



**Análisis multitemporal de la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble
(Quindío), periodos 2018 ,2021 y 2023.**

Hernán Santiago León Díaz
Jorge Andrés Quintero Aguirre
Mónica Alejandra Betancourt Hernández
Yuliet Home Samboni

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

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

2025

Cita	(Hernán León et al., 2025)
Referencia	Hernán León. (2025). <i>Análisis multitemporal de la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble (Quindío), periodos 2018 ,2021 y 2023.</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM:
Estilo APA 7 (2020)	Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

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

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

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

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

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

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

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

Tabla de Contenido

1. Resumen.....	7
2. Abstract	8
3. Introducción	10
4. Planteamiento del problema.....	11
4.1. Descripción de área problemática	11
4.2. Localización de área de estudio	14
4.3. Formulación del problema	15
4.4. Antecedentes	16
5. Justificación	22
6. Objetivos.....	24
6.1. Objetivo general	24
6.2. Objetivos específicos.....	24
7. Hipótesis	25
7.1. Hipótesis de trabajo	25
7.1.1. Hipótesis nula.....	25
7.1.1.1 Hipótesis alterna.....	25
7.1.1.1.1 Variables.	26
8. Marco teórico	27
8.1. Problemática ambiental global.	27
8.2. Problemática en el Eje Cafetero.	27
8.3. Herramientas geoespaciales.	28
8.4. Enfoque metodológico integrado.	31
9. Metodología	32

9.1.	Tipo de estudio	32
9.2.	Área de estudio.....	34
9.3.	Insumos y fuentes de información	34
9.3.1.	Adquisición y procesamiento de imágenes satelitales	34
9.3.2.	Descarga de imágenes satelitales	35
9.3.3.	Procesamiento de imágenes	36
9.3.4.	Cartografía base y temática.....	38
9.4.	Clasificación supervisada de coberturas.....	39
9.5.	Reagrupación de coberturas	40
9.6.	Cuantificación y comparación de coberturas	41
10.	Resultados	43
10.1.	Insumos y fuente de información	43
10.2.	Clasificación supervisada mediante la metodología CLC.....	44
10.2.1.	Resultados año 2018.....	45
10.2.2.	Resultados año 2021.....	46
10.2.3.	Resultados año 2023.....	48
10.2.4.	Análisis temporal integrado	50
10.3.	Cuantificación de cambios de cobertura	50
10.3.1.	Interpretación CLC nivel 3.....	51
10.3.2.	Agrupación de coberturas.....	52
10.4.	Validación de la clasificación.....	54
11.	Discusión.....	56
12.	Conclusiones	58
13.	Recomendaciones.....	60
14.	Referencias	61

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación Corine Land Cover (CLC)- Nivel 1-2 y 3.....	30
Tabla 2. Descarga imágenes Sentinel-2.	35
Tabla 3. Corrección y alineamiento geométrico.	37
Tabla 4. Normalización radiométrica de las imágenes.	38
Tabla 5. Fases para la clasificación supervisada.	39
Tabla 6. Clasificación Corine Land Cover (CLC).	40
Tabla 7. Agrupación de coberturas a partir de la clasificación detallada CLC (IDEAM, 2010). .	41
Tabla 8. Procesamiento de imágenes Sentinel-2.	43
Tabla 9. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2018.....	46
Tabla 10. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2021.....	47
Tabla 11. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2023.....	49
Tabla 12. Distribución de coberturas CLC nivel 3 por año.	51
Tabla 13. Distribución de coberturas agrupadas por año.	52

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Roble en el departamento del Quindío, Colombia.	15
Figura 2. Diagrama de flujo metodológico.	32
Figura 3. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2018.	45
Figura 4. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2021.	47
Figura 5. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2023.	48
Figura 6. Mapa comparativo de coberturas para 2018, 2021 y 2023.	52
Figura 7. Comparativa de superficies por clase de cobertura y año.	53

1. Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la pérdida y transformación de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble, ubicada en el departamento del Quindío, durante los años 2018, 2021 y 2023. A través de un enfoque descriptivo, comparativo y multitemporal, se caracterizó el uso del suelo y sus dinámicas espaciales mediante la integración de imágenes satelitales Sentinel-2, herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), aplicando la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia por el IDEAM.

La investigación se estructuró en diversas fases: delimitación del área de estudio, descarga y preprocesamiento de insumos satelitales, fotointerpretación visual y clasificación supervisada, seguidas de un análisis multitemporal de los cambios. Se utilizó software especializado como ArcGIS 10.8 y QGIS para garantizar la estandarización y comparabilidad de los datos. Las coberturas fueron reclasificadas en tres grandes categorías Naturales, Semi-naturales y No naturales, lo que facilitó la interpretación de los procesos de transformación territorial, como la deforestación, la expansión agropecuaria y el crecimiento urbano.

Los resultados muestran una tendencia general a la reducción de coberturas naturales entre 2018 y 2021, seguida de una recuperación parcial en 2023, mientras que las coberturas semi-naturales se expandieron inicialmente y luego se redujeron. Las áreas no naturales, asociadas a usos urbanos e infraestructuras, se mantuvieron relativamente estables pero localmente significativas. Estas transformaciones reflejan una creciente presión antrópica sobre la cuenca, con implicaciones directas para la biodiversidad, el equilibrio ecosistémico y la sostenibilidad hídrica de la región.

La matriz de cambio elaborada permitió cuantificar con precisión las transiciones entre coberturas, identificando patrones espaciales y tendencias temporales relevantes para la gestión del territorio. En este sentido, la tesis no solo ofrece un análisis técnico detallado, sino que se constituye en una herramienta diagnóstica clave para orientar procesos de planificación territorial, restauración ecológica y toma de decisiones ambientales a escala local y regional.

Finalmente, la metodología aplicada demuestra la eficacia de combinar SIG, teledetección y análisis espacial como base científica replicable en otras microcuencas de la región andina,

contribuyendo al monitoreo y conservación de los recursos naturales en contextos de cambio acelerado del uso del suelo.

Palabras clave: Análisis multitemporal, Teledetección, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Sentinel-2, Clasificación supervisada.

2. Abstract

This study aims to analyze the loss and transformation of vegetation cover in the Roble River micro-basin, located in the department of Quindío, during the years 2018, 2021, and 2023. Using a descriptive, comparative, and multitemporal approach, land use and its spatial dynamics were characterized by integrating Sentinel-2 satellite images, remote sensing tools, and Geographic Information Systems (GIS), applying the Corine Land Cover (CLC) methodology adapted for Colombia by IDEAM.

The research was structured in several phases: delimitation of the study area, downloading and preprocessing of satellite inputs, visual photointerpretation, and supervised classification, followed by a multitemporal analysis of the changes. Specialized software such as ArcGIS 10.8 and QGIS were used to ensure data standardization and comparability. Land cover was reclassified into three broad categories: natural, semi-natural, and non-natural, facilitating the interpretation of territorial transformation processes, such as deforestation, agricultural expansion, and urban growth.

The results show a general trend toward a reduction in natural land cover between 2018 and 2021, followed by a partial recovery in 2023, while semi-natural land cover initially expanded and then decreased. Non-natural areas, associated with urban uses and infrastructure, remained relatively stable but were locally significant. These transformations reflect increasing anthropogenic pressure on the basin, with direct implications for biodiversity, ecosystem balance, and water sustainability in the region.

The resulting change matrix made it possible to accurately quantify the transitions between land cover, identifying spatial patterns and temporal trends relevant to land management. In this sense, the thesis not only offers a detailed technical analysis but also

constitutes a key diagnostic tool for guiding territorial planning, ecological restoration, and environmental decision-making processes at the local and regional levels.

Finally, the methodology applied demonstrates the effectiveness of combining GIS, remote sensing, and spatial analysis as a scientific basis that can be replicated in other micro-watersheds in the Andean region, contributing to the monitoring and conservation of natural resources in contexts of accelerated land-use change.

Keywords: Multitemporal analysis, Remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), Sentinel-2, Supervised classification.

3. Introducción

La transformación acelerada de los ecosistemas naturales constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad ambiental del territorio. En este contexto, la pérdida de cobertura vegetal se presenta como un factor clave que afecta directamente funciones ecológicas esenciales, tales como la regulación del ciclo hidrológico, la estabilidad del suelo y la conservación de la biodiversidad (López et al., 2020). La microcuenca del río Roble, situada en el departamento del Quindío, ha experimentado una creciente presión derivada de actividades humanas que alteran su equilibrio ecológico. En particular, las prácticas agrícolas, ganaderas y la expansión urbana han sido responsables de una transformación significativa de la cobertura vegetal en la zona (García et al., 2019).

