancia del área protegida, al mismo tiempo que se impulsan opciones productivas sostenibles que brinden alternativas reales a la población local. De igual forma, resulta fundamental consolidar una alianza entre el Estado, las organizaciones sociales y ambientales, así como actores internacionales e involucrar a las personas locales, con el fin de garantizar la protección a largo plazo de este ecosistema único. De no lograrse un enfoque integral, la pérdida de bosque en el

Tinigua podría alcanzar un punto crítico el cual va bastante avanzado, generando daños irreversibles: desde la desaparición de especies y ecosistemas hasta la afectación de los compromisos globales en la lucha contra el cambio climático, por su capacidad de absorber CO₂ y contribuir a mitigar el cambio climático

A nivel nacional, la deforestación ha dejado de ser un asunto localizado y se ha transformado en un desafío de alcance territorial, con repercusiones significativas en lo ambiental, lo social y lo político. El PNN Tinigua, refleja claramente esa contradicción entre lo que debería ser un espacio protegido y las complejas dinámicas que se desarrollan en el territorio. Aunque fue concebido para conservar la biodiversidad y garantizar servicios ecosistémicos esenciales, hoy se encuentra bajo una presión constante ejercida por múltiples actores y factores sociales que amenazan su integridad.

La creciente transformación del paisaje en el Parque Nacional Natural Tinigua plantea serias preocupaciones ambientales debido a su papel estratégico como corredor ecológico entre la Amazonía y la Orinoquía. Diversos informes institucionales han advertido sobre un proceso sostenido de fragmentación del bosque, impulsado por prácticas como la ganadería extensiva, los cultivos ilícitos y la ocupación informal del territorio (IDEAM, 2019; FCDS, 2022). Este proceso amenaza la integridad ecológica del parque y compromete funciones clave como la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hídrico y la captura de carbono, todos ellos servicios ecosistémicos esenciales frente al cambio climático.

A esta presión ambiental se suma un complejo entramado sociopolítico. Con la llegada de la firma del Acuerdo de Paz en 2016 y la posterior salida de las FARC-EP de zonas como La Macarena, actores armados ilegales y economías ilícitas como el narcotráfico han ocupado esos territorios, debilitando la gobernanza ambiental y limitando el accionar efectivo de las instituciones del Estado. En respuesta, el gobierno implementó la Operación Artemisa, una estrategia de tipo militar cuyo enfoque ha sido ampliamente cuestionado por su impacto sobre comunidades campesinas, su baja cobertura territorial y la falta de acciones estructurales contra los principales motores de la deforestación (Rebolledo, 2022; Tarazona & Parra de Moya, 2023)

La biodiversidad del parque y el bienestar comunitario están en riesgo, lo que exige un abordaje integral de la deforestación en el Tinigua, considerando tanto los contextos nacionales como internacionales.

A pesar de estar bajo figura de protección, el Parque Nacional Natural Tinigua enfrenta una crisis ambiental progresiva que pone en riesgo su sostenibilidad ecológica y su papel estratégico en la conectividad entre la Amazonía y la Orinoquía (IDEAM & MinAmbiente, 2020; WWF Colombia & USAID, 2021) Esta situación se agrava por la ausencia de estrategias diferenciadas que consideren las particularidades sociales, económicas y territoriales del área de influencia del parque.

Diversos estudios coinciden en que el deterioro ambiental tiende a profundizarse cuando no existen mecanismos eficaces de participación comunitaria ni alternativas productivas sostenibles para las poblaciones locales. En el caso de Tinigua, esta desconexión ha facilitado la expansión de actividades como la ganadería extensiva, la colonización informal y el aprovechamiento ilegal de los recursos naturales, especialmente en zonas donde la presencia institucional es débil (Rebolledo, 2022; Tarazona & Parra de Moya, 2023) .

Ante este panorama, resulta prioritario realizar un análisis contextualizado de los factores que explican el avance de la deforestación en el PNN Tinigua. Comprender las causas territoriales, las limitaciones institucionales y las tensiones sociales asociadas permitirá dimensionar de forma más precisa el problema y generar conocimiento que sustente estrategias de conservación más eficaces y pertinentes para el territorio. Por esto, se identifica la urgencia de desarrollar un análisis multitemporal que de a conocer con mayor precisión la dinámica de cambio en la cobertura forestal del PNN Tinigua durante el periodo 2017–2024. Comprender las causas territoriales, los patrones espaciales y las implicaciones socioambientales de este fenómeno es fundamental para formular estrategias más efectivas de conservación, restauración y gestión integral del territorio.

Es por esto que el desarrollo y aplicación de herramientas tecnológicas, como teledetección y SIG, han posibilitado monitorear la deforestación en tiempo prácticamente real, generando alertas tempranas y detectando tendencias espacio-temporales (Hirschmugl et al., 2017) Incorporar este tipo de metodología no solo mejora el conocimiento técnico, sino que genera evidencia sólida para la formulación de políticas y la acción territorial, sin depender exclusivamente de vigilancia militar.

Por todo lo anterior, la problemática de la deforestación en el PNN Tinigua no puede comprenderse únicamente desde una perspectiva ambiental, sino que requiere un enfoque multidimensional que articule lo ecológico, lo social, lo institucional y lo tecnológico. La necesidad de un estudio que combine análisis multitemporal, herramientas SIG y una lectura crítica de las dinámicas territoriales se vuelve urgente ante la magnitud y continuidad del fenómeno. Esta

investigación busca responder a esa necesidad, ofreciendo insumos que contribuyan al fortalecimiento de la gestión ambiental en uno de los ecosistemas más estratégicos del país.

2 Antecedentes

En Colombia interactúan diversos actores que influyen en el destino de los bosques, ya sea de manera positiva o negativa, motivados por intereses distintos y a través de prácticas que en muchos casos resultan opuestas. Campesinos, comunidades étnicas, sectores productivos, grupos armados y el propio Estado participan, de forma directa o indirecta, en los procesos que transforman la cobertura boscosa, respondiendo a dinámicas que con frecuencia entran en contradicción. (González et al., 2018).

A nivel local, la investigación hecha por (Guerra, 2023) en su investigación realiza comparaciones de imágenes satelitales en el Chaqueta por medio de información suministrada por el (IDEAM), la plataforma Global Forest Watch (GFW) y la Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS).

A manera de antecedente en la zona de estudio, (López, 2022) realiza un análisis multitemporal de deforestación en la PNN Tinigua mediante clasificación de coberturas de la tierra y empleo de aplicaciones de sistemas de información geográfica para determinar el incremento de la problemática en los últimos años.

Continuamente al PNN Tinigua se encuentra el parque natural nacional La Macarena, zona que ha venido siendo intervenida de manera antrópica durante los últimos años. (Márquez & López, 2023) desarrollaron combinaciones de bandas espectrales de imágenes satelitales tomadas del parque natural para determinar tipos de coberturas vegetales siguiendo la metodología Corine Land Cover, buscando así los principales factores y causas de deforestación.

En un reciente trabajo de investigación (Pedraza Suárez, 2023) analizo lo que determina la influencia de la educación ambiental para la protección del parque nacional natural Tinigua, donde encontró que en la región se tiene la percepción de que la conservación de la naturaleza no permite el desarrollo económico de la región, ya que la falta de control de las entidades competentes ha desarrollado el acaparamiento de miles de hectáreas, generando asentamientos de comunidades campesinas en busca del desarrollo y sustento económico de sus familias.

En el componente social, (Rodríguez, 2020) en su investigación analizó las dinámicas sociales, ambientales y económicas que enfrentan las comunidades campesinas que se encuentran asentadas en el PNN Tinigua, donde enfatiza el reconocimiento del campesinado como actores fundamentales en los procesos y dinámicas de los conflictos ambientales que se presentan en el territorio, que además de todo presenta altos índices de problemas de orden público por la presencia de grupos al margen de la ley, y la poca o casi nula presencia del estado para velar por sus derechos.

Un trabajo de investigación de análisis de deforestación muy reciente desarrollado por (Estrada, 2024) en una de sus conclusiones indica que: Los puntos de calor y las cicatrices de quema mostraron incrementos significativos en los años 2018, 2020, y 2022, lo cual subraya la relevancia de eventos específicos que ejercen una presión considerable sobre el ecosistema. Estos patrones sugieren que existen períodos críticos donde los esfuerzos de conservación deben intensificarse para prevenir la degradación irreversible del bosque.

(Cabrera, 2020) en su investigación logro evidenciar diferentes picos de tasas de deforestación en el PNN Tinigua desde el año 1989 al 2019, encontrando que en los últimos años se ha incrementado la problemática, concordando con anteriores estudios o trabajos de investigación.

En conjunto, estos estudios resaltan la importancia de adoptar enfoques integrados y multitemporales para el monitoreo y la gestión de los ecosistemas forestales en Colombia. El uso conjunto de datos satelitales, sistemas de información geográfica y metodologías comparativas permite identificar y evaluar los cambios en los bosques, al tiempo que facilita la comprensión de las dinámicas sociales y ambientales que influyen en su modificación. Esta aproximación integral es clave para diseñar acciones de conservación que respondan a los problemas ambientales contemporáneos y aseguren la permanencia de los bosques colombianos en el largo plazo. Esta perspectiva integral es esencial para el desarrollo de estrategias de conservación que respondan a los retos ambientales contemporáneos y que contribuyan a la sostenibilidad a largo plazo de los bosques colombianos.

3 Justificación

La evaluación de los cambios en la extensión de la cobertura vegetal arbórea en el PNN Tinigua es fundamental para comprender la dinámica de la deforestación y la degradación de los ecosistemas en esta área protegida. A través de un análisis en diferentes periodos con imágenes

satelitales durante el período de 2017 a 2024, se busca evaluar de manera precisa y detallada cómo han evolucionado los bosques en esta región, lo que es crucial para la formulación de políticas de conservación efectivas.

El período seleccionado (2017-2024) para el análisis multitemporal de la deforestación en el Parque Nacional Natural Tinigua responde a la urgencia de analizar y comparar los efectos de la intensificación de actividades que han incrementado la disminución constante de cobertura forestal, particularmente tras la firma del Acuerdo de Paz en 2016. Con la salida de grupos armados de ciertas zonas del país, se produjo un aumento en la ocupación de tierras, impulsado por la expansión de la ganadería, la agricultura y la tala ilegal (Clerici et al., 2020). Este proceso ha transformado aceleradamente los ecosistemas del parque, afectando su biodiversidad y equilibrio ecológico.

El parque natural al tener una gran cantidad de área y al observar preliminarmente que la deforestación que ha sufrido el PNN en los últimos años, se ha desarrollado en la parte del sur que atraviesa el río Guayabero, puesto que en la margen norte del río no se observan cambios en la cobertura vegetal. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se decide realizar el análisis multitemporal para una zona de estudio con menor área y donde se vean cambios importantes en las coberturas vegetales de la zona.

Para comprender mejor estos cambios, es fundamental contar con herramientas que permitan un monitoreo preciso y continuo. En este sentido, las imágenes satelitales de alta resolución obtenidas por Planet Scope han sido claves para la detección y análisis de los patrones de deforestación en la región. Gracias a estas tecnologías, es posible no solo evaluar la magnitud del problema, sino también orientar estrategias de mitigación y conservación que contribuyan a la protección del ecosistema. Asimismo, el estudio de este período permite examinar la efectividad de las políticas ambientales implementadas en los últimos años y su impacto en la reducción de la deforestación dentro del área protegida.

El análisis multitemporal permite observar y comparar la cobertura forestal en diferentes momentos, facilitando la identificación de tendencias y patrones de cambio. Particularmente en el PNN Tinigua, donde la presión causada por la ganadería, la agricultura y la minería ilegales ha crecido en los últimos años, este enfoque se vuelve esencial. El análisis mediante imágenes satelitales ofrece una visión objetiva y de gran alcance sobre el estado actual de los bosques, necesaria para una gestión informada.

El uso de imágenes satelitales proporciona una herramienta poderosa para la evaluación de la cobertura forestal. Estas imágenes permiten abarcar grandes áreas y ofrecen datos que pueden ser analizados para detectar cambios en la vegetación. A través de técnicas de teledetección, es posible clasificar la cobertura del suelo y monitorear la salud de los ecosistemas forestales. Este tipo de análisis no solo es útil para identificar áreas de deforestación, sino también para evaluar la efectividad de las políticas de conservación implementadas en el parque.

La identificación de cambios en la cobertura forestal es crucial para la conservación del PNN Tinigua, ya que permite monitorear la efectividad de las políticas, identificar áreas críticas, informar a las comunidades locales y contribuir a la investigación científica.

La identificación de cambios en la cobertura forestal del PNN Tinigua a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales es una herramienta crucial para abordar los desafíos de la deforestación y la degradación ambiental en esta región. Además de ofrecer insumos clave para la conservación de los ecosistemas, este enfoque contribuye al diseño de políticas responsables y duraderas que generan beneficios ambientales y sociales. La capacidad de monitorear y evaluar estos cambios es fundamental para garantizar la protección de uno de los tesoros naturales más importantes de Colombia.

En el presente trabajo de investigación se desarrolla el análisis multitemporal de deforestación empleando la metodología Corine Land Cover (CLC), mediante la clasificación supervisada en el procesamiento digital de las imágenes para el sector sur del PNN Tinigua, específicamente desde el río Guayabero hacia el sur ya que es en esta zona donde se ha venido desarrollando la deforestación durante los últimos años. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se trabajó con un área de estudio menor, priorizando la zona más afectada del PNN.

Así mismo las imágenes satelitales que se emplearon y descargaron para realizar el procesamiento, se obtuvieron de la página del servidor de Planet, imágenes satelitales que ofrecen una resolución espacial de 4.7 m por 4.7 m, teniendo así un mayor nivel de detalle, lo que facilita la clasificación de coberturas vegetales y la implementación de la metodología CLC.

El Parque Nacional Natural Tinigua, ubicado en una zona estratégica de la Amazonía colombiana, representa un ecosistema de alto valor ecológico por su biodiversidad, funciones hidrológicas y servicios ecosistémicos. En los últimos años, sin embargo, este territorio ha sufrido una intensa transformación debido a procesos de deforestación asociados a la expansión agropecuaria, la ocupación ilegal de tierras y actividades ilícitas como la minería y los cultivos de

uso ilícito (FCDS, 2022; Lecca et al., 2020) Esta situación ha generado una pérdida crítica de cobertura forestal, especialmente en su zona sur, lo que compromete no solo la integridad ecológica del parque, sino también la estabilidad ambiental regional.

Adicionalmente, este estudio aporta a los compromisos globales adquiridos por Colombia frente a la mitigación de los procesos de pérdidas de coberturas boscosas, como el Acuerdo de París (adoptado en el 2015) y las metas de la Estrategia Nacional de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques (ENREDD+). Por lo cual se desarrollará un análisis multitemporal de la deforestación empleando la metodología Corine Land Cover (CLC), aplicada mediante técnicas de clasificación supervisada en el procesamiento digital de imágenes satelitales. El estudio se focaliza en el sector sur del Parque Nacional Natural Tinigua, específicamente desde el río Guayabero hacia el sur, ya que según observaciones previas y reportes recientes, esta es la zona que ha presentado los mayores niveles de pérdida de cobertura boscosa en los últimos años (FCDS, 2022; Finer, 2025) Con base en estos antecedentes, se delimitó un área de estudio más reducida que permitiera una caracterización detallada del fenómeno de deforestación y facilitara la aplicación precisa del análisis multitemporal.

La metodología CLC se ha consolidado como una herramienta eficaz para el análisis del cambio de cobertura y uso del suelo en estudios de monitoreo ambiental. Su estructura jerárquica y estandarizada permite comparar datos de diferentes escalas y periodos, y su compatibilidad con sistemas de información geográfica (SIG) hace que sea ampliamente utilizada en evaluaciones de impacto ambiental y ordenamiento territorial (Cieślak et al., 2017; Mansaray et al., 2021) En este estudio, la metodología se adaptó a las condiciones específicas del PNN Tinigua y se aplicó con apoyo de herramientas de procesamiento como ENVI y ArcGIS.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Realizar el Análisis multitemporal de deforestación en la zona sur del Parque Nacional Natural Tinigua para el periodo 2017-2024

4.2 Objetivos específicos

- Analizar multitemporalmente los cambios forestales causados por la deforestación en el parque Nacional Natural Tinigua.
- Evaluar la magnitud y las tendencias de la deforestación ocurrida para el periodo 2017-2024.
- Visualizar la cobertura forestal del área de estudio del parque Nacional Natural Tinigua y su evolución.

5 Marco teórico

Definición y conceptualización de la deforestación

La deforestación corresponde a la desaparición/perdida de grandes extensiones de bosques, ya sea por la acción del ser humano o por fenómenos naturales que alteran el entorno (WWF, 2024). Es un proceso complejo que involucra factores socioeconómicos, políticos, institucionales y ambientales. Comprender las causas y los impactos de la deforestación es fundamental para diseñar estrategias efectivas de conservación y manejo forestal.

La deforestación es la conversión permanente de áreas cubiertas por bosques en otros usos del suelo, como agricultura, ganadería, minería o tala ilegal, implicando una pérdida masiva de cobertura arbórea y provocando efectos ambientales severos, como la afectación de la biodiversidad y la modificación de los procesos hídricos, el incremento de emisiones de CO₂ y la degradación de los suelos (FAO, 2020; Lee et al., 2023; Smith et al., 2023)

Los sistemas de información geográfica resulta clave en la búsqueda de soluciones efectivas y optimización de procesos que se llevan a cabo en el día a día. Por lo que podemos concluir que un sistema de información geográfica (SIG) es una tecnología computacional diseñada para capturar, almacenar, gestionar, analizar y representar datos georreferenciados mediante la integración eficiente de hardware, software, datos y procedimientos. Su propósito es combinar información básica y derivada para generar nuevos conocimientos espaciales, apoyados en herramientas informáticas y fuentes de información confiables (Chandran & Roy, 2024; Rogers et al., 2025)

La teledetección es una tecnología clave que permite observar, medir y analizar características físicas de la Tierra mediante sensores montados en satélites o plataformas aéreas, utilizando la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos (Vali et al., 2020)

Las coberturas vegetales cumplen un importante apartado en la presente propuesta ya que será básicamente el área de estudio donde se pretende visualizar los cambios más significativos en un periodo de diez años. Dentro der las coberturas vegetales existen diferentes clasificaciones que permiten diferenciar de una a otra dependiendo de sus características morfológicas, extensión, y demás, ya que según la metodología CLC se pueden asignar diferentes categorías a las coberturas entre esas bosques, cuerpos de agua, áreas urbanas, cultivos agrícolas, pastos, entre otras.

Clasificación Supervisada: Esta técnica implica el uso de muestras de entrenamiento para clasificar las imágenes en diferentes categorías de cobertura del suelo, como bosques, áreas agrícolas y zonas urbanas.

Clasificación No Supervisada: Se utiliza para identificar patrones en los datos sin intervención previa.

Detección de Cambios: Comparar las clasificaciones de diferentes años para identificar áreas de deforestación, reforestación o cambios en el uso del suelo. Esto puede incluir el cálculo de índices de cambio, como el Índice de Cambio de Cobertura.

6 Metodología

A continuación, se describirá la metodología realizada para el procesamiento de las imágenes satelitales y analizar el cambio de patrones asociados a áreas boscosas usando la metodología Corine Land Cover (CLC), así como también el tipo de estudio y el enfoque metodológico para la investigación.

Enfoque metodológico

En el presente trabajo de grado la metodología tuvo un enfoque metodológico mixto, reúne el enfoque cuantitativo y cualitativo, ya que dentro de los objetivos propuestos está el cuantificar las áreas deforestadas en el PNN Tinigua mediante ilustraciones, graficas, cuadros comparativos, entre otros. A manera cualitativa se describirán los cambios en las coberturas vegetales, causas y consecuencias de esta problemática que ha incrementado con el paso de los años.

Tipo de estudio

En la presente investigación se propuso que los tipos de estudio a emplear son los descriptivos y correlacionales, ya que mediante el procedimiento a aplicar en la metodología se consideran fenómenos y componentes, los cuales son las bases de una problemática a estudiar, en este caso la deforestación. El tipo de investigación correlacional también aplicaría en la presente propuesta puesto que se cuantificará el área deforestada entre las diferentes variables que originan tal problemática.

Para la aplicación de la metodología del análisis de deforestación se realizó una delimitación del área de estudio, en este caso un fragmento de la zona sur del parque nacional natural Tinigua para lo cual se contó con un polígono en formato shapefile, en el programa ArcGis

Pro versión 3.3.0 se ejecutó la herramienta de crear nuevo shapefile por medio de la ventana de catálogo, se le asignó el tipo de geometría polígono y el sistema de referencia de coordenadas fue WGS 84, una vez obtenido el área de estudio se procedió a realizar la búsqueda y descarga de las imágenes (ver anexos) satelitales tomadas de la constelación de satélites que pertenece a Planet Scope con una resolución espacial de 4.7 m, teniendo en cuenta que el análisis multitemporal se hizo entre los años 2017 a 2024.

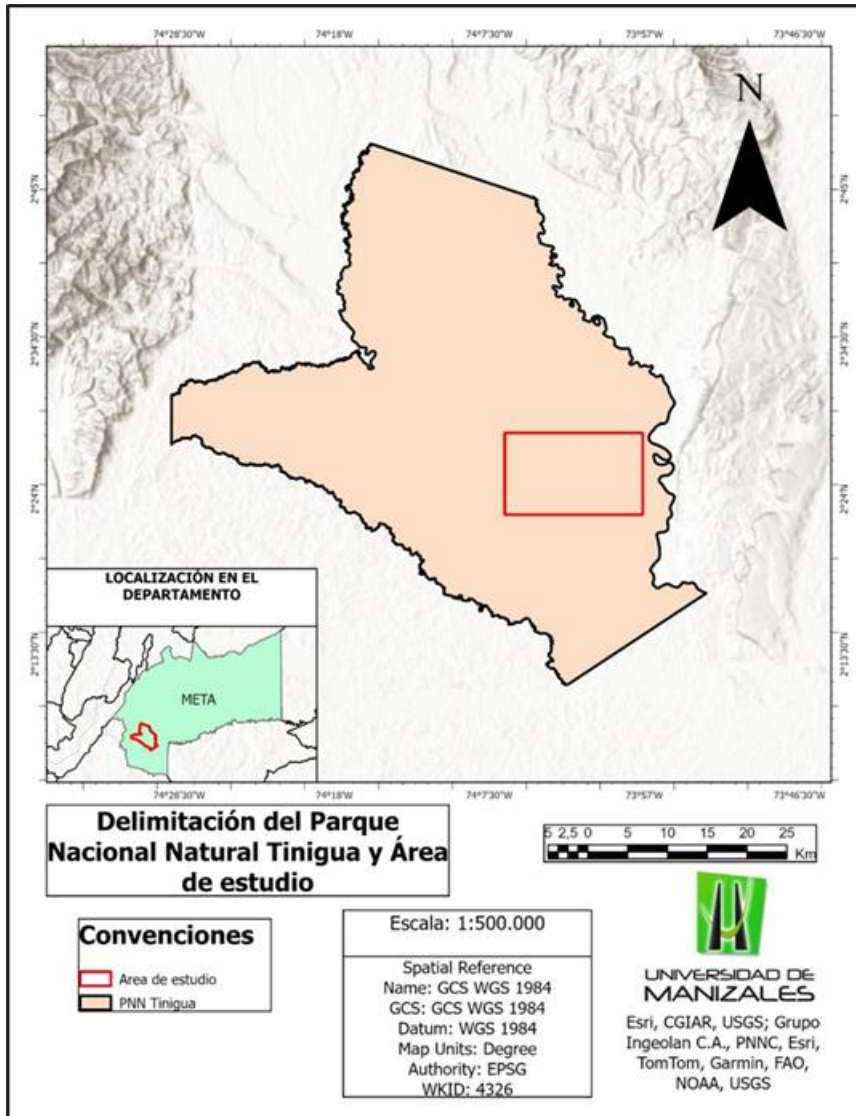
6.1. Parque Nacional Natural Tinigua

El PNN Tinigua está localizado en la zona sur oriental del departamento del Meta en jurisdicción de los municipios de La Macarena y La Uribe. El parque es de vital importancia ya que se encuentra dentro del (AMEM) El Área de Manejo Especial de La Macarena, conocida como AMEM, se extiende por casi 3,9 millones de hectáreas. Este territorio reúne cinco zonas de gran importancia: los Parques Nacionales Naturales Sierra de La Macarena y Tinigua en toda su extensión, además de los parques Picachos y Sumapaz en la parte que corresponde al Meta. A ello se suman dos Distritos de Manejo Integrado de los Recursos Naturales Renovables, que buscan equilibrar la conservación con el uso responsable de los recursos. (La Macarena y Ariari-Guayabero) (Morales et al., 2018). Lo anteriormente mencionado hace referencia a la dimensión ambiental y ecológica que tiene el PNN entre la conectividad y el corredor biológico de la región andina, Orinoquia y amazonia. El PNN fue constituido en 1989 y tiene una extensión de 201.875 hectáreas, Esta área posee un enorme valor hídrico, ya que resguarda las cuencas de los ríos Guayabero, Guaduas, Perdido y Duda. La unión de estos afluentes da origen al río Guaviare y contribuye a la formación de la macrocuenca del Orinoco. («Parque Nacional Natural Tinigua», 2025).

El territorio se extiende siguiendo como referencia los ríos Duda y Guayabero hasta llegar al raudal de Angostura. Hacia el oriente se delimita con el caño Perdido y, en el occidente, con el bajo Guaduas hasta su unión con la quebrada Lagartija; desde allí, el límite continúa aguas arriba hasta conectar con la línea imaginaria del parque que enlaza esta quebrada con el río Duda. En cuanto a sus fronteras administrativas, al occidente colinda con el Parque Nacional Natural Cordillera de los Picachos, al oriente con el Parque Nacional Natural Sierra de La Macarena y tanto al norte como al sur se relaciona con otras áreas que forman parte del AMEM. (Castañeda, 2019). Esta importante área protegida abarca gran diversidad de flora y fauna diferentes tipos de bosques, entre ellos el bosque denso alto de tierra firme, bosque de galería, entre otros.

En la (figura 1) se generó el mapa de la delimitación del parque nacional natural Tinigua a una escala de 1:500.000 para poder dar contexto de la inmensidad del PNN.

Figura 1. Delimitación del Parque Nacional Natural Tinigua y área de estudio



A continuación, se relacionan las imágenes descargadas de Planet Scope, (se usaron las mismas identificaciones de las imágenes satelitales para todos los años entre 2017 y 2024).

Tabla 1. Relación de imágenes satelitales descargadas de Planet Scope

ID
L15-600E-1037N
L15-600E-1038N

 L15-601E-1037N

L15-601E-1038N

L15-602E-1036N

L15-602E-1037N

L15-602E-1038N

L15-603E-1036N

L15-603E-1037N

L15-603E-1038N

Fechas de las imágenes satelitales**Resolución espacial**

2017-08

2018-08

2019-04

2020-01

2021-09

2022-12

2023-09

2024-09

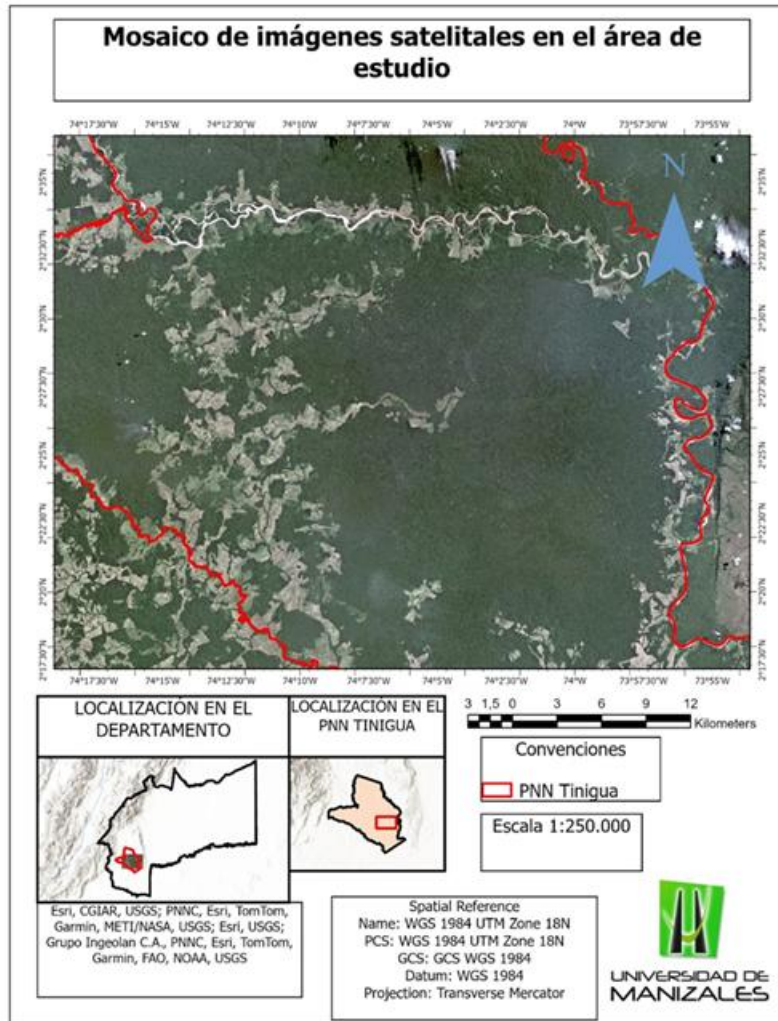
4.7 m

6.2. Procesamiento

En el caso del PNN Tinigua este se encuentra traslapado con las imágenes que suministraron los satélites de la constelación Planet Scope, ya que el PNN no se encuentra totalmente en una imagen, razón por la cual se necesitaron más de dos imágenes, que se unieron para crear un mosaico de imágenes el cual abarcó toda el área de estudio. La herramienta utilizada ya con las imágenes abarcadas en el área fue Mosaic, en la pestaña de Imagery, esta herramienta permitió unir todas las imágenes y crear un solo raster con la información de todas las imágenes satelitales.

El resultado del mencionado procesamiento se evidencia en la (figura 2) donde se trabaja con una escala de 1:250.000 ya que a esta escala se logra evidenciar el mosaico generado. las salidas graficas generadas para el área de estudio se elaboraron con una escala de 1:80.000, lo que permitió visualizar las coberturas vegetales presentes en el área de interés.

Figura 2. Mosaico de imágenes satelitales PNN Tinigua



Posteriormente se procedió a realizar el recorte del mosaico frente al polígono del PNN Tinigua para así lograr tener el área completa delimitada, mediante la herramienta Clip Raster en la caja de herramientas del programa se generó la imagen final con la que se inició la clasificación supervisada de coberturas vegetales.

Figura 3. Herramienta Clip Raster

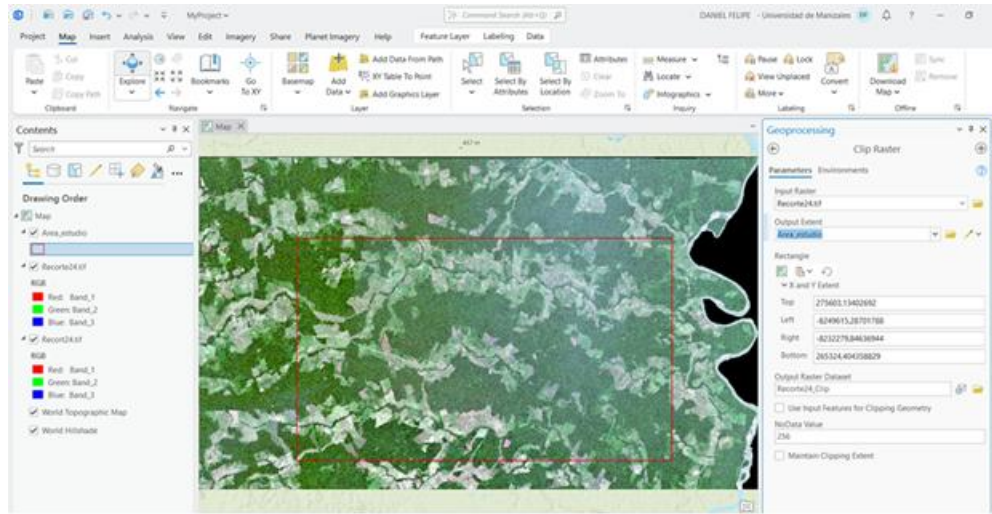
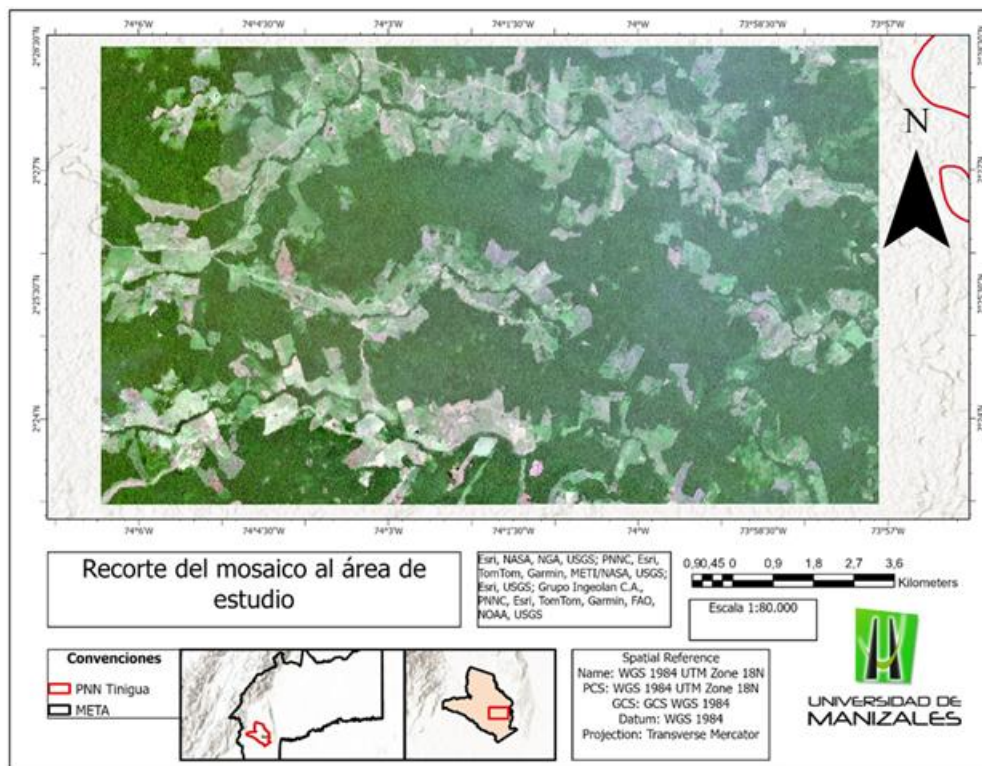


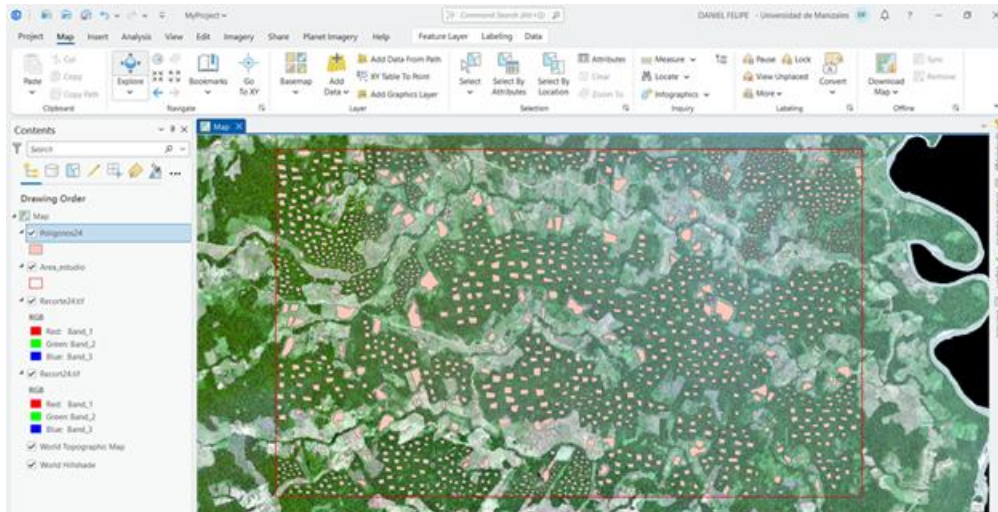
Figura 4. Recorte del mosaico al área de estudio



Para realizar el análisis del PNN a través de los años se realizó una técnica de clasificación, en este caso se utilizó la supervisada, esta técnica consistió en asignar en promedio 913 polígonos a las diferentes coberturas vegetales presentes para que el software genere un raster clasificado, para

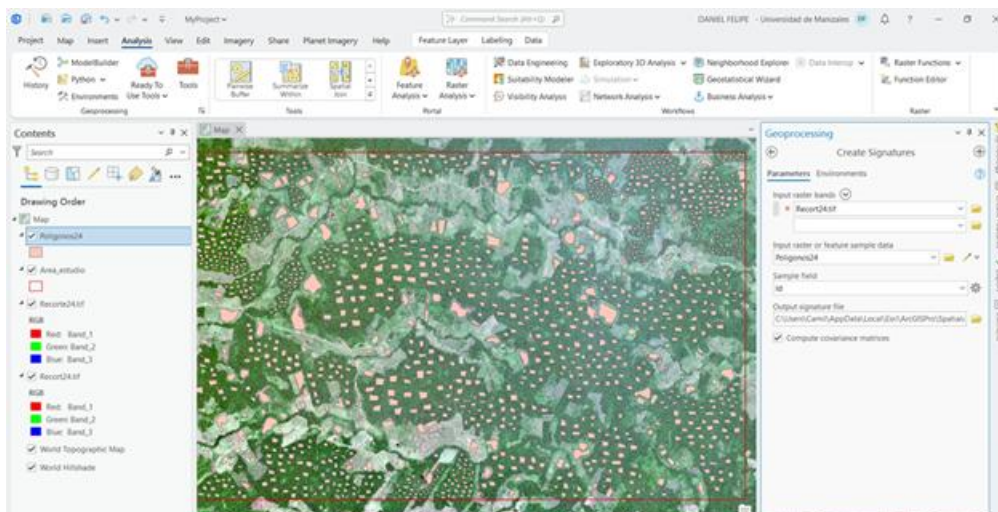
ello se creó una capa vectorial de polígonos donde para cada clase de cobertura se asignó un ID, lo que permitió agrupar los polígonos en las diferentes clases de coberturas.