La pérdida de vegetación, aunque muchas veces es paulatina y silenciosa, tiene consecuencias devastadoras para los ecosistemas y para la capacidad de los territorios de proveer servicios ecosistémicos esenciales. De ahí que sea crucial implementar mecanismos técnicos que permitan identificar y cuantificar estos cambios a lo largo del tiempo. El uso de herramientas de teledetección y análisis multitemporal se presenta como una opción eficiente para realizar un monitoreo continuo de la dinámica de la cobertura vegetal, ya que permite obtener información precisa sobre áreas de difícil acceso (Pacheco et al., 2017). En este sentido, el presente proyecto tiene como propósito analizar cuantitativamente la pérdida de vegetación en la microcuenca del río Roble, a través del análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023. A través de la clasificación supervisada y la cuantificación de las coberturas, se busca generar evidencia cartográfica y estadística que facilite una comprensión más precisa del fenómeno, y que, en consecuencia, apoye la toma de decisiones en materia de ordenamiento ambiental.

El problema central de este estudio radica en que, a pesar de las evidentes alteraciones en el paisaje, no existen suficientes estudios técnicos que documenten la magnitud ni las causas de la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca. En este sentido, el proyecto surge para dar respuesta a interrogantes clave, como: ¿En qué medida ha disminuido la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble durante los años 2018, 2021 y 2023?

4. Planteamiento del problema

La reducción de la cobertura vegetal representa actualmente uno de los desafíos ambientales más significativos a nivel global, con efectos directos sobre la diversidad biológica, el equilibrio climático y la funcionalidad de los ecosistemas locales. En el caso específico de la microcuenca del río Roble, localizada en el departamento del Quindío, Colombia, se ha evidenciado una transformación progresiva del paisaje como resultado de diversas actividades humanas, entre ellas la expansión de la frontera agrícola y el crecimiento urbano. (Corporación Autónoma Regional del Quindío [CRQ], 2018).

Sin embargo, la magnitud y características de esta transformación no han sido abordadas desde un enfoque cuantitativo riguroso en los últimos años, lo que dificulta una interpretación precisa de su evolución y de sus implicaciones futuras. En este contexto, la presente investigación se propone analizar los cambios en la cobertura vegetal a través de la fotointerpretación de imágenes satelitales correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023, con el fin de generar insumos técnicos que contribuyan al entendimiento del fenómeno y a la planificación territorial ambientalmente sostenible.

4.1. Descripción de área problemática

La microcuenca del río Roble se localiza en el departamento del Quindío, en la región andina de Colombia, y comprende un territorio caracterizado por la compatibilidad de ecosistemas boscosos y zonas agrícolas. Esta área resulta especialmente vulnerable a las transformaciones del uso del suelo, un fenómeno que se ha intensificado en las últimas décadas como consecuencia de la expansión agrícola, ganadera y del crecimiento urbano. En efecto, la fragmentación progresiva de los ecosistemas ha generado alteraciones sustanciales en la biodiversidad y ha comprometido servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica, la protección del suelo y la captura de carbono (IDEAM, 2020).

El presente estudio se orienta al análisis de la pérdida de cobertura vegetal en esta microcuenca mediante el uso de imágenes satelitales multitemporales. Esta problemática representa una amenaza crítica para la sostenibilidad regional, dado que incide directamente

sobre los recursos naturales disponibles y el bienestar de las comunidades que dependen de ellos. Diversas investigaciones han identificado como principales causas de la transformación del paisaje actividades como la agricultura intensiva, la tala no regulada y el avance de la frontera agropecuaria (Vargas et al., 2020).

En la cuenca del río Roble, dentro del POMCA del río La Vieja, se identifican varias actividades que generan pérdida de cobertura vegetal. La expansión de la frontera agrícola y ganadera, en especial el pastoreo intensivo y el cultivo de café en laderas, ha llevado a la deforestación de bosques nativos, alterando los ecosistemas. Además, la explotación no regulada de recursos forestales, como la tala ilegal y la extracción de madera y guadua para diversos fines, ha contribuido al deterioro de las áreas boscosas. La introducción de especies forestales exóticas, como *Pinus patula*, también ha alterado los ecosistemas naturales y afectado la biodiversidad local. Estas actividades, combinadas con prácticas agrícolas insostenibles como la quema y el uso inadecuado de suelos, continúan acelerando la degradación de la cuenca y reduciendo su capacidad de provisión de servicios ecosistémicos (Corporación Autónoma Regional del Quindío [CRQ], 2018).

En este contexto las herramientas de teledetección han demostrado ser efectivas para monitorear, de forma precisa y continua, la dinámica del cambio en la cobertura vegetal. Tecnologías como las imágenes satelitales de alta resolución permiten generar información detallada sobre la magnitud, frecuencia y distribución espacial de los procesos de deforestación. Lizarazo et al. (2019) evidenciaron la utilidad de estos métodos en zonas del Eje Cafetero, donde se incluyen los municipios de Filandia, Circasia, Montenegro y Quimbaya, que hacen parte del área de estudio.

La teledetección ha emergido como una herramienta clave para el monitoreo ambiental, especialmente en lo que respecta al seguimiento de la dinámica de la cobertura vegetal. Esta tecnología permite obtener información precisa y continua sobre grandes extensiones de terreno, lo cual es fundamental en áreas donde la pérdida de vegetación y la degradación ambiental son problemáticas críticas, como en la cuenca del río Roble en Quindío. A través del uso de imágenes satelitales y sensores remotos, es posible detectar y medir cambios en la cobertura forestal, identificar áreas afectadas por deforestación, y mapear las transformaciones en el uso del suelo a lo largo del tiempo. Esto proporciona datos valiosos para la toma de decisiones en la planificación y manejo de los recursos naturales.

Uno de los grandes beneficios de la teledetección es su capacidad para realizar un monitoreo de manera precisa y continua, incluso en regiones de difícil acceso. Por ejemplo, mediante el uso de satélites o sistemas de radar (como el SAR), los investigadores pueden obtener información sobre la cobertura vegetal sin necesidad de realizar inspecciones directas en el terreno, lo cual es más costoso y logísticamente complejo. Además, la teledetección permite la detección temprana de cambios, lo que facilita la implementación de medidas correctivas de manera oportuna.

Los estudios científicos han demostrado que el uso de imágenes satelitales ha sido efectivo para identificar patrones de deforestación y cambio en la cobertura vegetal en cuencas hidrográficas. A través de la combinación de imágenes multitemporales y el análisis de series temporales, se pueden comparar las variaciones en la vegetación a lo largo de varios años, lo que brinda una visión clara de las dinámicas de cambio, especialmente en contextos de presión por actividades humanas como la agricultura, la ganadería, y la explotación forestal.

Un estudio realizado por Hansen et al. (2013) utilizó imágenes satelitales de Landsat para monitorear la deforestación global y sus tasas a lo largo de varias décadas. Este tipo de análisis es crucial en áreas como la cuenca del río Roble, donde la expansión agrícola y ganadera es una de las principales causas de la pérdida de cobertura vegetal.

Según Zhu et al. (2018), las técnicas de teledetección mediante imágenes de radar y ópticas pueden identificar áreas de cambio en la cobertura vegetal debido a actividades humanas, como la tala y la quema. Estos métodos son especialmente útiles en zonas tropicales y subtropicales, donde la vegetación puede ser muy densa.

La teledetección ha sido clave para realizar un monitoreo integral de las cuencas hidrográficas, facilitando la gestión de los recursos naturales y permitiendo la identificación de áreas críticas que requieren restauración o protección. El uso de herramientas como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ha sido fundamental en este tipo de monitoreo, ya que permite analizar la salud de la vegetación y detectar áreas de deforestación.

Ahora bien, a pesar de los avances tecnológicos disponibles, persisten vacíos en el conocimiento del fenómeno a escala local. En particular, se carece de análisis cuantitativos y actualizados que permitan hacer seguimiento al ritmo y a los patrones de pérdida vegetal en microcuencas específicas como la del río Roble, lo cual limita la toma de decisiones en términos de conservación y ordenamiento ambiental.

Simultáneamente, la región ha experimentado fenómenos climáticos extremos —como sequías prolongadas e inundaciones— que, posiblemente, han acelerado la degradación del suelo y la cobertura boscosa. Además, el contexto socioeconómico rural de la zona, altamente dependiente de la agricultura y la ganadería, incrementa la presión sobre los ecosistemas remanentes (García, 2018; Paredes et al., 2022).

Finalmente, los municipios incluidos en la microcuenca del río Roble como Filandia, Circasia, Montenegro y Quimbaya presentan una alta presión sobre el uso del suelo debido a su vocación agropecuaria, el crecimiento urbano y la intensificación de las actividades turísticas (IDEAM, 2020). Por consiguiente, el monitoreo de la cobertura vegetal en esta zona resulta prioritario para la sostenibilidad ecológica del territorio.