Figura 5. Asignación de polígonos de muestreo



La clasificación no supervisada difiere de la anterior pues en esta el usuario no asigna polígonos o puntos a las coberturas vegetales sino que el software procesa los píxeles y clasifica las coberturas asignadas por el usuario para así generar un raster clasificado. Una vez asignados todos los polígonos, mediante la herramienta Create Signatures se crean las firmas espectrales para poder realizar la clasificación puesto que se toman como entrada los polígonos creados en el anterior paso.

Figura 6. Aplicación de la herramienta Create Signature



Posteriormente ejecutada la herramienta Create Signatures se realizó la clasificación supervisada mediante la herramienta Maximum Likelihood Classification de la caja de herramientas, como entrada la imagen satelital recortada y las firmas espectrales de los polígonos asignados por clases, lo cual dio como resultado una imagen clasificada, que posteriormente se exportó en formato .TIFF para después convertir el raster a polígono y mediante la herramienta Dissolve agrupar las coberturas vegetales que se asignaron.

Figura 7. Aplicación de la clasificación Maximum Likelihood

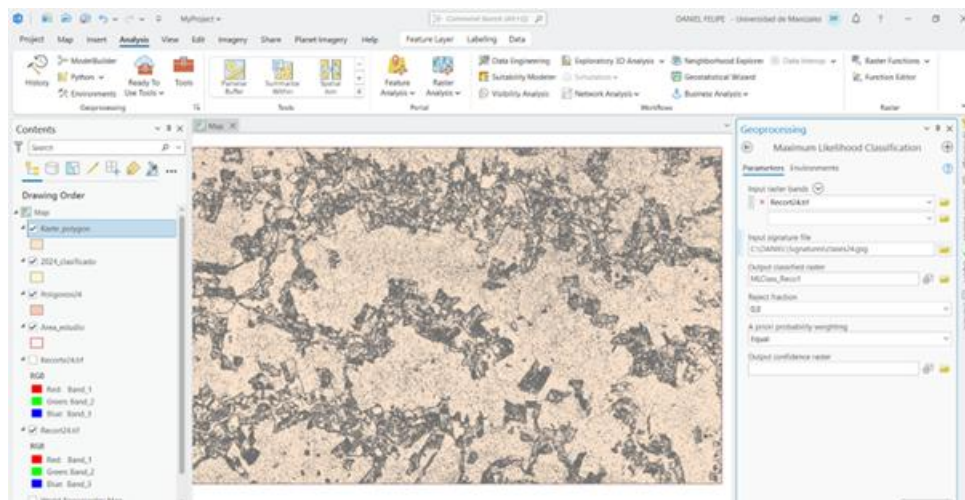
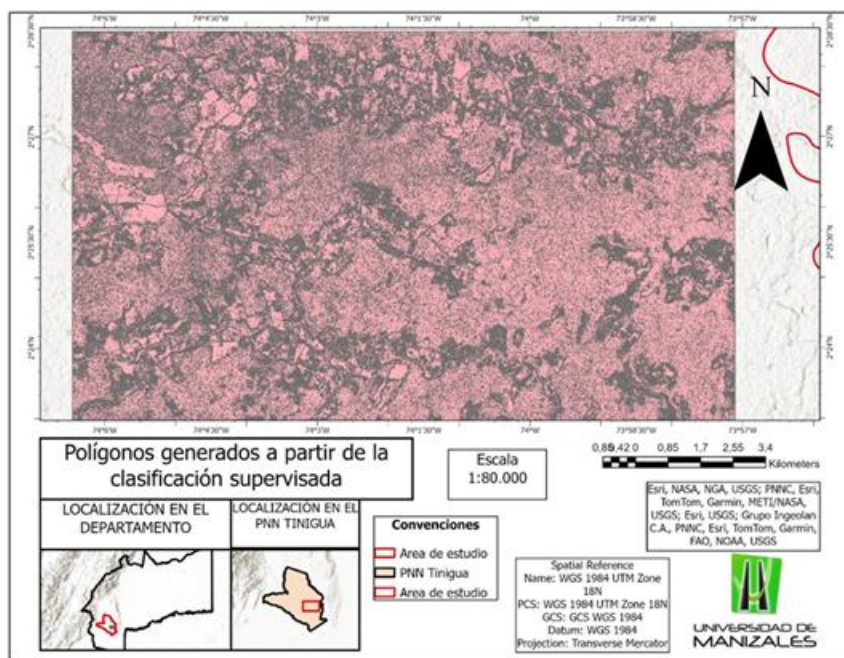


Figura 8. Resultado de la conversión de raster a polígono de la clasificación supervisada



Aplicación de la metodología Corine Land Cover (CLC)

Una vez realizada la clasificación supervisada de los objetivos del estudio se realizó una clasificación CLC, según (Suárez et al., 2016) El método Corine Land Cover (CLC), desarrollado inicialmente en Europa, fue adaptado a las condiciones de Colombia por el IGAC y el IDEAM. Su aplicación se basa en la interpretación de imágenes satelitales particularmente de la serie Landsat, con el fin de identificar, clasificar y analizar los diferentes tipos de cobertura presentes en el territorio nacional.

Esta metodología ha sido muy aplicada en el país para este tipo de análisis ya que brinda de manera jerárquica las coberturas vegetales, así como sus subdivisiones.

Para el presente estudio se emplearon cuatro clases de coberturas vegetales, las cuales se definen a continuación:

Bosque denso alto de tierra firme:

Estas condiciones estructurales se asocian con ecosistemas maduros y biodiversos, donde la altura del dosel y su densidad son claves para el funcionamiento ecológico (Kopas et al., 2021; Liu, Csillik, et al., 2025)

Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales:

El término mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales se refiere a unidades de uso del suelo donde la superficie está cubierta entre un 30 % y 70 % por actividades agrícolas y ganaderas, integradas en un contexto heterogéneo que incluye remanentes naturales tales como relictos arbóreos, vegetación secundaria, bosques de galería, pantanos y otros ambientes sin intervención significativa. Estas unidades se caracterizan por no ajustarse a patrones parcelarios lineales mayores de 25 hectáreas, sino por presentar una distribución fragmentada y compleja, donde los usos productivos conviven con elementos naturales (Silveira et al., 2022; Vergara & Llorente, 2025)

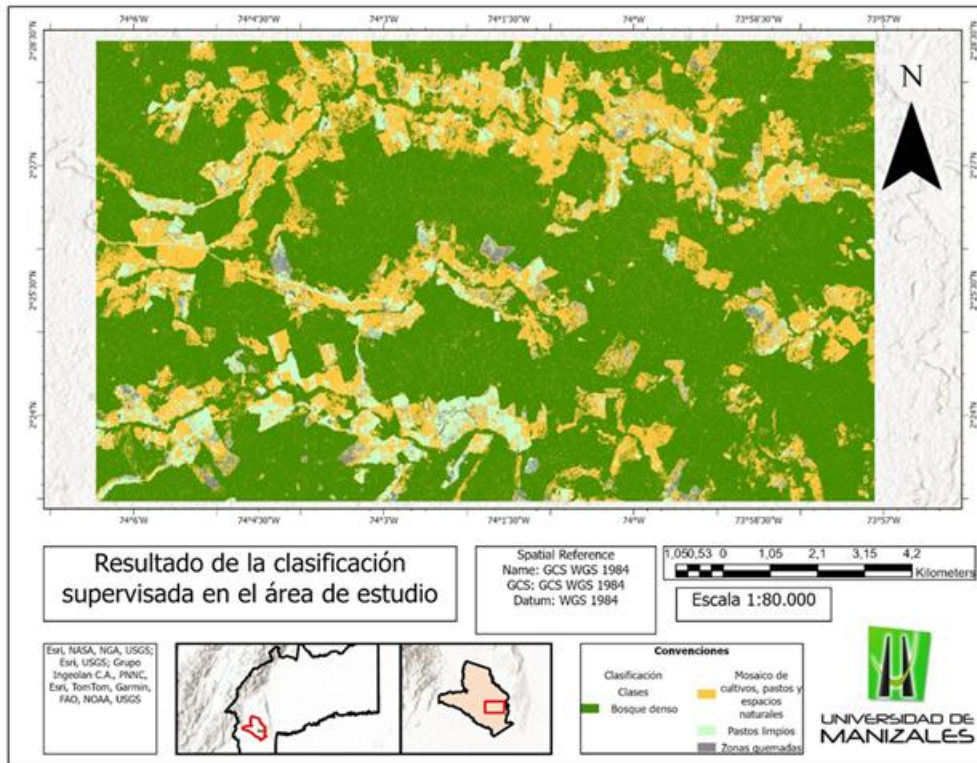
Pastos limpios:

El término pastos limpios hace referencia a coberturas de terreno donde predominan especies forrajeras de fácil manejo, con más del 70 % de cobertura herbácea, sometidas a prácticas de mantenimiento como limpieza, encalado y fertilización, lo cual impide el desarrollo de otras coberturas vegetales. En Colombia, este tipo de pastos se distribuye en diversos relieves y climas, pero su presencia está condicionada por las técnicas de manejo y el nivel tecnológico aplicado en cada región (Bautista-Montealegre et al., 2023)

Zonas quemadas:

Las zonas quemadas hacen referencia a áreas afectadas por incendios recientes que aún conservan materiales carbonizados y restos superficiales. Esto incluye territorios tanto naturales como seminaturales —como bosques, sabanas, cultivos y arbustales— que han sido perturbados por fuego (Liu, Wang, et al., 2025).

Figura 9. Aplicación de la clasificación supervisada CLC



Con las clasificaciones de las coberturas vegetales en el PNN se realizó la cuantificación de áreas por medio de la tabla de atributos, se creó un campo en la tabla de atributos y con la herramienta Calculate Geometry se calcularon las áreas en hectáreas para las coberturas: Bosque denso alto de tierra firme, pastos limpios, pastos enmalezados y zonas quemadas. Con esto se dimensiona y cuantifican las áreas deforestadas a través de los años identificando las áreas entre bosques y pastos, pastos limpios según la metodología CLC, así mismo por medio de cartografía se hizo una interpretación de las salidas graficas que arrojaron los procesamientos para determinar el cambio que se evidenció en el PNN en los últimos años.

Figura 10. Esquema metodológico del procesamiento de imágenes satelitales



Una vez realizado todo el procesamiento de las imágenes satelitales y obtenidas las clasificaciones de coberturas vegetales se calcularon los siguientes índices para las áreas de bosque presentes en la zona de estudio, dichos índices se relacionan a continuación:

Tasa promedio anual de deforestación:

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

Donde:

TMAD: Tasa promedio anual de deforestación

AB_{t1} : Área bosque momento 1

AB_{t2} : Área bosque momento 2

n: Diferencia de los años entre el momento t1 y el momento t2 (Ruiz et al., 2011).

Se calculó el porcentaje de deforestación de acuerdo a lo propuesto por (Pozzobon & Ramón, 2002)

Tasa de deforestación en porcentaje:

$$Td = \frac{AB_{t1} - Ab_{t2}}{Ab_{t1} * n} * 100$$

Donde:

Td: Tasa de deforestación por año

AB_{t1} : Área bosque momento 1

AB_{t_2} : Área bosque momento 2

n: Diferencia de los años entre el momento t1 y el momento t2

Otro cálculo realizado fue el de porcentaje de incremento de deforestación empleado por (Forero & Polanco, 2021)

Porcentaje de incremento de deforestación:

$$\%ID = \frac{TMAD_{t_2} - TMAD_{t_1}}{TMAD_{t_1}} * 100$$

Donde:

$\%ID$ = Porcentaje de incremento de deforestación

$TMAD_{t_1}$ = tasa promedio anual de deforestación en el momento 1

$TMAD_{t_2}$ = tasa promedio anual de deforestación en el momento 2

7 Resultados

El análisis multitemporal evidenció una disminución sostenida de la cobertura de bosque natural en el sector sur del Parque Nacional Natural Tinigua entre 2017 y 2024. En términos cuantitativos, se estimó una pérdida total superior a las 6.900 hectáreas aproximadamente, siendo los años 2018, 2020 y 2022 los de mayor incidencia en la transformación del paisaje.

Tabla 2. Periodos con mayor porcentaje de incremento de deforestación

RESUMEN	
Periodo	%ID
2017-2018	301.91
2020-2021	73.03
2021-2022	46.58

Las zonas más afectadas se concentraron en los límites surorientales del parque, donde se identificaron patrones de deforestación lineal y en mosaico, característicos de la apertura de caminos y parcelación de terrenos con fines ganaderos y de apropiación ilegal. Estos resultados coinciden con estudios previos como los de la Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS, 2022), los cuales han documentado que el PNN Tinigua es una de las áreas protegidas más amenazadas por la expansión de la frontera agropecuaria en el contexto

posconflicto. Del mismo modo, lo reportado por (Arias & Lugo de La Hortúa, 2015) sobre la presión antrópica en los parques nacionales amazónicos se reafirma en este estudio, al identificar un avance significativo de actividades humanas no permitidas al interior del parque. El uso de imágenes PlanetScope, con resolución de 4.7 metros por píxel, permitió detectar cambios sutiles en la cobertura vegetal que no habrían sido visibles con sensores de mayor resolución espacial. Esta capacidad de detalle facilitó la elaboración de una cartografía precisa de las coberturas y la identificación de zonas críticas, muchas de ellas coincidentes con áreas de alta biodiversidad. La información generada constituye un insumo clave para las autoridades ambientales y entidades de control territorial, al permitir focalizar esfuerzos de restauración ecológica y control de actividades ilegales en áreas prioritarias.

En las siguientes tablas se relaciona la cuantificación de áreas deforestadas de acuerdo a las clases de coberturas vegetales presentes en las imágenes satelitales por año, resultado de la clasificación supervisada ejecutada.

Los resultados obtenidos muestran que la deforestación en el área de estudio no siguió un patrón lineal, sino que presentó una dinámica oscilante con picos críticos de pérdida forestal concentrados en los años 2018, 2020 y 2022. En total, se identificaron más de cinco mil hectáreas de bosque natural transformadas, principalmente hacia usos ganaderos y agropecuarios. Esta cifra refleja una aceleración del fenómeno tras la firma del Acuerdo de Paz en 2016, en concordancia con lo reportado por (Estrada, 2024) y (Cabrera, 2020), quienes documentaron que la salida de los grupos armados de facto generó un vacío de gobernanza, permitiendo el avance de la apropiación ilegal de tierras dentro de áreas protegidas como el PNN Tinigua.

A continuación se relaciona la cuantificación de áreas resultantes de realizar la clasificación de coberturas vegetales de manera supervisada año por año:

Tabla 3. Cuantificación de áreas para las coberturas vegetales del año 2017.