4.2. Localización de área de estudio

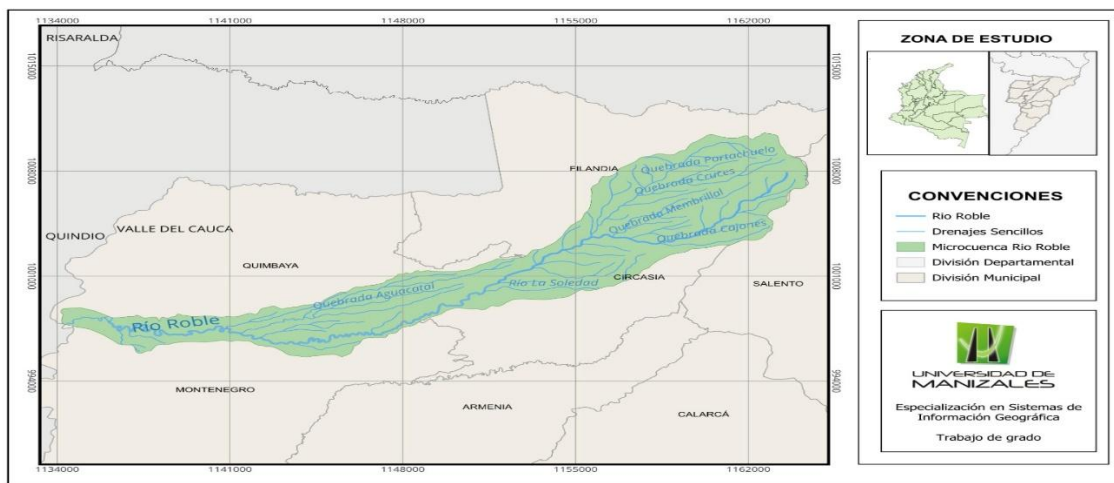
La microcuenca del río Roble se localiza en la región centro-occidental del departamento del Quindío, en el occidente de Colombia. Su área de influencia abarca parcialmente los municipios de Filandia, Circasia, Quimbaya y Montenegro, y forma parte de la cuenca hidrográfica del río La Vieja, uno de los sistemas hídricos de mayor relevancia ambiental, productiva y social en el eje cafetero.

De acuerdo con la delimitación cartográfica realizada en entorno SIG, la microcuenca presenta una extensión aproximada de 11.500 hectáreas (115 km²). El rango altitudinal se sitúa entre los 1.200 y 1.700 metros sobre el nivel del mar, lo cual le confiere una marcada variabilidad de condiciones biofísicas, reflejada tanto en la dinámica de sus coberturas vegetales como en los usos del suelo predominantes.

El río Roble constituye el eje hídrico principal, acompañado por afluentes de importancia como las quebradas Aguacatal, La Soledad, Portachuelo, Membrillal, Cruces y Cajones. Esta red de drenaje cumple un papel fundamental en la regulación hídrica regional y en el abastecimiento de comunidades rurales y urbanas cercanas. La cartografía de referencia utilizada corresponde a información oficial de libre acceso, entre ellos insumos generados por el DANE y el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río La Vieja (POMCA), disponible a través de la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ).

En términos de contexto geográfico, la microcuenca del río Roble se caracteriza por una transición paisajística que va desde sectores agrícolas y periurbanos en la zona baja y media, hasta áreas con remanentes de cobertura natural en las partes altas. Esta configuración espacial evidencia la interacción entre los procesos antrópicos y los gradientes ambientales, lo que resalta la importancia de su gestión integral. La Figura 1 presenta la ubicación geográfica de la microcuenca dentro del departamento del Quindío y de Colombia, junto con la representación de su red hidrográfica principal donde observa la delimitación de la microcuenca, su red hidrográfica principal y el contexto geográfico en relación con los municipios circundantes.

Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Roble en el departamento del Quindío, Colombia.



Fuente: Elaboración propia a partir de insumos cartográficos oficiales (DANE, CRQ – POMCA río La Vieja).

4.3. Formulación del problema

La cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en el equilibrio ecológico de las cuencas hidrográficas, ya que regula el ciclo hidrológico, conserva la biodiversidad y previene procesos de degradación del suelo. En los últimos años, la microcuenca del río Roble, ha sido objeto de profundas transformaciones en su paisaje debido a presiones antrópicas relacionadas

con el crecimiento urbano, el avance de la frontera agrícola y la explotación no sostenible de los recursos naturales.

Frente a esta realidad, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿En qué medida ha disminuido la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble durante los años 2018, 2021 y 2023? Esta interrogante pretende orientar el estudio hacia una medición precisa y cuantificable de los cambios ocurridos en el territorio, a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales. Dicha aproximación permitirá caracterizar las dinámicas de pérdida de vegetación en un periodo reciente de cinco años, aportando evidencia técnica para la comprensión del fenómeno de deforestación en este contexto específico.

La preocupación por la transformación de los ecosistemas naturales no es ajena al ámbito global, sin embargo, se manifiesta con particular intensidad en territorios como la región andina colombiana, donde los procesos de expansión agropecuaria, la urbanización desordenada y la extracción ilegal de recursos continúan alterando profundamente la estructura y funcionalidad del paisaje. Estas acciones impactan de manera directa la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos, como la regulación climática, el almacenamiento de agua y la protección de la biodiversidad local.

Teniendo en cuenta este panorama, el análisis multitemporal de la cobertura vegetal, apoyado en técnicas de fotointerpretación y Sistemas de Información Geográfica (SIG), se presenta como una alternativa metodológica eficaz para monitorear el avance del cambio de uso del suelo. Así, este tipo de estudios no solo permite detectar y cuantificar transformaciones territoriales, sino que también ofrece insumos clave para el diseño de estrategias de conservación, restauración ecológica y planificación sostenible del territorio (IDEAM, 2020; Vargas et al., 2020).

4.4. Antecedentes

Contexto global

La pérdida de cobertura vegetal se ha consolidado como una problemática ambiental de carácter global debido a sus impactos directos sobre la biodiversidad, el equilibrio hídrico y el funcionamiento de los ecosistemas. Este fenómeno, asociado a la expansión agrícola, la

deforestación y el cambio climático, genera consecuencias como la fragmentación del hábitat, la erosión del suelo y la reducción de servicios ecosistémicos esenciales. En el caso colombiano, la situación resulta especialmente alarmante. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2020), el país pierde anualmente cerca de 200.000 hectáreas de bosque, lo que compromete la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de las comunidades rurales que dependen de estos ecosistemas.

Diversos estudios internacionales han abordado este fenómeno mediante herramientas tecnológicas. Hansen et al. (2013) demostraron la eficacia del uso combinado de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el monitoreo de cambios en la cobertura terrestre a escala global. Mediante el análisis de imágenes satelitales lograron identificar patrones espaciales de deforestación y proponer estrategias de manejo ambiental, influyendo de manera decisiva en investigaciones posteriores y constituyendo una base metodológica que sustenta gran parte de los estudios actuales.

Un factor determinante en la pérdida de cobertura vegetal son los incendios forestales. Kurbanov et al. (2020), a través de una revisión sistemática que incluyó 329 estudios publicados entre 2000 y 2020, evaluaron el papel de la teledetección en la estimación de áreas quemadas, la gravedad de los incendios, los efectos post-incendio y la recuperación de la cobertura forestal. El estudio evidenció que las técnicas de teledetección se han consolidado como una herramienta clave para comprender y gestionar los impactos de los incendios a gran escala.

Otro ejemplo de los efectos del cambio global sobre ecosistemas frágiles lo presenta Chamberlain et al. (2021), quienes estudiaron la pérdida de bosques de manglar en Queensland Central (Australia). Entre 2009 y 2019 identificaron una reducción de 1.480 hectáreas (-2,31 %), asociada a anomalías en las precipitaciones y la ocurrencia de ciclones tropicales severos. Este estudio destaca la importancia de analizar cómo los fenómenos climáticos extremos afectan la resiliencia de ecosistemas estratégicos como los manglares.

Estudios internacionales

En el contexto andino, Condori-Luna et al. (2018) aplicaron SIG y técnicas de teledetección en la subcuenca del río Coroico (Bolivia), durante el periodo 1989–2014. Su metodología permitió caracterizar la dinámica de la cobertura boscosa mediante análisis multitemporal, aportando información clave para la planificación y la gestión territorial.

En Perú, Chariarse Muñiz y Chariarse Muñiz (2021) analizaron los cambios de uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca del río Chuyapi, Cusco, entre 1992 y 2015. Sus resultados revelaron una disminución de mosaicos de cultivos y vegetación natural, acompañada de un aumento de coberturas herbáceas. Además, calcularon coeficientes de escorrentía que reflejaron cambios en la dinámica hidrológica de la cuenca, destacando el vínculo entre cobertura vegetal y recursos hídricos.