Cobertura vegetal	Área (ha)	Año
Bosque denso alto de tierra firme	17200.81	2017
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	165.4	
Pastos limpios	293.73	
Bosque denso alto de tierra firme	15822.72	2018
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1040.77	

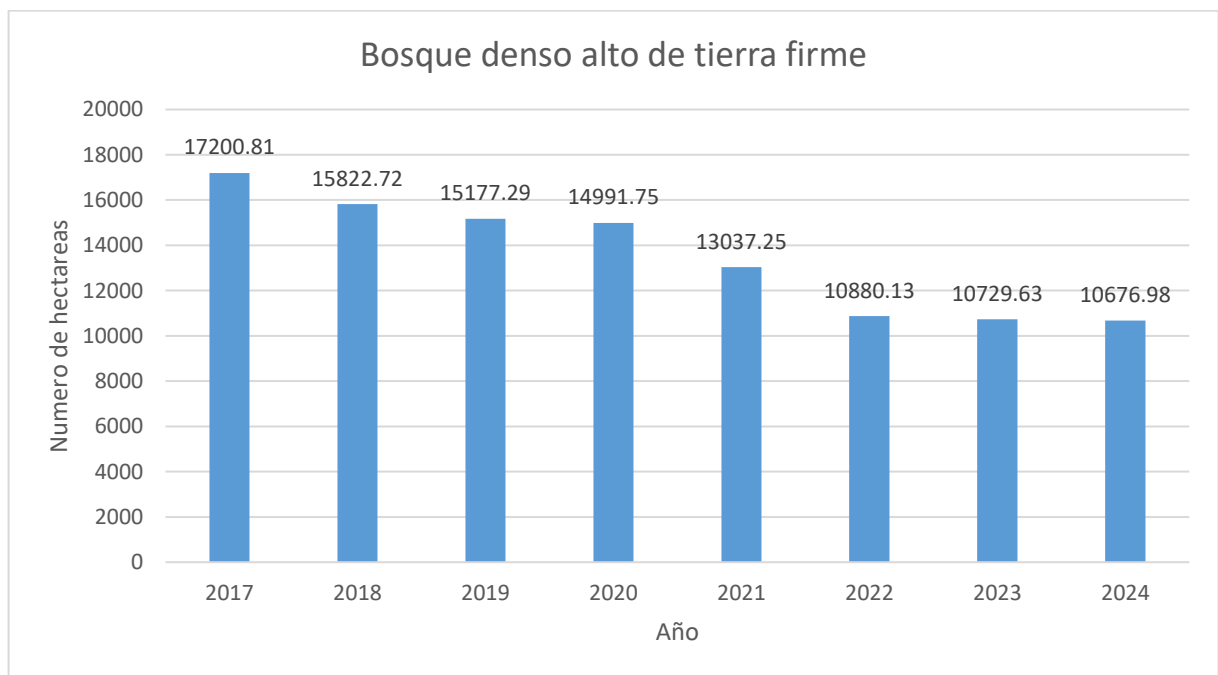
Pastos limpios	804.51	
Bosque denso alto de tierra firme	15177.29	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1638.65	2019
Pastos limpios	852.02	
Bosque denso alto de tierra firme	14991.75	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1598.77	2020
Pastos limpios	1077.44	
Bosque denso alto de tierra firme	13037.25	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3618.22	2021
Pastos limpios	312.77	
Zonas quemadas	699.72	
Bosque denso alto de tierra firme	10880.13	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5037.48	2022
Pastos limpios	1276.7	
Zonas quemadas	473.64	
Bosque denso alto de tierra firme	10729.63	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	6047.09	2023
Pastos limpios	898.18	
Bosque denso alto de tierra firme	10676.98	
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5777.34	2024
Pastos limpios	1083.16	
Zonas quemadas	104.35	

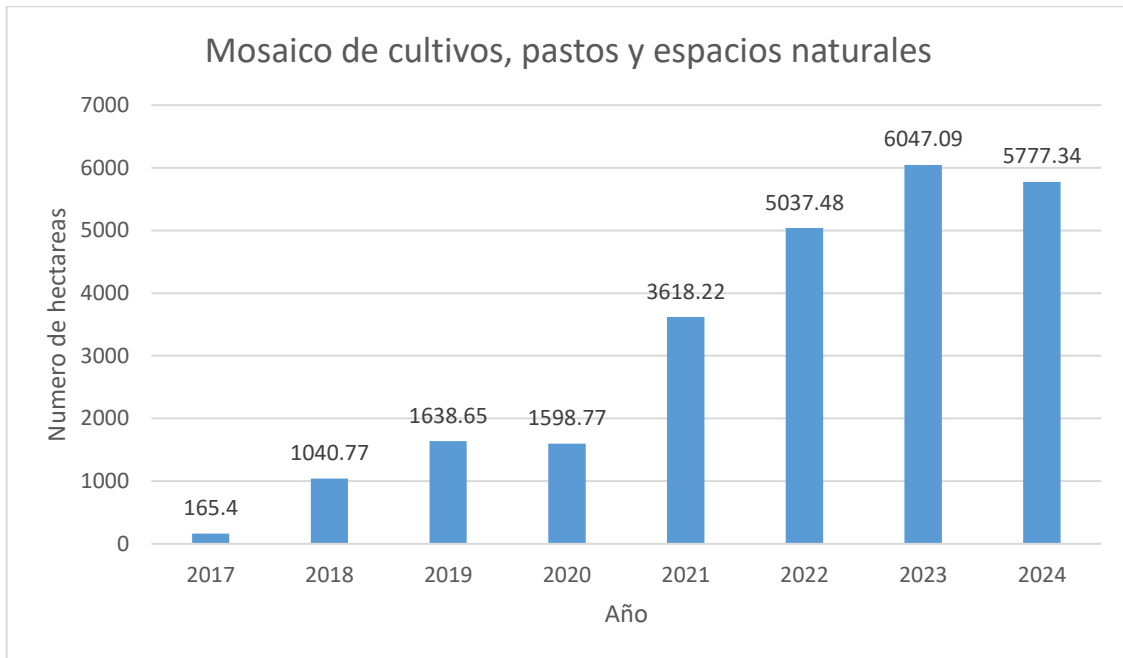
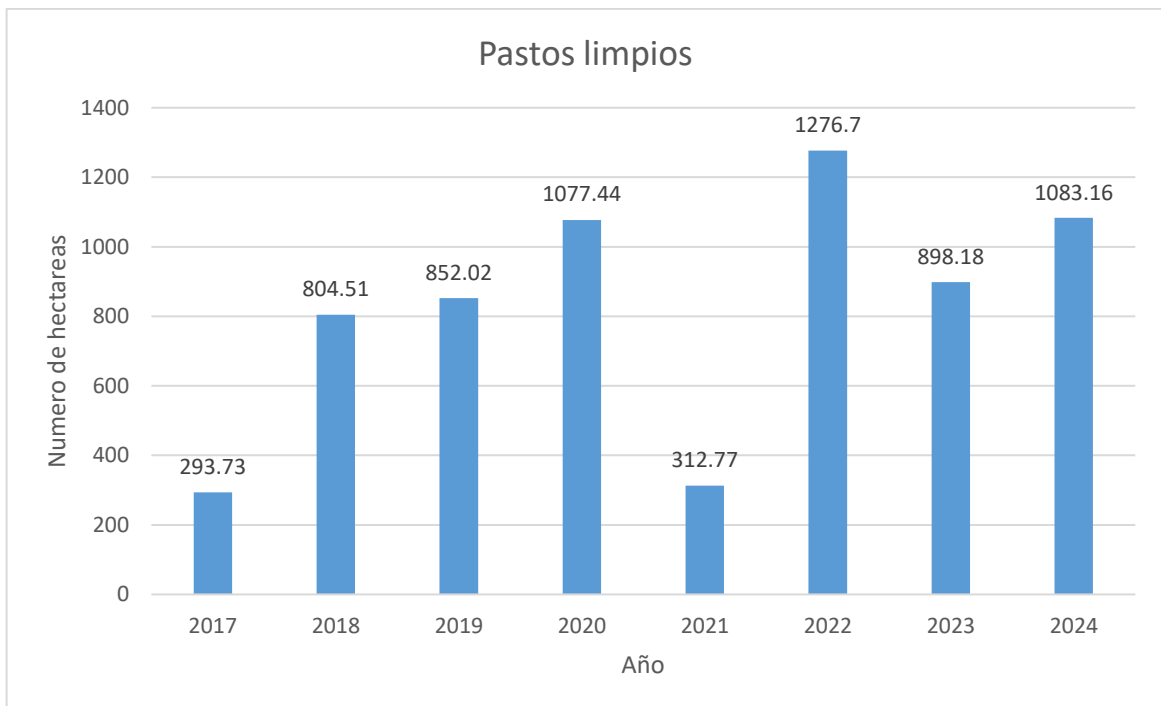
A manera de resultados se puede evidenciar que esta zona específica del PNN Tinigua ha presentado una disminución significativa en cuanto a número de hectáreas de bosque, así como también se puede observar que para los años 2022 y 2023 no hubo una disminución significativa en cuanto a número de hectáreas de bosque, lo que concuerda con (IDEAM, 2024) donde mencionan que el El Plan de Contención de la Deforestación, junto con el impulso al programa pago por servicios ambientales de las car, se convirtió en un pilar esencial para disminuir la tala de bosques en Colombia. En la Amazonía, los resultados fueron notables: la deforestación cayó en un 38%, al pasar de 71.725 hectáreas en 2022 a 44.274 hectáreas en 2023, marcando un hecho sin

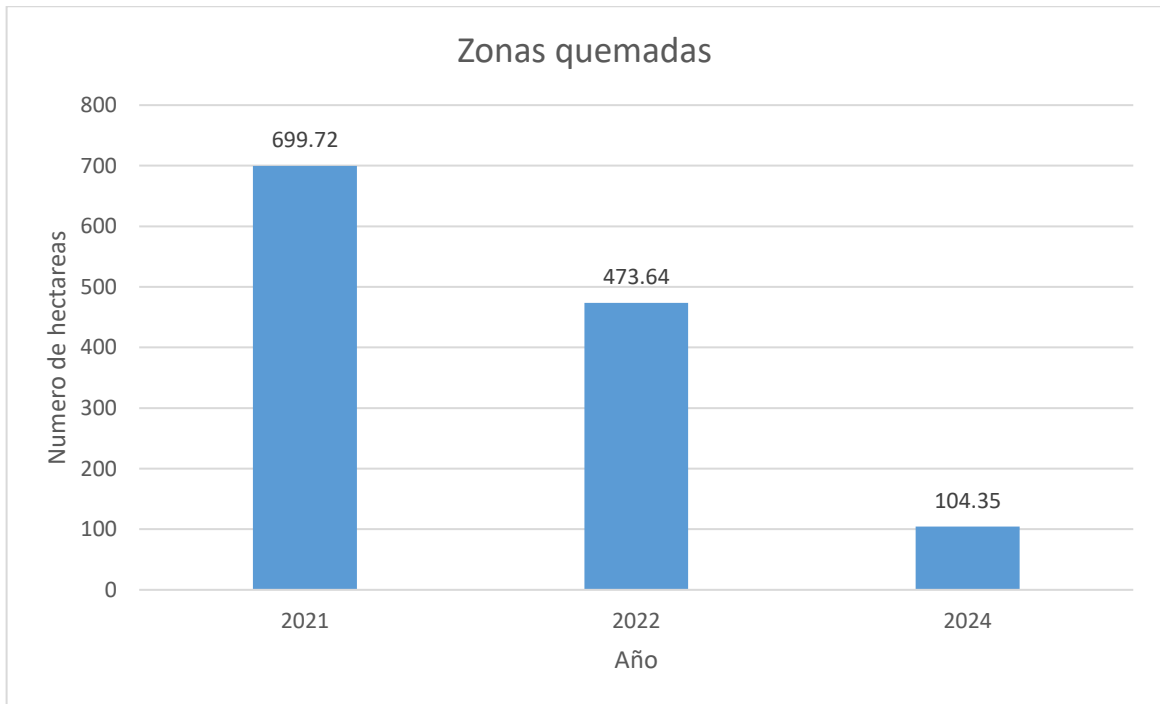
precedentes en esta región. A nivel del país, también se evidenció un avance significativo, con una reducción del 36%, lo que representó una baja de 123.517 hectáreas deforestadas en 2022 a 79.256 hectáreas en 2023. Un gran logro para el país ya que en las últimas décadas se incrementó de manera abrupta los procesos de deforestación en la amazonia colombiana.

Mediante las siguientes graficas de barras se pudo evidenciar la proporción de áreas entre las diferentes coberturas vegetales para 17.600 ha aproximadamente, área donde se realizó la clasificación supervisada.

Gráfica 1. Número de hectáreas bosque denso alto de tierra firme por año



Gráfica 2. Número de hectáreas Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales por año*Gráfica 3. Número de hectáreas pastos limpios por año*

Gráfica 4. Número de hectáreas zonas quemadas por año.

A continuación se relacionan los índices de deforestación calculados para los años comprendidos entre el 2017 y 2024 con el fin de determinar la afectación y el impacto causado en la zona de estudio:

Tabla 4. Cuantificación de áreas de bosque y área deforestada por año

Año	AREA DE BOSQUE (ha)	AREA DEFORESTADA (ha)
2017	17200.81	459.13
2018	15822.72	1845.28
2019	15177.29	2490.67
2020	14991.75	2676.21
2021	13037.25	4630.71
2022	10880.13	6787.82
2023	10729.63	6945.27
2024	10676.98	6964.85

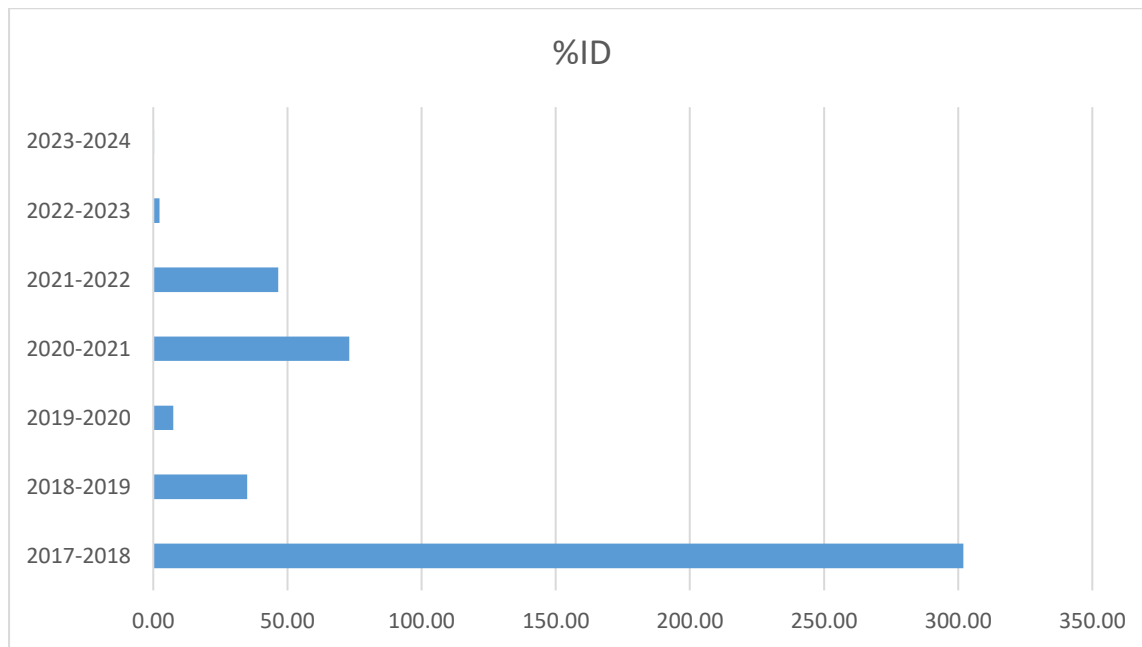
Tabla 5. Tasa promedio anual de deforestación y porcentaje de tasa de deforestación

Periodo	Td %	TMAD (ha)
2017-2018	8.01	1378.09
2018-2019	4.08	645.43
2019-2020	1.22	185.54
2020-2021	13.04	1954.5
2021-2022	16.55	2157.12
2022-2023	1.38	150.5
2023-2024	0.49	52.65

Tabla 6. Porcentaje de incremento de deforestación

Periodo	%ID
2017-2018	301.91
2018-2019	34.98
2019-2020	7.45
2020-2021	73.03
2021-2022	46.58
2022-2023	2.32
2023-2024	0.28

Gráfica 5. Porcentaje de incremento de deforestación



En la anterior grafica de barras se evidenció que para el año 2018 se presentó el mayor pico de porcentaje de deforestación en el área de estudio con un valor de 301% de incremento y ya para el año 2024 se presentó un incremento casi que nulo con un valor de 0.28%, se puede deber a que en la zona estudio ya no se encuentra cobertura boscosa, solo bosque de galería tal como se evidencia en la (figura 14).

Índice de kappa y matriz de confusión

Con las clasificaciones realizadas y a manera de comprobación de exactitud de la clasificación se ejecutó el procesamiento para calcular el índice de kappa y la matriz de confusión en porcentajes.