En Ecuador, Jácome-Aguirre et al. (2024) emplearon imágenes Landsat y el modelo MaxEnt para evaluar los efectos del cambio en la cobertura vegetal sobre la distribución potencial de *Croton wagneri* en la cuenca del río Mira. Los resultados mostraron una pérdida significativa de bosques y vegetación arbustiva, lo que demuestra la vulnerabilidad de especies endémicas frente a la transformación del paisaje.

En Asia, Jiang y Li (2024) estudiaron la cuenca del río Tarim en China, entre 1980 y 2020, mediante índices de patrones paisajísticos y matrices de transferencia. Hallaron un aumento de áreas desérticas, tierras agrícolas y asentamientos, junto con una disminución de pastizales. Los autores concluyeron que factores naturales (temperatura y evapotranspiración) y humanos (densidad poblacional y expansión agrícola) fueron determinantes en la transformación del paisaje. Por su parte, Hong et al. (2023) analizaron la minería del carbón en el yacimiento de Muli (China), demostrando que las operaciones mineras impulsaron grandes cambios en la cobertura vegetal, seguidos por medidas parciales de restauración con baja efectividad.

En Europa, Caputi et al. (2025) evaluaron la clasificación de tipologías arbóreas en el centro de Italia utilizando datos de Sentinel-2 y PRISMA. Aplicaron el clasificador de Bosque Aleatorio (RF, *Random Forest*) y datos de referencia (GT, *Ground Truth*), concluyendo que los conjuntos PRISMA procesados con análisis de componentes principales (PCA, *Principal Component Analysis*) ofrecieron mejores precisiones en comparación con Sentinel-2, aunque este último resultó más eficiente en áreas heterogéneas.

Finalmente, Soria et al. (2022) estudiaron la vegetación acuática del lago Gallocanta (España), un ecosistema poco profundo y estacional. Evaluaron seis índices de vegetación y encontraron que el NDI45, basado en la relación entre bandas de rojo lejano y rojo, fue el más efectivo, alcanzando coberturas de hasta el 90 % durante los periodos de inundación.

Estudios regionales (América Latina)

En México, Valencia-Gaspar et al. (2024) realizaron un estudio multitemporal en la cuenca de Bustillos, identificando un aumento notable de áreas agrícolas y urbanas, mientras que pastizales, bosques de robles y pinos, y cuerpos de agua experimentaron pérdidas significativas. El trabajo destaca la importancia del monitoreo espacial en la planificación y gestión sostenible.

Escobar-López et al. (2022), también en México, cartografiaron sistemas agroforestales de café en regiones montañosas mediante imágenes de Sentinel-1 y Sentinel-2, complementadas con datos de campo. Identificaron tres tipos de sistemas y, aplicando un clasificador de Bosque Aleatorio, lograron una precisión global del 95 %, destacando el valor del enfoque multitemporal en áreas de alta heterogeneidad topográfica.

En Brasil, Souza et al. (2022) evaluaron el uso de radar de apertura sintética (SAR) Sentinel-1 para monitorear los niveles de agua en un embalse semiárido, comparando sus resultados con índices multiespectrales como NDWI (*Normalized Difference Water Index*) y MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*). Concluyeron que el SAR es una herramienta útil, especialmente cuando se combina con imágenes ópticas, aunque estas últimas superaron al radar en áreas más complejas del embalse.

En Colombia, Vitar-Mendoza et al. (2022) analizaron cambios de cobertura en el departamento de Vichada entre 1985 y 2017, observando que cerca del 60 % de la cobertura forestal fue reemplazada por pastizales y cultivos agrícolas. La cuenca del río Bitá presentó una fuerte pérdida de bosque debido al desarrollo agroindustrial en Puerto Carreño, lo que compromete la integridad ecológica de la región.

Estudios nacionales (Colombia)

En el ámbito nacional, Londoño (2022) examinó la expansión de la frontera agropecuaria en Unguía (Chocó), encontrando que los factores socioeconómicos —como la necesidad de generar ingresos— impulsan la deforestación, en un contexto de débil planificación territorial.

Barrios Amaya y Ochoa Cáceres (2021), en la cuenca media del río Bogotá, aplicaron imágenes Landsat 8 y herramientas SIG para realizar un análisis multitemporal entre 2013 y 2020. Sus hallazgos revelaron transformaciones significativas relacionadas con la expansión urbana y actividades extractivas.

Murillo Patiño y Obando Loja (2024) realizaron un estudio en la subcuenca del río Burgay, aplicando imágenes de Sentinel-2 y Landsat-8 OLI con el algoritmo Random Forest en Google Earth Engine, obteniendo mapas de alta precisión que demuestran la utilidad de la teledetección en cuencas pequeñas.

Otros trabajos destacan la importancia de los SIG para la gestión ambiental. Corzo Ramírez, Jerena Montiel y Rubio Mendoza (2012) desarrollaron un modelo de análisis multitemporal y espacial para establecer prioridades de restauración ecológica, mientras que Chacón Paja (2023) y Camayo Sánchez & Chacón Paja (2023) aplicaron zonificaciones ambientales en áreas mineras de Cauca, evidenciando fragmentación de bosques y conflictos de uso del suelo.

En Chocó, Ávila Ramírez et al. (2025) documentaron el impacto de la minería ilegal en San Pablo, donde se registró la pérdida de 1.748,70 ha de bosque y la regeneración de 2.066,60 ha, demostrando procesos simultáneos de degradación y recuperación.

En Cauca, Lara Rivera et al. (2016) identificaron pérdida y fragmentación de bosque entre 1989 y 2014 en la cuenca del río San Francisco, integrando imágenes Landsat con cartografía social.

Vargas Portela (2024), en el Bajo Cauca Antioqueño, evidenció que la minería aurífera aluvial ha reducido las coberturas boscosas y expandido las áreas agrícolas y mineras. De manera complementaria, Rentería Cárdenas (2024) mostró que el uso de imágenes modificadas en Google Earth Engine mejora la clasificación en zonas de nubosidad persistente, como el Parque Nacional Natural Los Nevados.

En Bogotá, Cuellar y Pérez (2023) utilizaron el modelo Markov-FLUS para simular la dinámica de los humedales urbanos, proyectando una reducción de su área a menos del 2 % para 2034.

Finalmente, Manco-Jaraba et al. (2025) analizaron los procesos de erosión en el municipio de Platón (Magdalena), identificando cinco áreas vulnerables a erosión e inundaciones, y evidenciando cómo la estacionalidad afecta la estabilidad del suelo.

Contexto local

A nivel local, el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del río La Vieja (2023) indica que las coberturas agrícolas dominan el paisaje del Quindío y que continúan

expandiéndose en detrimento de la cobertura boscosa. Este contexto resalta la importancia de realizar un seguimiento detallado a microcuencas como la del río Roble, con el fin de identificar transiciones críticas en la cobertura vegetal que puedan comprometer la sostenibilidad ecológica del departamento.

En conjunto, los antecedentes revisados constituyen un soporte fundamental para el marco conceptual y metodológico del presente estudio. La investigación en la microcuenca del río Roble se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, empleando imágenes satelitales de las misiones Sentinel-2 y Landsat 9, procesadas en plataformas SIG como ArcGIS y QGIS. Asimismo, la aplicación de la metodología Corine Land Cover (CLC) permitirá diferenciar categorías de cobertura como bosques, áreas agrícolas y zonas urbanas, lo que facilitará un análisis multitemporal comparativo en los años 2018, 2021 y 2023. Con este enfoque se espera obtener una cartografía detallada de la transformación del paisaje, aportando información estratégica para la toma de decisiones en torno al ordenamiento territorial y la conservación ambiental en la región.

5. Justificación

La pérdida de cobertura vegetal constituye una de las principales amenazas para la sostenibilidad ambiental, especialmente en regiones de alta biodiversidad como la microcuenca del río Roble, ubicada en el departamento del Quindío. Esta situación ha generado una creciente necesidad de comprender la magnitud y los efectos del cambio en el uso del suelo, dado su impacto sobre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades que dependen de ellos. En este sentido, la presente investigación cobra relevancia al abordar un problema ambiental prioritario a través de un enfoque técnico, riguroso y contextualizado.

El estudio propuesto se justifica, en primer lugar, por su aporte al conocimiento científico en torno a la dinámica de transformación del paisaje en zonas andinas rurales. Desde una perspectiva académica, el análisis multitemporal de la cobertura vegetal permitirá caracterizar con mayor precisión los patrones espaciales y temporales de deforestación en la microcuenca, aspecto que ha sido poco explorado en estudios de escala local. Así mismo, desde un enfoque aplicado, la investigación generará insumos cartográficos y estadísticos útiles para orientar procesos de gestión ambiental, planificación territorial y diseño de estrategias de conservación.

A nivel institucional, esta iniciativa se enmarca dentro de los propósitos de fortalecimiento de la producción de conocimiento ambiental promovidos por las universidades colombianas. Al desarrollar un análisis técnico basado en el uso de tecnologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG), el proyecto no solo amplía el alcance metodológico de los estudios sobre deforestación, sino que también aporta soluciones prácticas para los retos de ordenamiento ambiental en territorios altamente transformados.

En términos metodológicos, la investigación adopta una estrategia cuantitativa que se apoya en la fotointerpretación de imágenes satelitales correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023. Esta aproximación multitemporal permitirá obtener una visión detallada sobre la evolución reciente de la cobertura vegetal, identificando las zonas más afectadas y estimando tasas de cambio que puedan ser utilizadas como referencia para futuras intervenciones. Cabe destacar que este tipo de enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de gran escala, pero aún presenta un potencial poco explorado en análisis a nivel de microcuencas como la del río Roble.

De igual manera, el trabajo responde a una necesidad concreta de las entidades territoriales y ambientales del Quindío, interesadas en contar con información técnica actualizada que sustente la formulación de políticas públicas. Los productos generados —principalmente mapas de cobertura, estadísticas de cambio de uso del suelo y delimitación de áreas críticas— podrán integrarse a instrumentos de planificación como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de Manejo de Microcuencas y Planes de Desarrollo Municipal, fortaleciendo su base técnica y espacial.

Así pues, el valor agregado de este proyecto radica en su capacidad de articular el análisis geoespacial con la gestión ambiental local. Los resultados obtenidos permitirán a instituciones como la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) y a los gobiernos municipales contar con evidencia precisa y georreferenciada sobre el estado actual de la vegetación, facilitando la toma de decisiones informadas y fundamentadas en datos verificables (IDEAM, 2020).

Además, se espera que el conocimiento derivado del estudio pueda ser replicado en otras microcuencas de características similares, tanto en el Eje Cafetero como en otras regiones del país o del mundo. En efecto, la integración de metodologías multitemporales y geoespaciales en estudios de escala local constituye una herramienta poderosa para enfrentar los retos del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas naturales.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

Analizar la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble (Quindío), mediante un estudio multitemporal entre los años 2018, 2021 y 2023.

6.2. Objetivos específicos

- Seleccionar y procesar imágenes satelitales de la misión Sentinel-2 correspondientes a los años de estudio, garantizando la resolución espacial y temporal necesaria para un análisis multitemporal de la cobertura del suelo.
- Clasificar las coberturas del suelo de la cuenca para los años de estudio, aplicando la metodología Corine Land Cover (CLC) como base para la interpretación de los usos del suelo.
- Cuantificar los cambios de coberturas presentes en cada uno de los años de las imágenes obtenidas, con el fin de evaluar las variaciones en la cobertura vegetal, áreas de producción y casco urbano.

7. Hipótesis

El presente estudio parte de la suposición de que en la microcuenca del río Roble, ha ocurrido una disminución significativa de la cobertura vegetal durante el periodo comprendido entre los años 2018, 2021 y 2023. Esta transformación se presume como resultado de la interacción entre factores antrópicos, como el avance de la frontera agrícola, el crecimiento urbano y la ganadería, y fenómenos naturales asociados a condiciones climáticas extremas. La hipótesis surge de la necesidad de comprobar si estos factores han influido de manera directa en la reducción de áreas boscosas, y si es posible cuantificar esa pérdida mediante herramientas de análisis geoespacial

7.1. Hipótesis de trabajo

Se presume que la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble ha disminuido de manera significativa entre los años 2018 y 2023, debido al aumento de actividades humanas como la agricultura intensiva, el desarrollo urbano y la expansión ganadera. Esta pérdida puede ser identificada y cuantificada mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales, aplicando técnicas de fotointerpretación y clasificación del suelo bajo la metodología Corine Land Cover (CLC).

7.1.1. Hipótesis nula

No se ha producido una disminución significativa de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble durante los años 2018, 2021 y 2023. Las coberturas del suelo se han mantenido relativamente constantes, sin evidencias de transformación espacial relevantes asociadas a causas antrópicas o naturales.

7.1.1.1 Hipótesis alterna.

Existe una reducción significativa en la cobertura vegetal de la microcuenca del río Roble entre los años 2018, 2021 y 2023, atribuible principalmente a la influencia de actividades

humanas como el cambio de uso del suelo, la expansión urbana y la intensificación de prácticas agrícolas, lo cual puede ser comprobado a través de la interpretación multitemporal de imágenes satelitales y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

7.1.1.1.1 Variables.

La variable independiente en este estudio corresponde al tiempo (años 2018, 2021 y 2023), mientras que la variable dependiente es la cobertura vegetal presente en la microcuenca del río Roble. De forma complementaria, se consideran variables intervinientes como el crecimiento poblacional, la presión sobre el suelo por actividades económicas (agricultura, ganadería, urbanismo), y los factores climáticos que inciden en los procesos de deforestación.

8. Marco teórico

8.1. Problemática ambiental global.

La pérdida de cobertura vegetal constituye uno de los principales problemas ambientales del siglo XXI. Este fenómeno, que se manifiesta principalmente en la deforestación y la transformación de ecosistemas naturales en tierras productivas o urbanas, ha sido identificado como una de las mayores amenazas para la sostenibilidad ambiental del planeta (FAO, 2020). En particular, las regiones tropicales y subtropicales son las más afectadas por esta pérdida, dado que son territorios ricos en biodiversidad, pero también altamente vulnerables a las presiones humanas, como la expansión de la frontera agrícola, la urbanización descontrolada y las actividades extractivas.

La pérdida de vegetación tiene consecuencias profundas sobre los ecosistemas y las comunidades humanas que dependen de estos servicios ambientales. Los ecosistemas naturales cumplen funciones fundamentales, tales como la regulación del ciclo del agua, la estabilización del suelo, el secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad. Así, cuando se produce la pérdida de vegetación, se afectan estos servicios ecológicos, lo que aumenta la vulnerabilidad de los territorios frente a fenómenos como las inundaciones, la erosión del suelo y la escasez de agua. Además, el cambio climático amplifica los efectos de la pérdida de cobertura vegetal, ya que la deforestación contribuye al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, acelerando el calentamiento global (FAO, 2020).

8.2. Problemática en el Eje Cafetero.

En Colombia, el Eje Cafetero es una región de particular relevancia, tanto por su biodiversidad como por su importancia económica debido a la producción agrícola, principalmente de café. Sin embargo, esta región ha sido históricamente vulnerable a las presiones derivadas de la expansión de la agricultura intensiva, la ganadería extensiva y la urbanización desordenada. Estas actividades humanas han alterado profundamente los ecosistemas naturales, dando lugar a una transformación acelerada de los paisajes (García, 2018).

La situación es aún más crítica en áreas de microcuencas, donde la fragmentación del paisaje y la pérdida de conectividad ecológica agravan el deterioro ambiental.

La microcuenca del río Roble, ubicada en el departamento del Quindío, representa un caso emblemático de esta problemática. Esta región ha sido testigo de la expansión de las actividades agrícolas, especialmente del cultivo de palma de aceite, y del crecimiento urbano no planificado. Como resultado, se han producido alteraciones significativas en la cobertura vegetal, lo que compromete no solo los recursos naturales de la cuenca, sino también la seguridad hídrica y la biodiversidad local.

8.3. Herramientas geoespaciales.

El uso de herramientas geoespaciales se ha consolidado como una estrategia eficiente para el monitoreo y la gestión de los recursos naturales, especialmente en áreas de difícil acceso y alta dinámica, como las microcuencas. La teledetección es una de las metodologías más poderosas en este sentido, ya que permite obtener información espacial precisa a través de imágenes satelitales. Estas imágenes, captadas en diferentes momentos del tiempo, facilitan el análisis multitemporal de la cobertura vegetal, lo que permite evaluar la evolución y los cambios en el paisaje.

Las imágenes Sentinel-2 y Landsat 9 han sido claves en el monitoreo de la cobertura terrestre. Las imágenes de Sentinel-2, con su alta resolución espacial (10, 20 y 60 metros) y una frecuencia de adquisición de 5 días, permiten detectar cambios en la vegetación y el uso del suelo con gran detalle (Zhu et al., 2018). Landsat 9, por su parte, ofrece un seguimiento de larga duración (desde los años 70 hasta la fecha), lo que facilita el análisis de cambios a largo plazo.