De la siguiente manera se relacionan las matrices generadas por el software Arcgis Pro versión 3.3.0, siendo:

C_1: Bosque denso alto de tierra firme

C_2: Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales

C_3: Pastos limpios

C_4: Zonas quemadas

P_Accuracy: Exactitud de la matriz

Figura 11. Aplicación de la herramienta Create Accuracy Assessment Points

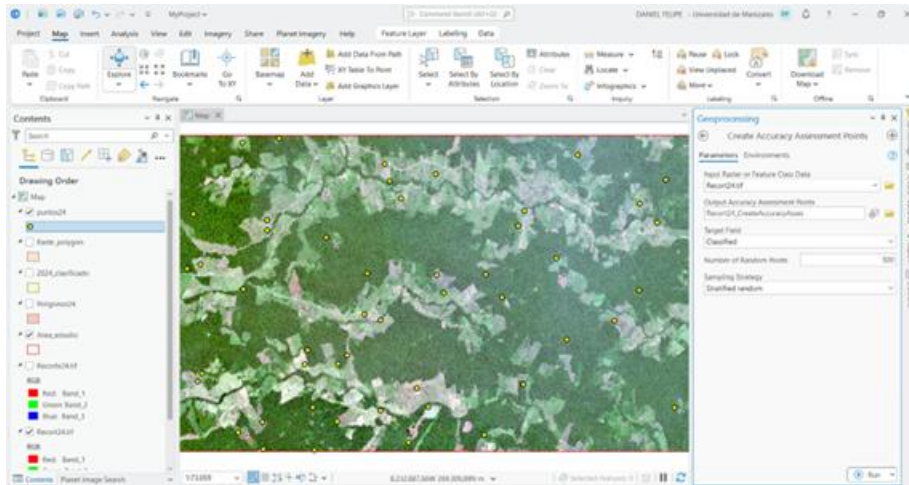


Figura 12. Aplicación de la herramienta Compute Confusion Matrix

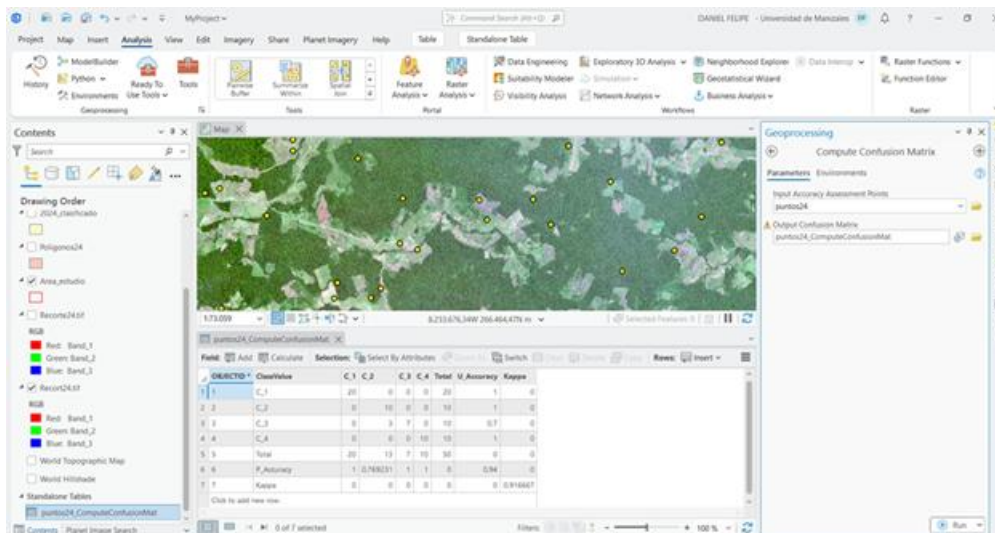


Tabla 7. Matriz de confusión año 2017

ID	CLASSVALUE	C1	C2	C3	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C1	29	0	0	29	1	0
2	C2	0	10	0	10	1	0
3	C3	1	3	6	10	0.6	0
4	Total	30	13	6	49	0	0

5	P_Accuracy	0.9666	0.7692	1	0	0.91	0
6	Kappa	0	0	0	0	0	0.8538

Tabla 8. Matriz de confusión año 2018

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	27	0	0	27	1.0	0
2	C_2	0	8	2	10	0.8	0
3	C_3	0	2	8	10	0.8	0
4	Total	27	10	10	47	-	0
5	P_Accuracy	1.0	0.8	0.8	-	0.914894	0
6	Kappa	0	0	0	0	-	0.853125

Tabla 9. Matriz de confusión año 2019

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	26	0	0	26	1.0	0
2	C_2	0	10	0	10	1.0	0
3	C_3	1	1	8	10	0.8	0
4	Total	27	11	8	46	-	0
5	P_Accuracy	0.962963	0.909091	1.0	-	0.956522	0
6	Kappa	0	0	0	0	-	0.924837

Tabla 10. Matriz de confusión año 2020

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	25	0	0	25	1.0	0

2	C_2	0	9	1	10	0.9	0
3	C_3	0	2	8	10	0.8	0
4	Total	25	11	9	45	–	0
5	P_Accuracy	1.0	0.818182	0.888889	–	0.933333	0
6	Kappa	0	0	0	0	–	0.8875

Tabla 11. Matriz de confusión año 2021

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	C_4	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	21	1	0	0	22	0.954545	0
2	C_2	0	8	1	1	10	0.8	0
3	C_3	0	1	9	0	10	0.9	0
4	C_4	0	0	1	9	10	0.9	0
5	Total	21	10	11	10	52	–	0
6	P_Accuracy	1.0	0.8	0.818182	0.9	–	0.903846	0
7	Kappa	0	0	0	0	0	–	0.865424

Tabla 12. Matriz de confusión año 2022

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	C_4	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	18	0	0	0	18	1.0	0
2	C_2	0	8	1	0	9	0.888889	0
3	C_3	0	0	10	0	10	1.0	0

4	C_4	0	0	0	10	10	1.0	0
5	Total	18	8	11	10	47	-	0
6	P_Accuracy	1.0	1.0	0.909091	1.0	-	0.978723	0
7	Kappa	0	0	0	0	0	-	0.97068

Tabla 13. Matriz de confusión año 2023

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	20	0	0	20	1.0	0
2	C_2	0	10	0	10	1.0	0
3	C_3	0	1	9	10	0.9	0
4	Total	20	11	9	40	-	0
5	P_Accuracy	1.0	0.909091	1.0	-	0.975	0
6	Kappa	0	0	0	0	-	0.96

Tabla 14. Matriz de confusión año 2024

OBJECTID	ClassValue	C_1	C_2	C_3	C_4	Total	U_Accuracy	Kappa
1	C_1	20	0	0	0	20	1.0	0
2	C_2	0	10	0	0	10	1.0	0
3	C_3	0	0	3	7	10	0.7	0
4	C_4	0	0	0	10	10	1.0	0
5	Total	20	13	7	10	50	-	0
6	P_Accuracy	1.0	0.769231	1.0	1.0	-	0.94	0

7	Kappa	0	0	0	0	0	-	0.916667
---	-------	---	---	---	---	---	---	----------

Como se pudo evidenciar en las diferentes matrices relacionadas, todas presentan un porcentaje alto de exactitud tanto en la matriz como en el índice kappa, De acuerdo con (Zárate Luján & Torres Llanos, 2019), los valores del índice Kappa pueden interpretarse de la siguiente manera, donde un valor entre 0.81 y 1.00 indica un acuerdo casi perfecto, entre 0.61 y 0.80 sustancial, entre 0.41 y 0.60 moderado, y por debajo de 0.40, bajo o deficiente. Esta interpretación permite establecer la calidad del modelo de clasificación, siendo recomendable alcanzar valores superiores a 0.75 en estudios aplicados a imágenes satelitales de alta resolución. Lo que indicó una muy buena asignación de clases de coberturas vegetales en el procesamiento de clasificación ya que para todos los años se registraron valores superiores a 0.75, resultado que genera una alta confiabilidad con relación a la realidad en campo.

Para dimensionar los procesos y herramientas ejecutadas para la clasificación de coberturas vegetales en el PNN se desarrolló un modelo en Model Builder de ArcGis Pro el cual quedó de la siguiente manera:

Figura 13. Modelo espacial clasificación supervisada método Maximun Likelihood

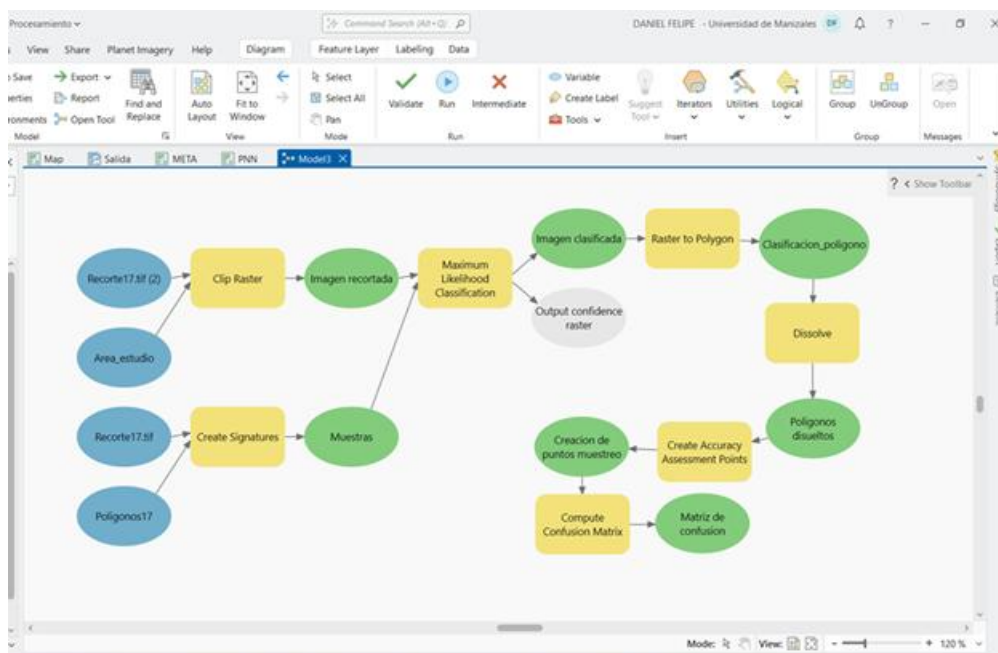
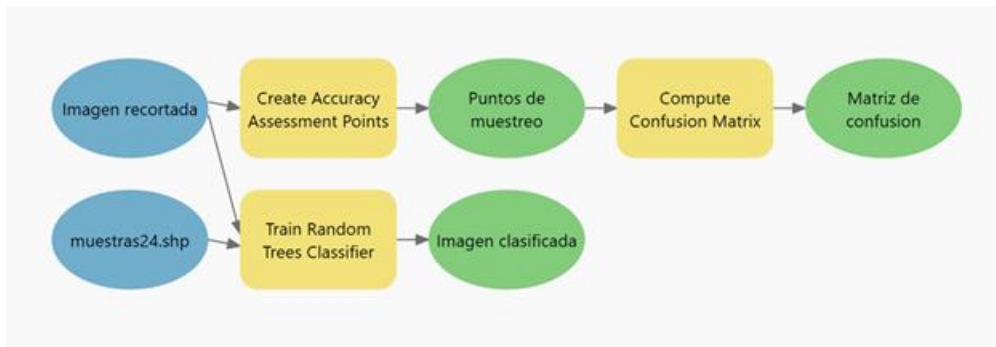


Figura 14. Modelo espacial clasificación supervisada método Random Trees



Acto seguido se realizaron las salidas graficas de los diferentes años del periodo de estudio con el fin de visualizar el cambio de coberturas vegetales a través de los años:

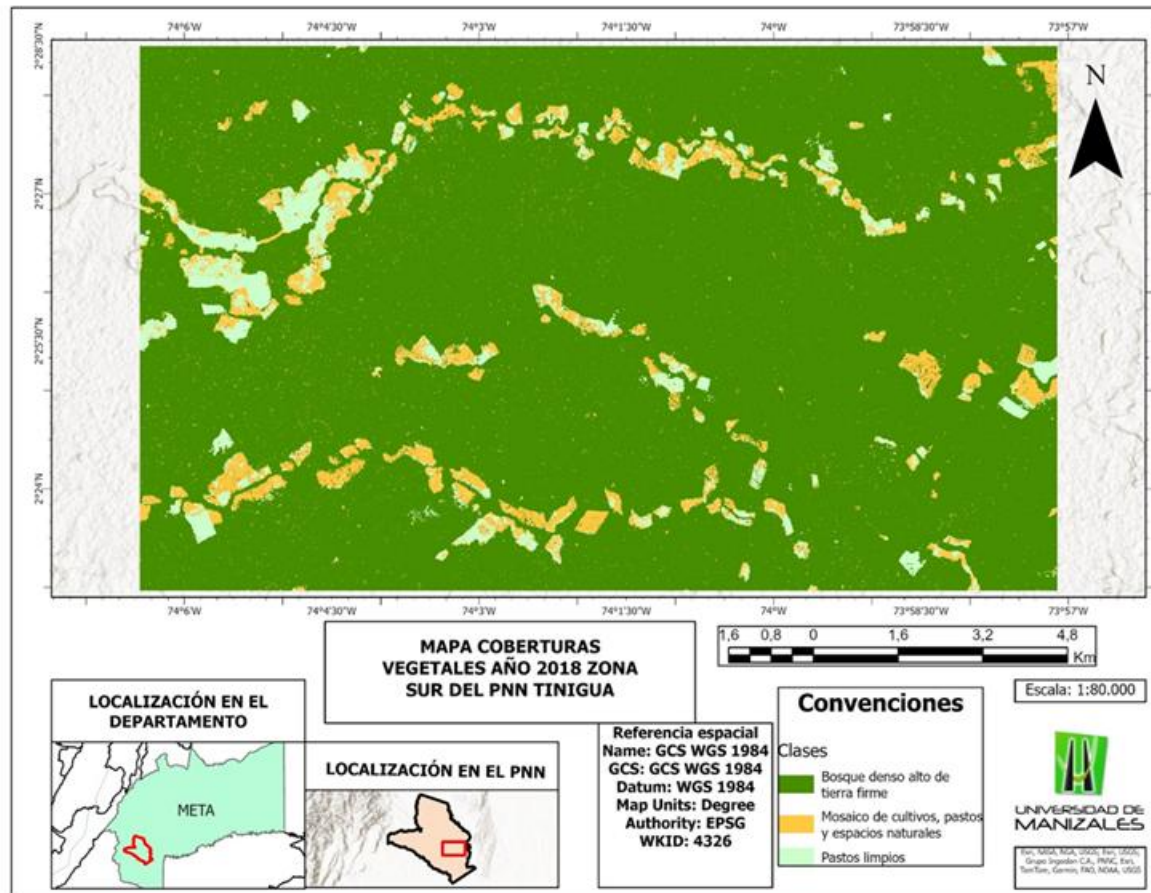


Figura 17. Mapa de coberturas vegetales año 2019

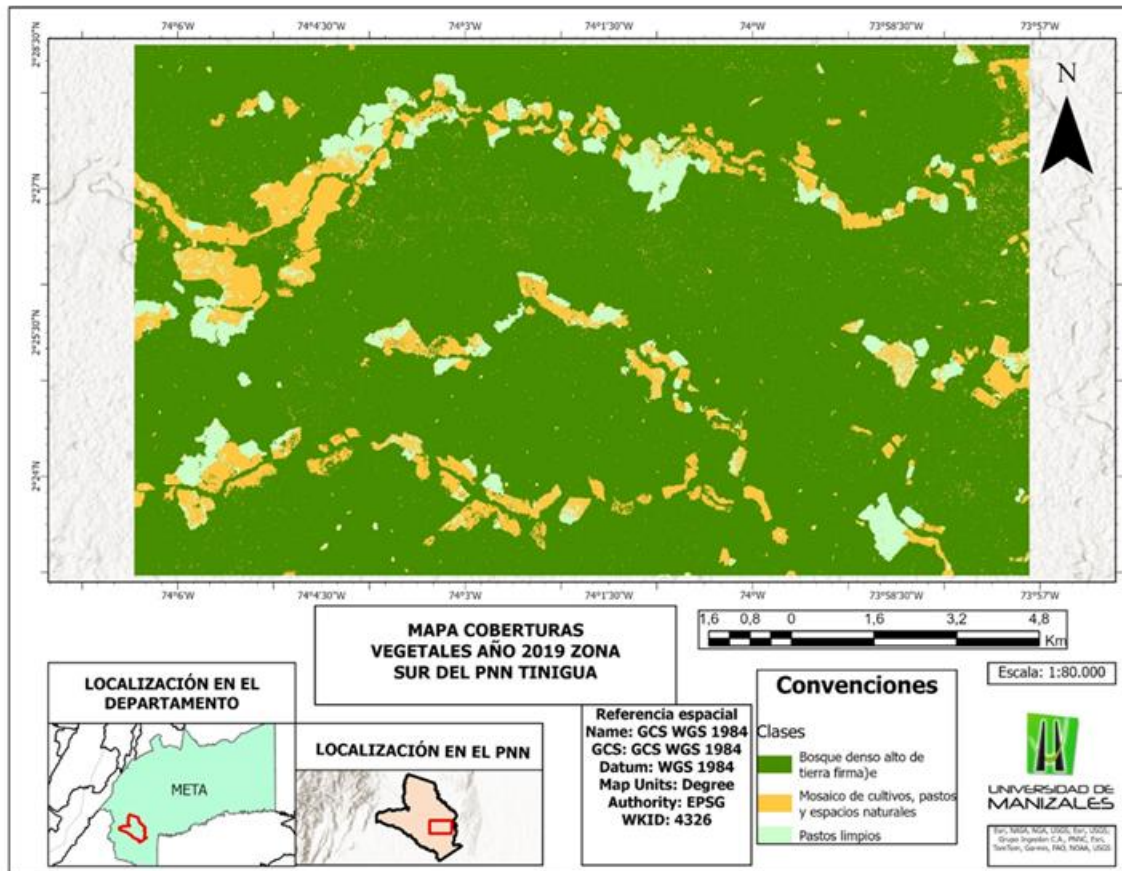


Figura 18. Mapa de coberturas vegetales año 2020

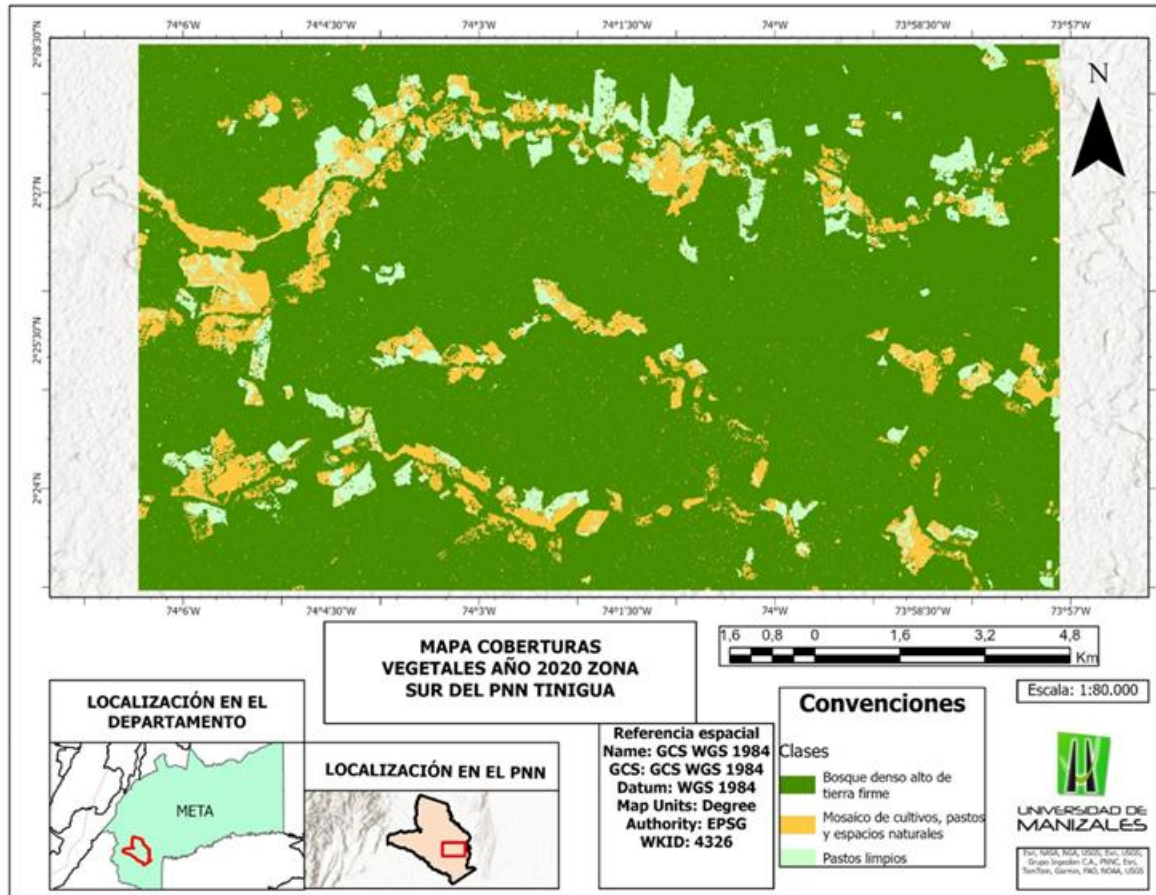


Figura 19. Mapa de coberturas vegetales año 2021

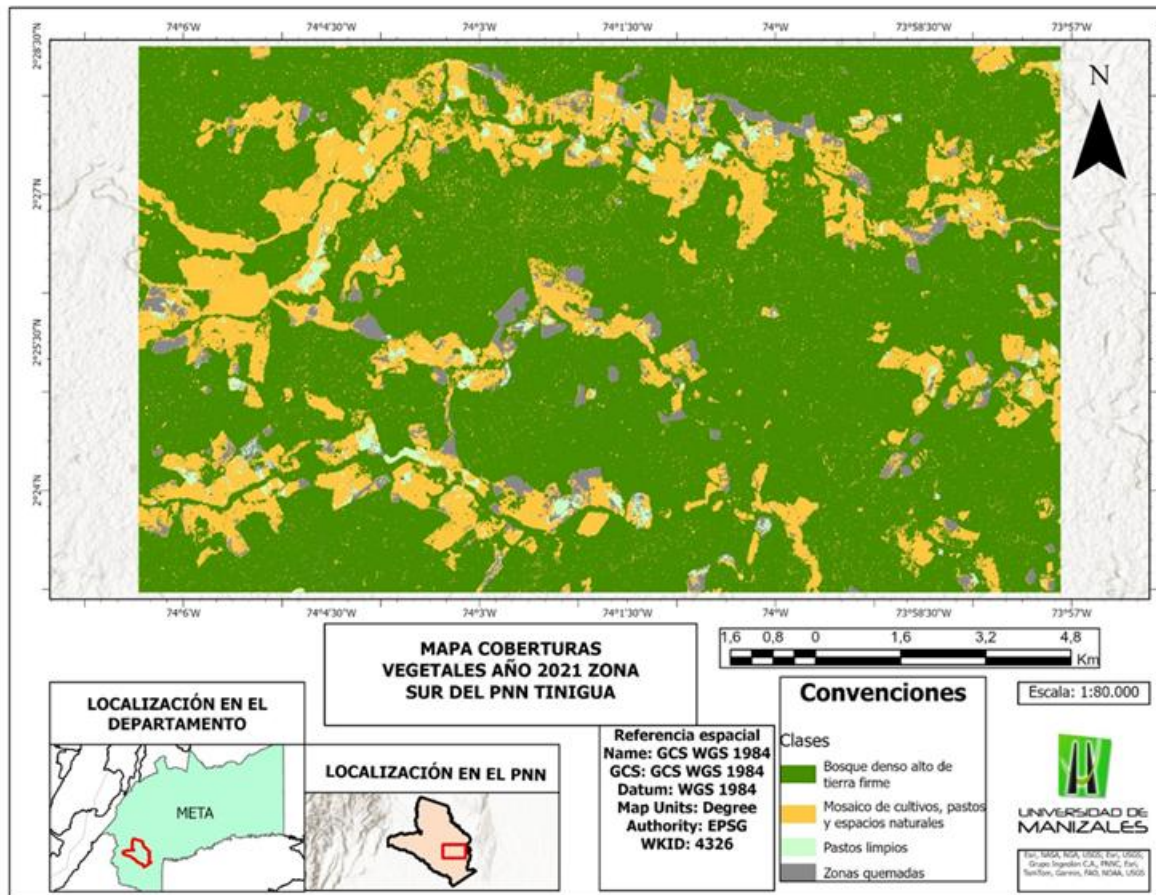


Figura 20. Mapa de coberturas vegetales año 2022

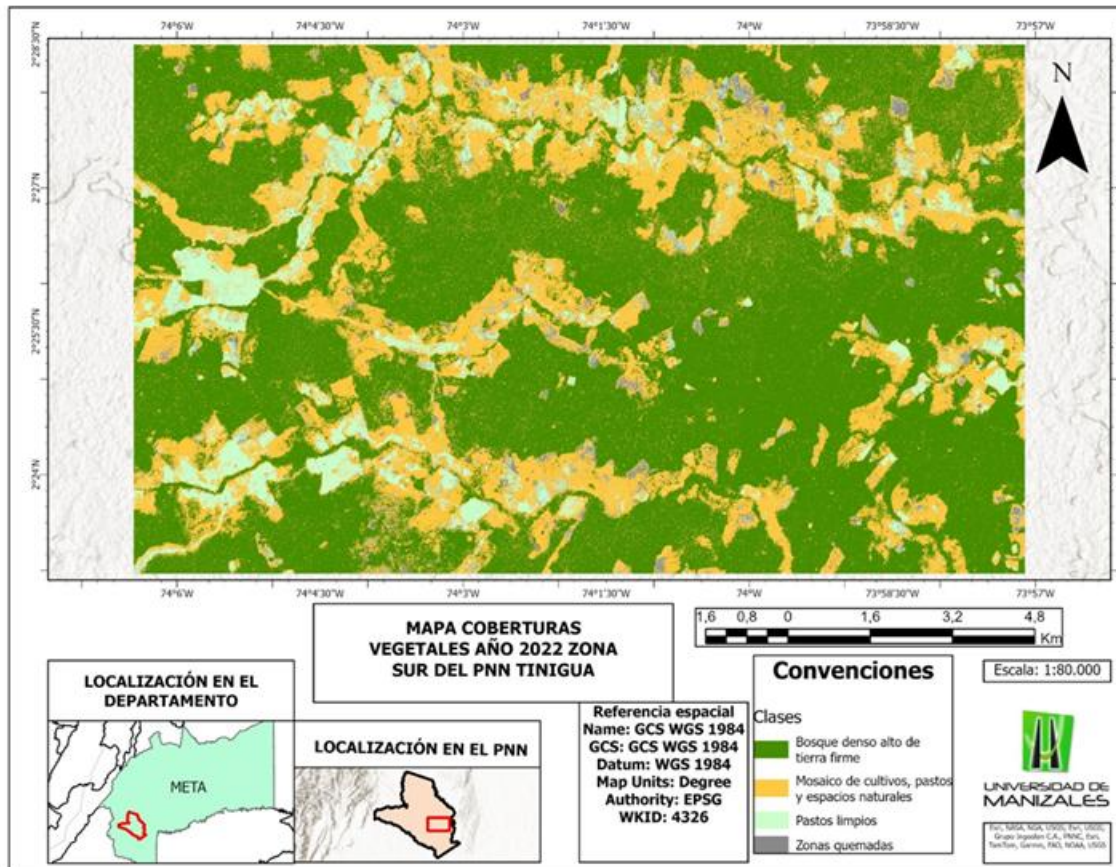


Figura 21. Mapa de coberturas vegetales año 2023

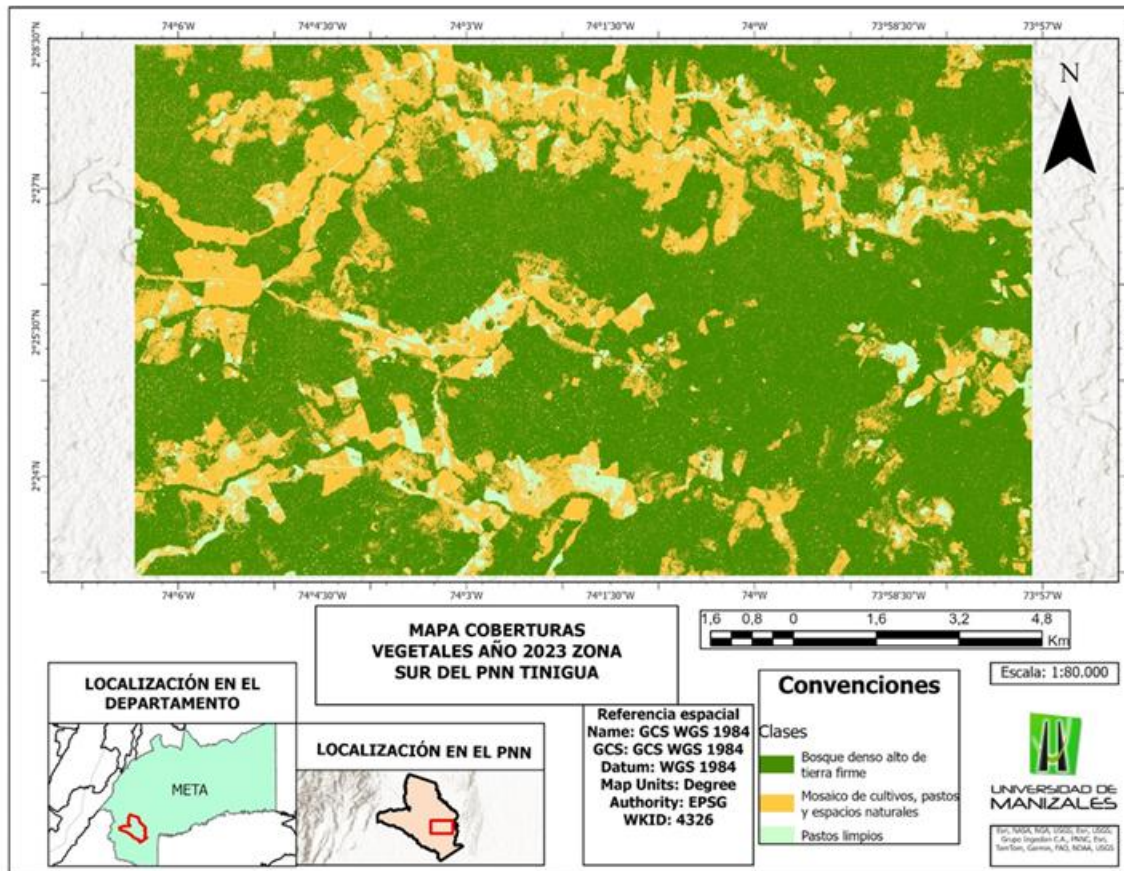
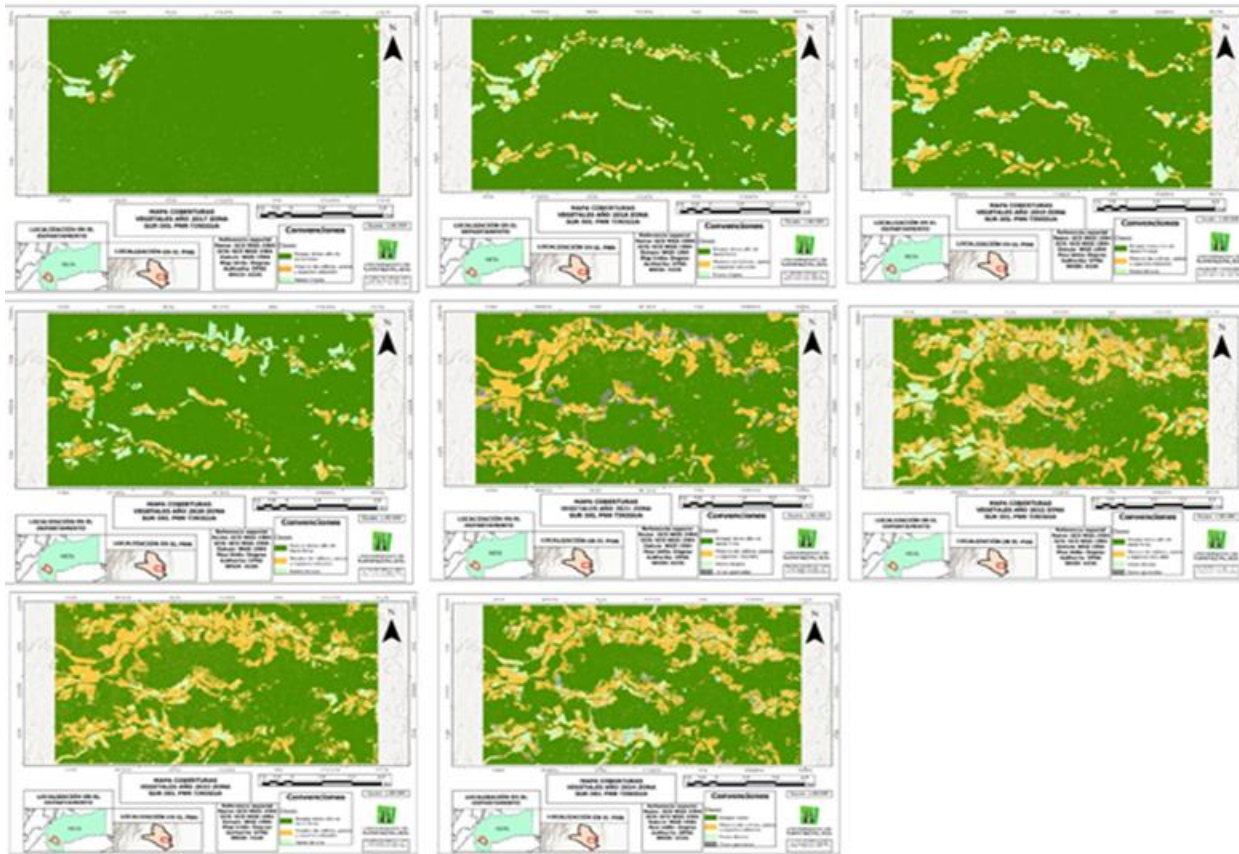
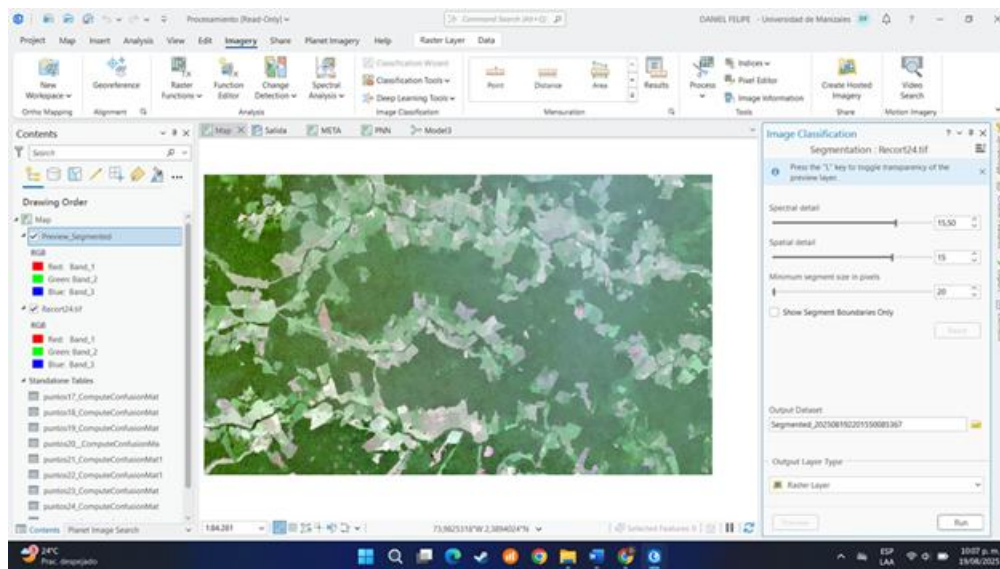


Figura 22. Mapa de coberturas vegetales año 2024



A manera comparativa se realizó la clasificación supervisada utilizando el método Random Trees con el fin de analizar cual metodología se ajusta más al proyecto. Partiendo de lo anteriormente mencionada se procedió a realizar el procesamiento con las imágenes satelitales del área de estudio, para ello en el software ArcGis Pro en la pestaña Imagery en herramientas de clasificación como primer paso, se generó una segmentación para agrupación de polígonos para una mejor selección de clases como se muestra en la siguiente ilustración:

Figura 24. Generación del mapa de segmentación



Acto seguido se procedió a realizar la clasificación mediante la herramienta Classify, donde como insumo se añadieron las muestras de clases de acuerdo a zonas boscosas, suelos desnudos, estériles, bosque secundario, y así generar el raster con la imagen clasificada de la siguiente manera:

Ilustración 1. Herramienta Classify para la imagen satelital

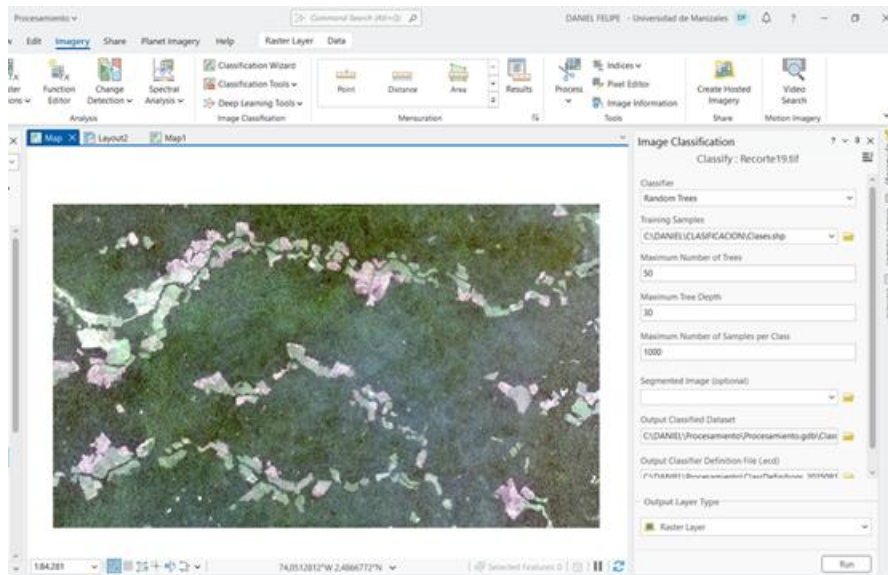
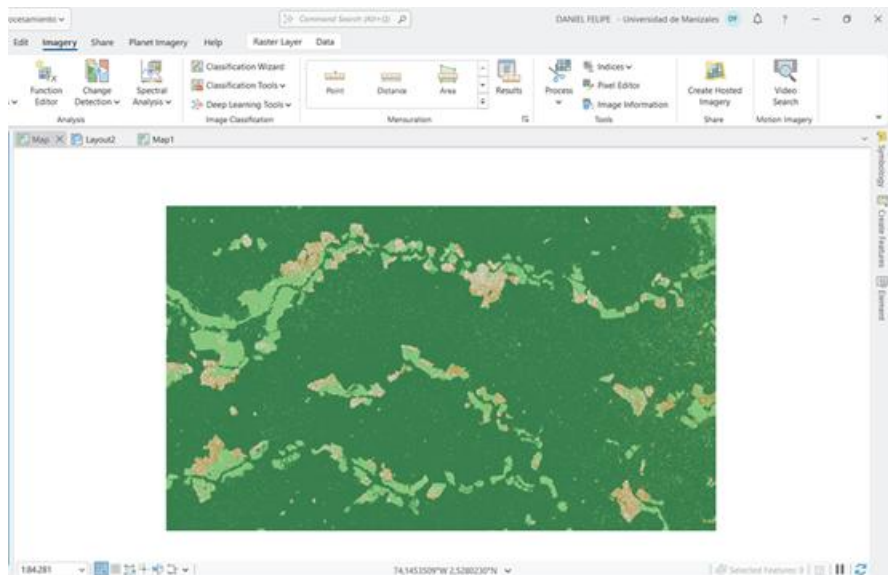


Ilustración 2. Resultado de la clasificación metodología Random Trees



Para terminar el procesamiento de esta metodología se generaron las matrices de índice de kappa y matriz de confusión, a manera de ejemplo se adjunta la del año 2019:

Tabla 15. Matriz de confusión e índice Kappa año 2019

OBJECTID	ClassValue	C_30	C_41	C_42	C_50	Total	U_Accuracy	Kappa
----------	------------	------	------	------	------	-------	------------	-------

1	C_30	16	0	0	0	16	1	0
2	C_41	0	51	0	0	51	1	0
3	C_42	0	0	419	0	419	1	0
4	C_50	0	0	0	14	14	1	0
5	Total	16	51	419	14	500	0	0
6	P_Accuracy	1	1	1	1	0	1	0
7	Kappa	0	0	0	0	0	0	1

Como resultado de la clasificación se generaron salidas graficas con todos sus ítems para su interpretación, tal como se puede observar en la siguiente ilustración:

Ilustración 3. Clasificación supervisada método Random Trees año 2019

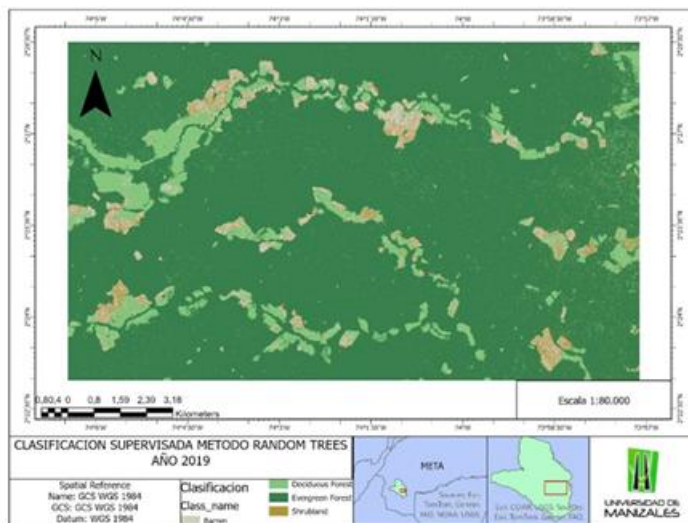
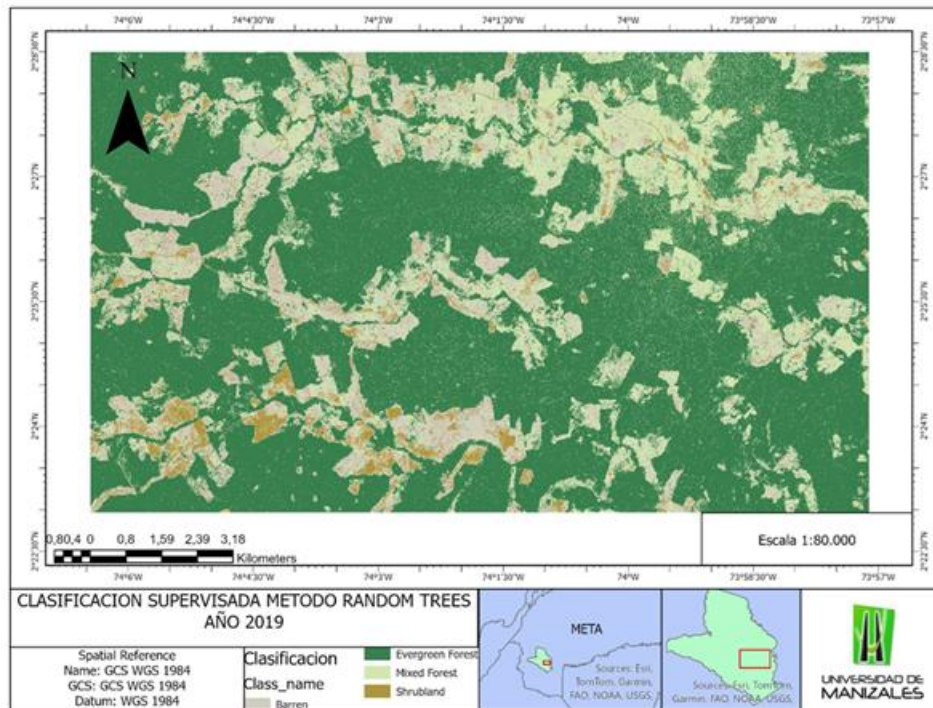


Ilustración 4. Clasificación supervisada método Random Trees año 2024



De esta forma, ejecutando las dos metodologías de clasificaciones se realizaron las comparaciones de dichos resultados, donde si bien es cierto la metodología de Random Trees arroja mayor precisión en cuanto a porcentaje en la matriz de confusión y el índice de Kappa, es importante tener un margen de error el cual en la clasificación de Maximum Likelihood se encuentra por encima del 80% de precisión, lo que indica una alta confiabilidad en el procesamiento realizado, además de poder aplicar la metodología de Corine Land Cover para una mayor interpretación de las salidas graficas año tras año con el fin de evidenciar las zonas que fueron mas susceptibles a procesos de deforestación.

8 Discusión

El análisis multitemporal realizado mediante clasificaciones supervisadas como se muestra en los resultados, ilustra un evidente proceso de deforestación en la zona sur del PNN Tinigua con

un aproximado de siete mil hectáreas convertidas en pastos y cultivos mayoritariamente para la implementación de ganadería extensiva, cultivos ilícitos y a través de estos la comercialización ilegal de madera de bosques naturales. (Arias & Lugo de La Hortúa, 2015) en su investigación para el PNN Tinigua encontraron que en el periodo entre el año 2000 y 2015 se deforestaron aproximadamente 7800 hectáreas por año, cifra que se asemeja a la calculada en el presente trabajo de grado. Además de lo mencionado anteriormente evidenciaron intervenciones y afectaciones del área protegida.

(Simbaqueba, 2024) en su investigación de análisis multitemporal menciona que para el año 2017 en el parque se disparó la deforestación tras la firma de los acuerdos de paz, así como también se evidencio una reducción no tan significativa del año 2019 en adelante a raíz de la operación artemisa ejecutada por parte del gobierno nacional.

Por su parte (Estrada, 2024) realizó un análisis espacio temporal para los PNN Chiribiquete, Tinigua y Sierra de La Macarena, donde pudo determinar que los puntos de calor y cicatrices de quema incrementaron de manera significativa en los años 2018, 2020 y 2022, evidencias que concuerdan con lo analizado y encontrado en el presente estudio para lo zona sur del PNN Tinigua. Debido a estas actividades Municipios como San Vicente del Caguán, Vistahermosa, y La Macarena mostraron un crecimiento sustancial en la actividad ganadera, directamente vinculada a la conversión de tierras forestales en pastizales.

(Murillo, 2021) realizó clasificaciones supervisadas con el fin de analizar los procesos de deforestación y cambios de coberturas vegetales en la Reserva Nacional Natural Nukak posterior al acto que generó la firma de los acuerdos de paz donde menciona que: “la tasa de deforestación disminuyó después de la firma de los acuerdos de paz, y aunque si bien siguió existiendo deforestación, en el periodo preacuerdo se deforestó el 2.014% de la reserva mientras que en el periodo post acuerdo se deforestó el 1.09%.”.

Un estudio reciente en Ecuador realizado por (Quezada et al., 2022) hace un análisis para una provincia de mencionado país entre los años 2000 y 2020 usando imágenes satelitales Landsat, encontrando una evidente transición, cambio del uso del suelo y cobertura vegetal donde la cobertura de bosque disminuyó 1'297.636 hectáreas, el bosque inundable también disminuyó 394.2 hectáreas y se pudo determinar que el crecimiento urbano y pastizales aumentaron en 4.05 y 254.03 hectáreas respectivamente.

Desde un enfoque global, estudios como el de (Beuchle et al., 2021) desarrollado para la Comisión Europea, subrayan que la deforestación en áreas protegidas de la Amazonía, África Central y el Sudeste Asiático continúa en ascenso, a pesar de los compromisos multilaterales de conservación. El uso de tecnologías como Sentinel-2 y Landsat ha permitido evidenciar que las zonas más vulnerables corresponden a aquellas con baja gobernanza y escasa participación comunitaria. Esta observación resulta pertinente para el caso del PNN Tinigua, donde se identifica una débil presencia institucional y una limitada articulación con las comunidades locales para garantizar la protección del bosque. La falta de mecanismos eficaces de control territorial facilita la expansión de actividades extractivas e ilegales dentro del parque.

Complementando esta perspectiva global, (Yanai et al., 2022) en su estudio sobre parques amazónicos de Brasil, plantean que la deforestación debe entenderse no solo desde su dimensión espacial y ecológica, sino también como un reflejo de desigualdades estructurales y la ausencia del Estado. Sus hallazgos, basados en los picos de deforestación en regiones como Pará y Rondônia, muestran que estos eventos están directamente relacionados con políticas de flexibilización ambiental, expansión de la frontera agropecuaria y el debilitamiento de los marcos regulatorios. Este análisis crítico se alinea con la situación observada en Tinigua, donde tras el Acuerdo de Paz, el incremento de la tenencia informal de la tierra, la ganadería extensiva y las actividades ilegales ha socavado la integridad ecológica del parque.

En coherencia con estas tendencias globales, (Quezada et al., 2022) realizaron un análisis multitemporal en una provincia de Ecuador entre 2000 y 2020 utilizando imágenes Landsat, identificando una disminución sustancial en la cobertura de bosque (1'297.636 hectáreas) y de bosques inundables (394.2 hectáreas), junto con un aumento en los pastizales y áreas urbanas. Este tipo de estudios regionales permiten establecer paralelos importantes con lo observado en el PNN Tinigua, ya que revelan patrones comunes de transformación del paisaje en áreas de alta biodiversidad bajo presión antrópica.

A nivel regional, (Estrada, 2024) desarrolló un análisis espaciotemporal en los parques nacionales naturales Serranía del Chiribiquete, Tinigua y La Macarena, utilizando modelos estadísticos avanzados (regresión lineal múltiple, GAM y Ridge) e indicadores como puntos de calor, cicatrices de quema y presión ganadera. Este análisis evidenció picos de actividad en los

años 2018, 2020 y 2022, especialmente en municipios como La Macarena, San Vicente del Caguán y Vistahermosa. Estos hallazgos coinciden con los obtenidos en el presente trabajo para la zona sur del Parque Nacional Natural Tinigua, donde se identificó un patrón consistente de avance de la frontera agropecuaria asociado a procesos de praderización y ganadería extensiva.

El estudio de Estrada también destaca el desarrollo de un Indicador de Riesgo de Deforestación (IRD), fundamentado en datos de alta resolución espacial y temporal, procesados mediante herramientas como Google Earth Engine y Dynamic World. Esta metodología permitió identificar zonas críticas dentro y alrededor de los parques naturales, validando la relación estadística entre la intensidad del uso ganadero y la aceleración del proceso de degradación forestal.

Ampliando esta perspectiva, (Murillo Malaver, 2022) en su estudio sobre la Reserva Nacional Natural Nukak, también identificó dinámicas similares. Su análisis, basado en técnicas de clasificación supervisada sobre imágenes satelitales multitemporales, evidenció que, aunque la tasa de deforestación disminuyó tras la firma de los Acuerdos de Paz, esta persistió de forma significativa. En el periodo preacuerdo (2011–2016), se deforestaron en promedio 3 906 hectáreas por año, mientras que en el periodo postacuerdo (2016–2022) la cifra fue de 1 590 hectáreas por año. Aunque esto representa una reducción del 59%, el autor concluye que los factores estructurales que impulsan la deforestación —como la ausencia de gobernanza, el conflicto por el uso del suelo y la presión por actividades ilegales— no fueron abordados de manera efectiva, lo que permitió la continuidad del proceso de pérdida de cobertura boscosa.

La tendencia de pérdida forestal identificada en Tinigua también guarda estrecha relación con los hallazgos de (Bonilla-Mejía & Higuera-Mendieta, 2019), quienes determinaron que cerca del 36 % de los Parques Nacionales Naturales en Colombia experimentaron aumentos en las tasas de deforestación tras la firma del Acuerdo de Paz. Según estos autores, muchas de estas áreas protegidas se convirtieron en territorios de disputa ante la ausencia de control estatal efectivo, lo cual refuerza la hipótesis de que el proceso de paz, aunque necesario, no fue acompañado por una presencia institucional robusta que garantizara la gobernabilidad ambiental en zonas estratégicas.

A esto se suma el reciente reporte (Finer, 2025) elaborado por la Amazon Conservation Association y la Fundación para la Conservación y el Desarrollo Sostenible (FCDS), el cual

documenta un repunte alarmante de deforestación en los parques Chiribiquete, Tinigua y La Macarena durante el periodo 2024–2025. El informe, basado en imágenes satelitales de alta resolución y monitoreo de puntos de calor, muestra cómo la deforestación ha cambiado de patrón: en lugar de concentrarse en las zonas periféricas, ahora afecta franjas previamente estables dentro del núcleo de conservación. Este comportamiento ha sido igualmente identificado en el presente análisis multitemporal para la zona sur de Tinigua.

Es por esto que el análisis multitemporal realizado mediante clasificaciones supervisadas evidencia un proceso continuo y acelerado de deforestación en la zona sur del Parque Nacional Natural Tinigua. Desde el año 2015, la presión sobre este ecosistema ha incrementado significativamente. Entre 2021 y 2022, se perdieron más de 8 000 hectáreas debido a factores como la expansión de la ganadería extensiva, la apropiación ilegal de tierras y la presencia de cultivos ilícitos. Esta tendencia se agravó en 2024, cuando se registró la pérdida de aproximadamente 14 000 hectáreas adicionales, consolidando a Tinigua como una de las áreas protegidas más afectadas del país. Según el observatorio *Parques Nacionales Cómo Vamos*, entre 2013 y 2023 se acumularon cerca de 42 500 hectáreas deforestadas, reflejando una crisis ambiental de gran escala. (Bautista, 2022; FCDS, 2022; Mendoza et al., 2024; Paz, 2021).

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por la Coordinación Nacional de Territorios Indígenas (Parra, 2023) que señala un marcado incremento de la deforestación en la Amazonía colombiana desde 2017, en coincidencia con el repliegue del control territorial tras la firma del Acuerdo de Paz con las FARC. Este vacío fue rápidamente ocupado por actores ilegales, quienes impulsaron nuevas dinámicas de apropiación de tierras, ganadería extensiva y expansión de economías extractivas, con efectos directos sobre los ecosistemas amazónicos. Si bien se han implementado operativos como la “Operación Artemisa” para frenar estos procesos, los resultados han sido limitados y, en algunos casos, han generado tensiones con comunidades locales e indígenas, sin lograr revertir la tendencia general de pérdida de cobertura boscosa

Finalmente, investigaciones periodísticas como las de (Paz, 2025) han señalado que el narcotráfico ha sido un factor determinante en la aceleración de la deforestación dentro del PNN Tinigua. La instalación de corredores de producción y tráfico ha incentivado la apertura de caminos clandestinos y la conversión de bosques en áreas para cultivos ilícitos y pastizales. Estas dinámicas

se evidencian en las imágenes satelitales como mosaicos de cultivos y zonas abiertas de reciente intervención. La débil capacidad de respuesta de las instituciones estatales frente a estas amenazas resalta la necesidad de una estrategia de conservación más integral y articulada, que involucre no solo a las autoridades ambientales y a las comunidades locales, sino también a organismos internacionales que puedan brindar apoyo técnico, financiero y de gobernanza.