Estas proporcionan datos multiespectrales que permiten la obtención de índices de vegetación, como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que se utiliza ampliamente para evaluar la salud y densidad de la vegetación. El NDVI compara la reflectancia del rojo visible (baja reflectancia en vegetación sana) con el infrarrojo cercano (alta reflectancia en vegetación sana), lo que permite identificar áreas de deforestación, regeneración o estabilidad ecológica (Rouse et al., 1974; Pettorelli et al., 2005).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) complementan la teledetección al proporcionar herramientas para procesar, analizar e interpretar la información espacial obtenida de las imágenes satelitales. Los SIG permiten integrar datos geoespaciales y realizar análisis avanzados, como la clasificación del uso del suelo y el cálculo de áreas afectadas por la pérdida

de cobertura vegetal. A través de la clasificación supervisada, se pueden generar mapas temáticos que indican el uso del suelo en diferentes clases, tales como zonas forestales, agroecosistemas, áreas urbanas y áreas de pastoreo. Uno de los sistemas más utilizados para la clasificación del uso del suelo es Corine Land Cover (CLC) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que permite clasificar grandes áreas en categorías estandarizadas (European Environment Agency [EEA], 2018).

Este sistema ha sido validado en diversos estudios de análisis territorial y es especialmente útil en escalas intermedias, como las microcuencas (Barrios Amaya & Ochoa Cáceres, 2021).

Tabla 1. Clasificación Corine Land Cover (CLC)- Nivel 1-2 y 3.

NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3	CODIGO	RGB
Superficies artificiales	Zonas urbanas	Tejido urbano continuo	111	230-000-077
		Tejido urbano discontinuo	112	255-000-000
	Zonas industriales, comerciales y de transporte	Zonas industriales o comerciales	121	204-077-242
		Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	122	204-000-000
		Zonas portuarias	123	230-204-204
		Aeropuertos	124	230-204-230
	Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	Zonas de extracción minera	131	166-000-204
		Escombreras y vertederos	132	166-077-000
		Zonas en construcción	133	255-077-255
	Zonas verdes artificiales, no agrícolas	Zonas verdes urbanas	141	255-166-255
		Instalaciones deportivas y recreativas	142	255-230-255
Zona agrícolas	Tierras de labor	Tierras de labor en secano	211	255-255-168
		Terrenos regados permanentemente	212	255-255-000
		Arrozales	213	230-230-000
	Cultivos permanentes	Viñedos	221	230-128-000
		Frutales	222	242-166-077
		Olivares	223	230-166-000
	Prados y praderas	Prados y praderas	231	230-230-077
		Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes	241	255-230-166
	Zonas agrícolas heterogéneas	Mosaico de cultivos	242	255-230-077
		Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi-natural	243	230-204-077
Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos	Bosques	Sistemas agroforestales	244	242-204-166
		Bosques de frondosas	311	128-255-000
		Bosques de coníferas	312	000-166-000
	Espacios de vegetación arbustiva y o herbácea	Bosque mixto	313	077-255-000
		Pastizales naturales	321	204-242-077
		Landas y matorrales mesófilos	322	166-255-128
		Matorrales esclerófilos	323	166-230-077
		Matorral boscoso de transición	324	166-242-000
	Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Playas, dunas y arenales	331	230-230-230
		Roquedo	332	204-204-204
		Espacios con vegetación escasa	333	204-255-204
		Zonas quemadas	334	000-000-000
		Glaciares y nieves permanentes	335	166-230-204
Zonas húmedas	Zonas húmedas continentales	Humedales y zonas pantanosas	411	166-166-255
		Turberas y prados turbosos	412	077-077-255
	Zonas húmedas litorales	Marismas	421	204-204-255
		Salinas	422	230-230-255
Superficies de agua	Aguas continentales	Zonas llanas intermareales	423	166-166-230
	Aguas marinas	Cursos de agua	511	000-204-242
		Láminas de agua	512	128-242-230
		Lagunas costeras	521	000-255-166
		Estuarios	522	166-255-230
		Mares y océanos	523	230-242-255

Fuente: Gis y Beers 2016.

La fragmentación del paisaje es un fenómeno asociado con la pérdida de cobertura vegetal. Este proceso implica la división de grandes áreas naturales en fragmentos pequeños y aislados, lo que reduce la conectividad ecológica y afecta negativamente la circulación de especies y la resiliencia de los ecosistemas (Fahrig, 2003). La fragmentación del paisaje también

tiene implicaciones en la dispersión de semillas, la migración de fauna y la capacidad de los ecosistemas para recuperar sus funciones ecológicas tras perturbaciones.

El análisis espacial de la fragmentación permite identificar áreas críticas donde la conectividad ecológica se ha visto alterada, lo que facilita la planificación de estrategias de restauración ecológica. En este sentido, el uso de SIG y teledetección es fundamental para la identificación de los parches de hábitat y las zonas de corredores ecológicos que pueden ser restaurados o protegidos para mejorar la conectividad entre ecosistemas fragmentados (Corzo Ramírez et al., 2012).

8.4. Enfoque metodológico integrado.

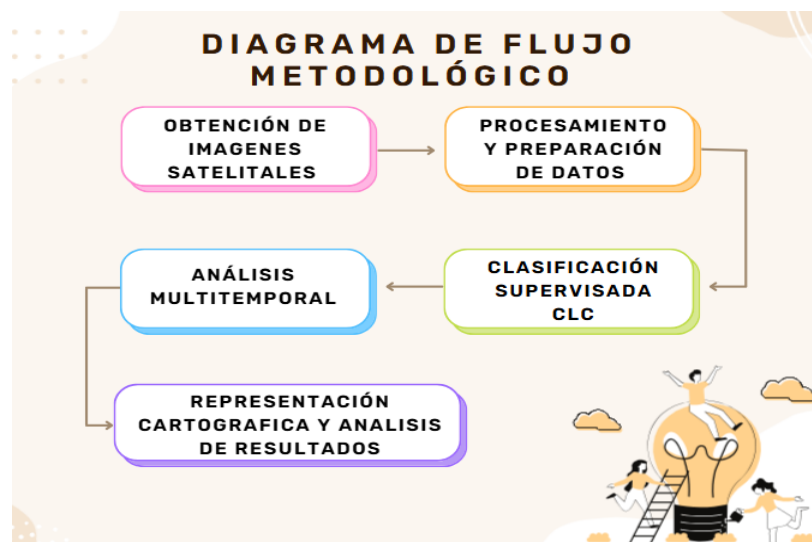
La combinación de teledetección, análisis multitemporal, clasificación supervisada y el estudio de la fragmentación del paisaje ofrece una aproximación integral al estudio de la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble. Esta metodología permite obtener una comprensión detallada de las dinámicas de cambio en la vegetación, identificar las causas subyacentes de la pérdida de cobertura y evaluar el impacto de las actividades humanas y naturales sobre los ecosistemas.

La integración de teledetección, análisis multitemporal, clasificación supervisada y evaluación de la fragmentación ofrece una forma integral y precisa de abordar la pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble. Esta metodología permite estudiar no solo los cambios en la vegetación, sino también los patrones de uso del suelo y las dinámicas de fragmentación en el paisaje. A través del análisis de imágenes satelitales de los años 2018, 2021 y 2023, es posible obtener información crucial para comprender cómo han evolucionado los ecosistemas en respuesta a las actividades humanas y naturales. Esta comprensión es esencial para guiar la planificación territorial, las estrategias de restauración ecológica y la conservación de los recursos naturales en el departamento del Quindío.

9. Metodología

En este capítulo se describieron los procedimientos empleados para alcanzar los objetivos de la investigación. El estudio se orientó a la caracterización y análisis multitemporal de la cobertura y uso del suelo en la microcuenca del río Roble (Quindío) durante los años 2018, 2021 y 2023, aplicando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de teledetección. La metodología se estructuró en fases: tipo de estudio, delimitación del área, recopilación de insumos, preprocesamiento de imágenes, clasificación temática, validación, análisis de cambios y evaluación de conflictos de uso del suelo.

Figura 2. Diagrama de flujo metodológico.



Fuente: Autoría propia, 2025.

9.1. Tipo de estudio

Este estudio es de tipo descriptivo y comparativo. La naturaleza descriptiva del estudio permite representar, clasificar y documentar detalladamente las distintas coberturas del suelo identificadas en los años 2018, 2021 y 2023, a partir de imágenes satelitales procesadas con

herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Al mismo tiempo, el enfoque comparativo posibilita establecer relaciones entre los distintos periodos de análisis, permitiendo identificar patrones de transformación del paisaje, como la pérdida de vegetación natural, el aumento de zonas agrícolas o la expansión del área urbana. Este tipo de estudio es adecuado para investigaciones espaciales de carácter ambiental, donde el objetivo principal es comprender los cambios que ocurren en un territorio a partir de una observación sistemática de sus componentes geográficos (Castro & Franco, 2021).

La integración de herramientas cuantitativas y visuales en este estudio proporciona una base sólida para la interpretación de los resultados, pues permite observar tendencias espaciales, asociarlas con factores naturales o antrópicos, y generar información útil para la formulación de políticas de manejo sostenible del territorio (Cabrera et al., 2020).

El periodo de tiempo seleccionado responde a la necesidad de contar con información reciente y disponible para realizar un análisis multitemporal actualizado y representativo del comportamiento de la cobertura y uso del suelo en la microcuenca del río Roble. Estos años permiten observar transformaciones ocurridas durante un periodo de cinco años, con intervalos de tres y dos años, lo cual es metodológicamente viable en estudios de dinámica del paisaje, especialmente en contextos rurales y periurbanos donde los cambios en el uso del suelo pueden ocurrir con rapidez (Chuvieco, 2016).

Se priorizaron estos años por la disponibilidad de imágenes satelitales libres de nubosidad, adquiridas entre enero y marzo, que garantizan condiciones óptimas para la comparación radiométrica y espacial. A pesar de tratarse de intervalos relativamente cortos, este enfoque permite identificar procesos activos de transformación como la expansión agrícola, la fragmentación de coberturas naturales o el crecimiento urbano y establecer patrones tempranos de cambio, lo que es útil para la formulación de medidas de manejo territorial.

Cabe destacar que varios estudios recientes sobre cambio de cobertura en cuencas andinas han demostrado que, incluso en periodos de dos a tres años, es posible evidenciar impactos significativos del uso del suelo sobre la vegetación natural y los recursos hídricos (Cabrera et al., 2020; Castro & Franco, 2021), lo cual respalda la viabilidad del presente análisis.

9.2. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la microcuenca del río Roble, localizada en el departamento del Quindío, en jurisdicción de los municipios de Salento y Circasia. El área de estudio presenta una extensión aproximada de 1.870 hectáreas, con un rango altitudinal que oscila entre 1.800 y 2.600 m s. n. m., dentro de la zona andina de Colombia, la cual se caracteriza por un clima templado húmedo. Para la delimitación de la microcuenca se utilizó la información cartográfica oficial establecida en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río La Vieja POMCA (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2018; Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2012), ajustada al sistema de referencia MAGNA-SIRGAS / Origen Nacional (EPSG:9377). La interpretación de las coberturas se realizó a una escala de trabajo 1:25.000, de acuerdo con los lineamientos del IDEAM (2010).

9.3. Insumos y fuentes de información

9.3.1. Adquisición y procesamiento de imágenes satelitales

Se seleccionaron imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 como fuente principal de datos, debido a su adecuada resolución espacial (10 a 20 metros), cobertura multispectral (bandas RGB y del infrarrojo cercano) y su disponibilidad gratuita a través de la plataforma Copernicus Open Access Hub. Se eligieron escenas correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023, priorizando aquellas adquiridas entre los meses de enero y marzo, con el fin de reducir al mínimo la presencia de nubosidad y garantizar condiciones atmosféricas comparables entre periodos.

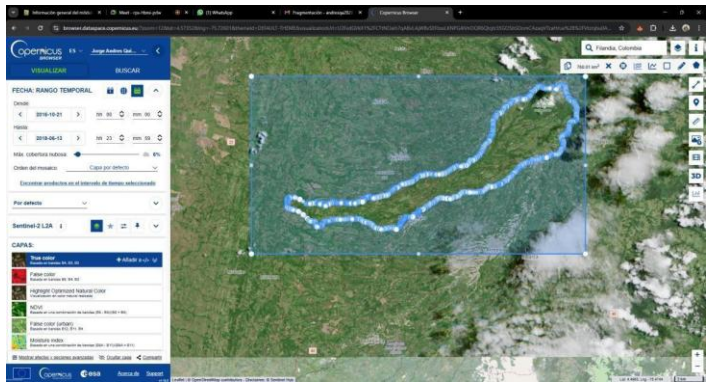
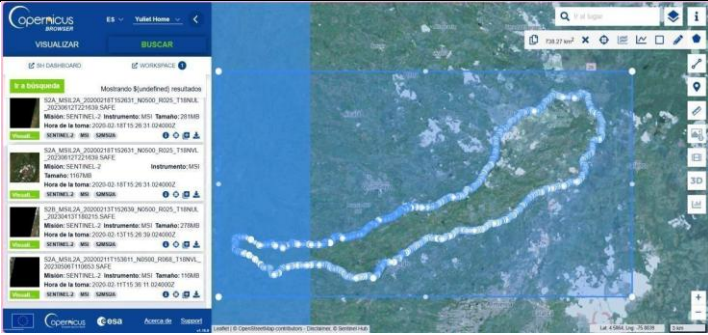
El procesamiento de las imágenes se realizó empleando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), específicamente los programas ArcGIS 10.8 y QGIS, que permitieron llevar a cabo tareas como la corrección radiométrica, recorte de áreas de interés, clasificación supervisada y análisis multitemporal de los cambios en la cobertura del suelo.

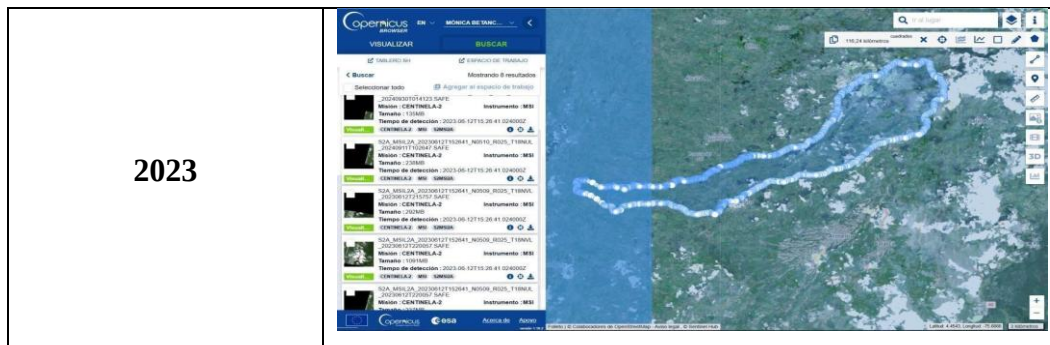
9.3.2. Descarga de imágenes satelitales

La obtención de las imágenes se realizó mediante las plataformas Copernicus Open Access Hub (para Sentinel-2), utilizando el shapefile de la microcuenca como filtro geográfico para garantizar que las imágenes cubrieran completamente el área de estudio (Tabla 2).

Se revisó cada imagen para asegurar que el porcentaje de nubosidad sobre el área de interés fuera menor al 13%; en caso de superar este umbral, se descartó la imagen y se buscó una alternativa adecuada.

Tabla 2. Descarga imágenes Sentinel-2.

AÑO	IMAGEN
2018	
2021	



Fuente: COPERNICUS. <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>.

Como insumo complementario, se empleó la plataforma Google Earth, la cual permitió corroborar e identificar sectores con presencia de nubosidad o con incertidumbre en la interpretación. Esta herramienta posibilita la delimitación precisa de áreas de interés y la consulta de imágenes históricas, lo que facilitó la verificación de dichas zonas en el año de análisis.

9.3.3. Procesamiento de imágenes

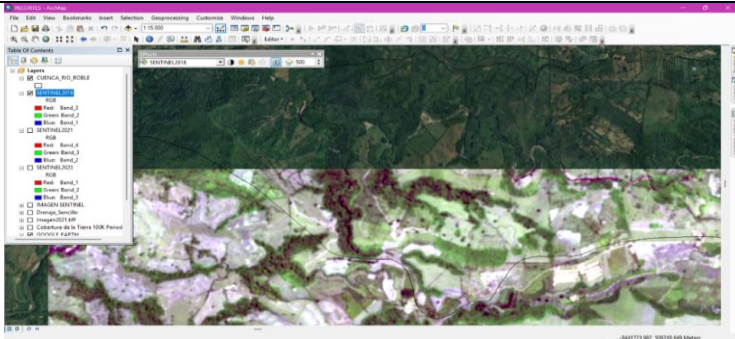
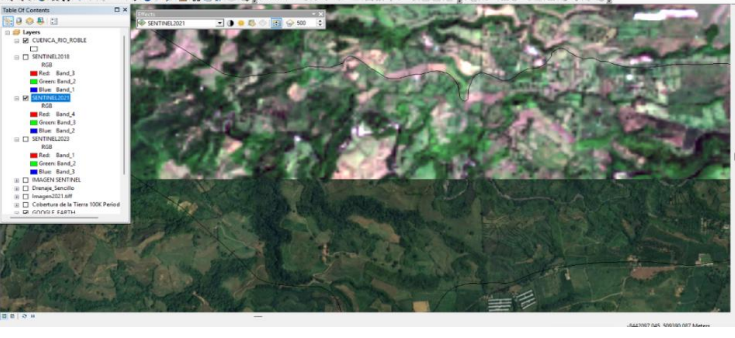
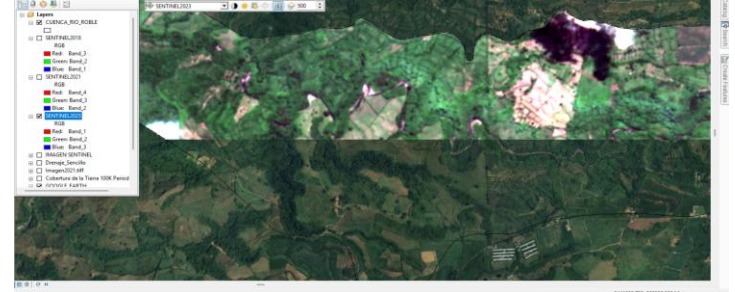
Para el procesamiento de imágenes satelitales se emplearon las plataformas ArcGIS 10.8 y QGIS. Estas aplicaciones se utilizaron para la descarga, preprocesamiento, clasificación supervisada, análisis multitemporal y generación de cartografía temática de la cobertura vegetal en la microcuenca del río Roble. El uso de ArcGIS 10.8 facilitó la organización de bases de datos geográficas, la aplicación de algoritmos de clasificación y la generación de mapas finales. Por su parte, QGIS, como software libre, permitió complementar realizar la unión de bandas y recorte de la imagen.