Como investigadores de este fenómeno en el Parque Nacional Natural Tinigua, consideramos que la deforestación debe entenderse no solo como una pérdida física de cobertura boscosa, sino como la manifestación de un desequilibrio profundo entre lo ambiental, lo institucional y lo social. A lo largo del análisis multitemporal que desarrollamos, observamos que los vacíos en la gobernanza territorial, sumados a las presiones económicas y sociales de las comunidades acentuadas en el parque, han generado un modelo de ocupación informal del territorio que transforma de forma silenciosa pero persistente los ecosistemas. Esta situación refleja la urgencia de implementar una visión de conservación que no se base únicamente en la prohibición o el control, sino en la participación activa de las comunidades, el fortalecimiento del monitoreo geoespacial y el compromiso real del Estado para garantizar la sostenibilidad de estos ecosistemas estratégicos. En mi opinión, la conservación efectiva solo será posible si se articulan la ciencia, la tecnología y la justicia social en un mismo enfoque territorial.

9 Conclusiones

La deforestación en la zona sur del PNN Tinigua presenta una dinámica creciente, intensificada tras el Acuerdo de Paz, cuando aumentó la ocupación ilegal del territorio.

La firma del Acuerdo de Paz en 2016 representó un punto de inflexión para los ecosistemas del sur del PNN Tinigua. Si bien trajo consigo una reducción de los enfrentamientos armados, también dejó un vacío de control institucional que facilitó el ingreso masivo de actores ilegales. La ocupación del territorio para fines agropecuarios no planificados y actividades extractivas incrementó la presión sobre el bosque, generando fragmentación ecológica, pérdida de biodiversidad y debilitamiento del tejido socioambiental.

El uso de imágenes PlanetScope con una resolución espacial de hasta 3 metros, junto con el análisis multitemporal, permitió establecer la evolución espacio-temporal de la deforestación con un alto grado de detalle. Esta precisión posibilita no solo una mejor comprensión de las dinámicas de cambio, sino también la elaboración de alertas tempranas y acciones focalizadas de conservación y control ambiental.

La metodología empleada demostró ser eficaz para detectar cambios sutiles en la cobertura vegetal, revelando áreas críticas de intervención prioritaria.

La metodología basada en la clasificación supervisada y la aplicación del esquema Corine Land Cover (CLC) se reveló como una herramienta robusta para la detección y cuantificación de cambios en la cobertura vegetal, permitiendo captar transformaciones que podrían pasar desapercibidas en análisis de menor resolución o escala. Esto incluye la conversión progresiva de bosques secundarios en zonas de pastoreo y cultivos agropecuarios, procesos que representan un deterioro significativo para la integridad ecológica del parque. La incorporación de verificaciones cruzadas con datos de campo y fuentes secundarias fortaleció la validez de los resultados y subrayó la importancia de integrar múltiples fuentes para la planificación territorial estratégica.

La confiabilidad de los datos generados en este análisis proporciona una base técnica sólida para sustentar planes de restauración ecológica. La priorización de áreas degradadas y la identificación de corredores ecológicos fragmentados permiten definir zonas de intervención inmediata, fomentando así acciones más eficientes y efectivas desde la gestión ambiental territorial. a través de un enfoque integrado que combine ciencia, gobernanza y acción local será posible

detener la tendencia acelerada de deforestación y preservar la riqueza biológica y cultural del sur del Parque Nacional Natural Tinigua.

10 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y el análisis multitemporal realizado sobre las dinámicas de deforestación en el Parque Nacional Natural Tinigua durante el periodo 2017–2024, se proponen las siguientes recomendaciones, con un enfoque académico, técnico y participativo, orientadas a incidir en los procesos de conservación, restauración y gobernanza territorial de esta área protegida:

Fortalecimiento de los sistemas de monitoreo ambiental

Se recomienda robustecer los sistemas de monitoreo ambiental en el Parque Nacional Natural Tinigua, priorizando las zonas con mayores tasas de deforestación identificadas en el análisis. Para ello, se sugiere la instalación de estaciones de control y vigilancia con cobertura estratégica, que permitan una supervisión continua y en tiempo real. Estas estaciones deben estar integradas a una red de monitoreo basada en sensores remotos y dispositivos de teledetección, tales como cámaras multiespectrales, imágenes satelitales y vehículos aéreos no tripulados (drones), dotadas de conectividad satelital para la transmisión eficiente de datos.

La implementación de esta red debe realizarse de forma articulada con las autoridades ambientales competentes, como Parques Nacionales Naturales de Colombia y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de manera que se garantice la interoperabilidad de la información y la capacidad de respuesta institucional ante eventos de deforestación, incendios forestales o invasión de áreas protegidas.

Restauración ecológica participativa con enfoque social

Se plantea como prioridad implementar procesos de restauración ecológica en las áreas más afectadas por la pérdida de cobertura boscosa, especialmente aquellas que han sido convertidas en mosaicos de cultivos, pastos limpios o zonas quemadas. Esta restauración debe ir más allá de una intervención técnica y ser concebida como un proceso social que promueva la inclusión y el empoderamiento de las comunidades locales.

Para ello, se recomienda fomentar la participación comunitaria en actividades como la reforestación con especies nativas, la agroforestería y la reconversión productiva hacia modelos

sostenibles. Estos procesos deben estar respaldados por esquemas de pagos por servicios ambientales (PSA), programas de educación ambiental y asistencia técnica continua, a fin de garantizar su sostenibilidad y fortalecer el sentido de apropiación del territorio por parte de sus habitantes.

Actualización colaborativa de la cartografía ambiental

Con el objetivo de mantener actualizados los datos sobre las coberturas del suelo y facilitar la toma de decisiones basada en evidencia, se recomienda establecer alianzas entre instituciones académicas, entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales (ONGs) para la actualización periódica de la cartografía ambiental del PNN Tinigua.

Estas alianzas deben conformar un sistema colaborativo de monitoreo geoespacial que permita la generación y validación de mapas temáticos bajo protocolos estandarizados de clasificación y análisis, promoviendo la interoperabilidad y el acceso libre a la información. La participación activa de universidades, centros de investigación, corporaciones autónomas regionales y organizaciones ambientales será fundamental para garantizar la calidad, continuidad y utilidad de los productos cartográficos generados.

Formación comunitaria en herramientas SIG y teledetección

Finalmente, se considera indispensable desarrollar programas de capacitación dirigidos a los actores locales en el uso y aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección, con el propósito de fomentar el monitoreo comunitario del bosque y fortalecer la gobernanza ambiental.

Estas capacitaciones deben ser prácticas y contextualizadas, enfocadas en el manejo de GPS, interpretación de imágenes satelitales, uso de plataformas de monitoreo como Google Earth Engine, y generación de alertas tempranas. Se recomienda que los beneficiarios principales sean líderes comunitarios, integrantes de juntas de acción comunal y representantes de organizaciones sociales del territorio, quienes podrán desempeñar un papel clave como veedores ambientales y multiplicadores de conocimiento, contribuyendo a una gestión más democrática y descentralizada del parque.

Referencias

- Arellano, A. (2022). Parque Tinigua, en jaque: Cada año se pierden alrededor de 6,000 hectáreas y las alertas de deforestación continúan. *Noticias ambientales*. <https://es.mongabay.com/2022/09/alerta-por-deforestacion-en-el-parque-tinigua-en-colombia/>
- Bautista-Montealegre, L. G., Benavides-Cruz, J. C., Cardona, W. A., Criollo-Campos, P. J., Torres-Cuesta, D. R., Albarracín-Arias, L. O., & Bolaños-Benavides, M. M. (2023). Prácticas sostenibles para la conservación de suelos en sistemas productivos ganaderos de trópico alto. *Temas Agrarios*, 28(1), 9-22. https://portal.amelica.org/ameli/journal/218/2184583001/movil/?utm_source=chatgpt.com
- Beuchle, R., Achard, F., Bourgoïn, C., & Vancutsem, C. (2021). (PDF) *Deforestación y degradación forestal en la Amazonía: Estado y tendencias hasta el año 2020*.
- Bonilla-Mejía, L., & Higuera-Mendieta, I. (2019). Protected Areas under Weak Institutions: Evidence from Colombia. *World Development*, 122, 585-596. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.06.019>
- Cabrera. (2020). *Análisis de la dinámica de las perturbaciones en el bosque húmedo tropical del Parque Nacional Natural Tinigua, entre 1989 y 2019, usando series temporales de imágenes del satélite Landsat*.
- Castañeda, L. C. C. (2019). *Protocolo para la Conservación y Zoo cría de tres especies de mariposas del genero Hamadryas, (H laodamia, H Februa y H Amphinome) del Parque Nacional Tinigua, Vereda la Belleza en La Uribe—Meta*. 125.
- Cieślak, I., Szuniewicz, K., Pawlewicz, K., & Czyża, S. (2017).
- Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., Ochoa, J., Pedraza, C., Schneider, L., Lora, C., Gómez, C., Linares, M., Hirashiki, C., & Biggs, D. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1), 4971. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
- Chandran, A., & Roy, P. (2024). Applications of geographical information system and spatial analysis in Indian health research: A systematic review. *BMC Health Services Research*, 24(1), 1448. <https://doi.org/10.1186/s12913-024-11837-9>

- Estrada, D. A. E. (2024). *Chibiriquete, Tinigua y sierra de la Macarena utilizando datos de puntos de calor, cicatrices de quema y explotación ganadera*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020 Main report* (p. 186).
- FCDS. (2022). *Monitoreo De Pérdida De Cobertura Vegetal*. 03.
- Finer, M. (2025). MAAP #224: Illegal Deforestation in the Colombian Amazon – Chiribiquete National Park & Llanos del Yarí - Yaguará II Indigenous Reserve. MAAP. <https://www.maaprogram.org/chiribiquete-yari-colombia/>
- Forero, J. A., & Polanco, M. F. (2021). Análisis de la deforestación en La Macarena, antes y después de los acuerdos de paz. *Colombia forestal*, 24(2), 9-23. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16479>
- Gómez, D. (2024). *Colombia registró en 2023 la cifra de deforestación más baja en los últimos 23 años*. www.elcolombiano.com. <https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/cifras-de-deforestacion-bajaron-en-colombia-segun-ministerio-de-ambiente-FK24957174>
- Guerra, K. D. G. (2023). *Análisis de la deforestación en el departamento de Caquetá- Colombia*.
- Hirschmugl, M., Gallaun, H., Dees, M., Datta, P., Deutscher, J., Koutsias, N., & Schardt, M. (2017). Methods for Mapping Forest Disturbance and Degradation from Optical Earth Observation Data: A Review. *Current Forestry Reports*, 3(1), 32-45. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0047-2>
- IDEAM, & MinAmbiente. (2020). *Resultados de monitoreo deforestación 2019* (p. 16). https://www.andi.com.co/Uploads/PRESENTACION%20DEFORESTACION%202019%20%28julio%20%29_compressed.pdf
- IDEAM. (2019). *Boletín de detección temprana de deforestación*. 2.
- IDEAM. (2024). *Histórica reducción de deforestación en la Amazonía: Bajó en 38% | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/historica-reduccion-de-deforestacion-en-la-amazonia-bajo-en-38>
- Kay, H., Santoro, M., Cartus, O., Bunting, P., & Lucas, R. (2021). Exploring the Relationship between Forest Canopy Height and Canopy Density from Spaceborne LiDAR Observations. *Remote Sensing*, 13(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/rs13244961>
- Kopas, cob, & Urpelainen, J. (2021). Satellite-based deforestation alerts with training and incentives for patrolling facilitate community monitoring in the Peruvian Amazon | Request

- PDF. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/353204822_Satellite-based_deforestation_alerts_with_training_and_incentives_for_patrolling_facilitate_community_monitoring_in_the_Peruvian_Amazon
- Lee, J., Oh, Y., Lee, S. T., Seo, Y. O., Yun, J., Yang, Y., Kim, J., Zhuang, Q., & Kang, H. (2023). Soil organic carbon is a key determinant of CH₄ sink in global forest soils. *Nature Communications*, 14(1), 3110. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38905-8>
- Lecca, P., Salotti, S., & Conte, A. (2020). *The importance of studying inter-regional spillover effects of European policies: Application of the RHOMOLO model for Poland*. JRC Publications Repository. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120937>
- Liu, C.-L., Wang, Y.-R., & Liu, W.-Y. (2025). Multi-index remote sensing for post-fire damage assessment: Accuracy, carbon loss, and conservation implications. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1577612>
- Liu, Csillik, O., Ordway, E. M., Chang, L. L., Longo, M., Keller, M., & Moorcroft, P. R. (2025). Environmental drivers of spatial variation in tropical forest canopy height: Insights from NASA's GEDI spaceborne LiDAR. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(10), e2401755122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2401755122>
- Mansaray, A. S., Dzialowski, A. R., Martin, M. E., Wagner, K. L., Gholizadeh, H., & Stoodley, S. H. (2021). Comparing PlanetScope to Landsat-8 and Sentinel-2 for Sensing Water Quality in Reservoirs in Agricultural Watersheds. *Remote Sensing*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/rs13091847>
- Márquez, M., & López, Y. (2023). *Análisis de la deforestación en el Parque Nacional Natural Sierra de la Macarena mediante un estudio multitemporal, aplicando herramientas de los sistemas de información geográficas SIG*. <https://padlet.com/ylopezort/an-lisis-de-la-deforestaci-n-en-el-parque-nacional-natural-s-vtqzpvayqwal3epv>
- Mendoza, J. E., Gutiérrez, C. S., Gutiérrez, C., Moncaleano, A. M., Franco, O., & Franco, M. L. (2024). *INFORME 2024 PARQUES NACIONALES CÓMO VAMOS*.
- Morales, M. A., Lasso, C. A., Mesa S., L. M., Granados-Martínez, C., Núñez-Avellaneda, M., Perdomo, F., DoNascimento, C., Albornoz-Garzón, J. G., Méndez-López, A., García-Melo, J. E., Sabaj, M. H., Acosta-Galvis, (2018). *Biodiversidad de la sierra de La Macarena, Meta, Colombia. Parte I. Ríos Guayabero medio, bajo Losada y bajo Duda*

- (1.^a ed.). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
<https://doi.org/10.21068/a2018n02>
- Morgan, E.-D. (2024). Narco activity takes heavy toll on Colombia's protected forests, satellite data show. *Mongabay Environmental News*. <https://news.mongabay.com/2024/05/narco-activity-takes-heavy-toll-on-colombias-protected-forests-satellite-data-show/>
- Murillo, C. A. M. (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*. 39.
- Parque Nacional Natural Tinigua. (2025). *Parques Nacionales Naturales de Colombia*.
<https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-tinigua/>
- Parra, L. (2023). *Territorio en riesgo: Efectos de la deforestación en territorios indígenas* (p. 188). Observatorio de Derechos Territoriales de los Pueblos Indígenas Secretaria Técnica Indígena. <https://www.cntindigena.org/wp-content/uploads/2023/06/informe-deforestacion.pdf>
- Paz, A. (2021). Settlers invading, deforesting Colombian national parks 'at an unstoppable speed'. *Mongabay Environmental News*. <https://news.mongabay.com/2021/05/settlers-invading-deforesting-colombian-national-parks-at-an-unstoppable-speed/>
- Paz, A. (2025). La deforestación aumentó un 35 % en 2024 en Colombia. *Noticias ambientales*. <https://es.mongabay.com/2025/03/deforestacion-aumento-2024-colombia/>
- Pedraza Suárez, B. R. (2023). Incidencia de la educación y comunicación para la conservación del Parque Nacional Natural Tinigua (Colombia). *RHS-Revista Humanismo y Sociedad*, 11(1). <https://doi.org/10.22209/rhs.v11n1a08>
- Quezada, A. S., Sevilla Tapia, J. D., & Avilés Sacoto, E. C. (2022). Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. *Revista Alfa*, 6(17), 282-299.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168>
- Rebolledo, J. R. (2022). La deforestación después de Artemisa. *La Silla Vacía*. <http://www.lasillavacia.com/red-de-expertos/red-rural/la-deforestacion-despues-de-artemisa/>
- Rodríguez, L. J. R. (2020). *Vivencias campesinas y conflictos ambientales en el Parque Nacional Natural Tinigua*. 194.

- Rogers, S. R., Foust, B. G., & Nelson, J. R. (2025). Standard use of Geographic Information System (GIS) techniques in honey bee research 2.0. *Journal of Apicultural Research*, 64(2), 443-532. <https://doi.org/10.1080/00218839.2024.2357977>
- Ruiz, J. (2025). *Entre enero y marzo del 2025 cayó 33% la deforestación en Colombia*. Portafolio.co. <https://www.portafolio.co/economia/gobierno/entre-enero-y-marzo-del-2025-cayo-33-la-deforestacion-en-colombia-632104>
- Ruiz, J., Cárdenas, W., & Baquero, C. (2011). Deforestación y dinámica del bosque secundario en la amazonia colombiana 1986-2000. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35(137), 531-545. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.35\(137\).2011.2426](https://doi.org/10.18257/raccefyn.35(137).2011.2426)
- Smith, C., Baker, J. C. A., & Spracklen, D. V. (2023). Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, 615(7951), 270-275. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>
- Simbaqueba, J. A. (2024). *Parque Natural Nacional Tinigua: Una mirada a la deforestación a través de la metodología "MAP BIOMAS"*. 81.
- Suárez, K., Cely, G., & Forero, F. (2016). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: Caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*.
- Tarazona, D., & Parra de Moya, J. (2023). Operation Artemis: Colombia's failed military operation to stop deforestation. *Mongabay Environmental News*. <https://news.mongabay.com/2023/04/operation-artemis-colombias-failed-military-operation-to-stop-deforestation/>
- WWF. (2024). *Los impactos devastadores de la deforestación en Colombia*. <https://www.wwf.org.co/en/?386550/deforestacion-colombia-causas-consecuencias>
- WWF colombia & USAID. (2021). *Gobernanza transparente de los recursos naturales en Colombia* (p. 74). https://files.worldwildlife.org/wwfcmprod/files/Publication/file/38g4v7obkf_Reporte_Final_TGNR.pdf
- Yanai, A. M., de Alencastro Graça, P. M. L., Ziccardi, L. G., Escada, M. I. S., & Fearnside, P. M. (2022). Brazil's Amazonian deforestation: The role of landholdings in undesignated public

lands. *Regional Environmental Change*, 22(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01897-0>

Zárate Luján, N. A., & Torres Llanos, D. R. (2019). Evaluación de la precisión de clasificación de imágenes satelitales de alta resolución utilizando índices de exactitud y coeficiente Kappa. *Revista de Investigación en Modelado y Simulación*, 2(1), 43–56.

Anexos