Una vez descargadas, las imágenes satelitales Sentinel-2 fueron sometidas a un proceso de procesamiento y control de calidad que comprendió los siguientes pasos:

Corrección y alineamiento geométrico: Se revisó y ajustó el registro espacial de cada imagen para alinearlas al sistema de coordenadas UTM Zona 18N, utilizando la herramienta Project Raster de ArcGIS 10.8, garantizando la consistencia espacial entre las imágenes correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023. Se compararon elementos fijos como cruces de vías, curvas de los ríos y límites de la cuenca, verificando que coincidieran en las imágenes de los

tres años. Se emplearon funciones de transparencia y herramientas como Swipe para comprobar visualmente el alineamiento entre escenas Tabla 3.

Tabla 3. Corrección y alineamiento geométrico.

AÑO	IMAGEN
2018	
2021	
2023	

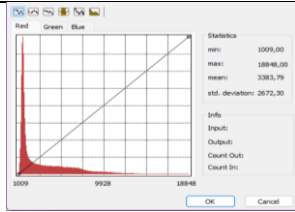
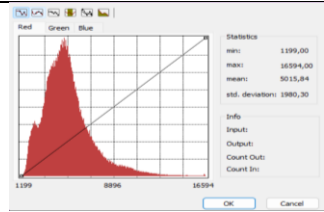
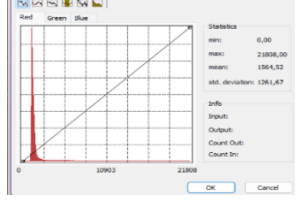
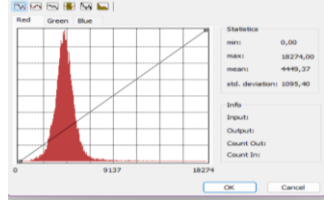
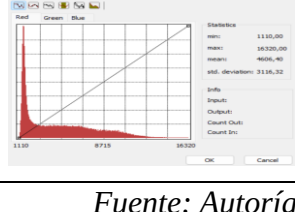
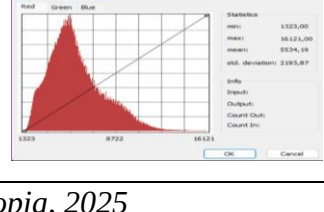
Fuente: Autoría propia, 2025.

Corrección atmosférica: Las imágenes Sentinel-2 utilizadas en el análisis ya se encuentran en nivel L2A, lo que indica que han sido previamente corregidas atmosféricamente. Esto significa que contienen productos de reflectancia superficial, con las distorsiones

atmosféricas eliminadas, lo que permite una mejor comparabilidad radiométrica entre las diferentes fechas de análisis.

Normalización radiométrica: Se verificó la consistencia radiométrica comparando los histogramas de las bandas de interés (principalmente rojo e infrarrojo cercano) entre los distintos años, utilizando la herramienta Histogram, se verifico cada banda en ArcGIS 10.8, reduciendo los efectos de condiciones atmosféricas y diferencias de iluminación solar Tabla 4.

Tabla 4. Normalización radiométrica de las imágenes.

AÑO	Imagen Inicial	Imagen final
2018		
2021		
2023		

Fuente: Autoría propia, 2025

9.3.4. Cartografía base y temática

Cartografía básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): Proporcionó la referencia espacial oficial para la delimitación de la microcuenca y la ubicación de elementos geográficos relevantes.

Mapa de Coberturas de la Tierra CLC 2018 (IDEAM): Ofreció una base temática estandarizada que permitió validar y contrastar las clasificaciones multitemporales generadas en este estudio.

9.4. Clasificación supervisada de coberturas

En el presente estudio, la clasificación supervisada de las coberturas se realizó mediante fotointerpretación visual, utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Este procedimiento consistió en identificar y delimitar manualmente las diferentes categorías de uso y cobertura del suelo a partir de las características espectrales, texturales y contextuales observadas en las imágenes. La fotointerpretación se basó en el criterio experto del analista, apoyado en referencias cartográficas oficiales (como el mapa CLC 2018 del IDEAM) y en la información temática disponible para la zona de estudio, permitiendo garantizar una clasificación ajustada a las particularidades locales de la microcuenca del río Roble (Tabla 5). Se aplicó la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada a Colombia (IDEAM, 2010), que organiza la información en tres categorías principales: Naturales, Semi naturales y No naturales (Tabla 6).

Tabla 5. Fases para la clasificación supervisada.

Fase	Descripción
Definición de Objetivos	Establecimiento de los propósitos del proyecto de clasificación de cobertura y uso del suelo.
Adquisición de Imágenes Satelitales	Obtención de imágenes satelitales (como Sentinel-2) y ortofotos para la cartografía.
Preprocesamiento de Imágenes	Corrección geométrica y radiométrica de las imágenes para garantizar la calidad.
Fotointerpretación y Clasificación	Interpretación visual y/o automática para clasificar las coberturas de acuerdo con la nomenclatura CLC.
Generación de archivos vectoriales	Creación de capas geoespaciales con los datos clasificados y su almacenamiento en sistemas SIG.
Producción del Mapa CLC	Generación de mapas de cobertura y uso del suelo siguiendo los estándares CORINE.

Fuente: European Environment Agency (EEA). (2018). CORINE Land Cover – Methodology. European Environment Agency.

Tabla 6. Clasificación Corine Land Cover (CLC).

Código	Categoría Principal	Descripción
1	Terrenos artificiales	Áreas urbanizadas, infraestructuras, zonas industriales, redes de transporte.
2	Áreas agrícolas	Tierras de cultivo, pastizales, cultivos permanentes y mosaicos agrícolas.
3	Bosques y espacios naturales	Bosques, matorrales, praderas naturales y áreas con vegetación baja.
4	Humedales	Marismas, pantanos, turberas y otras áreas con alta humedad.
5	Cuerpos de agua	Ríos, lagos, embalses, mares y océanos.

Fuente: European Environment Agency (EEA). (2018). CORINE Land Cover – Methodology. European Environment Agency.

9.5. Reagrupación de coberturas

El análisis multitemporal se realizó siguiendo la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia por el IDEAM (2010), la cual establece una leyenda jerárquica en cinco niveles de detalle que permite representar de forma precisa la diversidad de coberturas del territorio nacional. La clasificación e interpretación inicial de las coberturas en el área de estudio (municipios de Circasia, Quimbaya y Filandia – Quindío) se efectuó aplicando la leyenda CLC hasta nivel 3, garantizando así un proceso riguroso y metodológicamente consistente.

Posteriormente, con el fin de facilitar la interpretación de los resultados y enfocar el análisis en los procesos de transformación más relevantes, se realizó una reagrupación temática de las categorías en tres grandes grupos: Naturales, Semi naturales y No naturales (como se explica en la Tabla 7). Esta decisión metodológica se fundamenta en que, si bien la clasificación detallada permite reconocer coberturas específicas (p. ej. pastos limpios, pastos arbolados, cultivos permanentes arbustivos), su análisis individual no resulta significativo ya que los procesos de cambio se expresan principalmente como dinámicas amplias, tales como la expansión agrícola o la urbanización.

En este sentido, se ha señalado que el nivel de detalle en la clasificación debe ser coherente con la escala de análisis y los objetivos de investigación, para evitar confusión

interpretativa o sobreanálisis (Chuvieco, 2016). La propia estructura jerárquica de la leyenda CLC contempla esta posibilidad, al permitir trabajar tanto con unidades desagregadas como con niveles más generales cuando la escala y los objetivos lo ameriten (IDEAM, 2010). En consecuencia, la reagrupación no sustituye la clasificación CLC, sino que constituye una estrategia complementaria para simplificar la interpretación y discusión de los resultados.

Tabla 7. Agrupación de coberturas a partir de la clasificación detallada CLC (IDEAM, 2010).

Grupo propuesto	Categorías CLC adaptadas incluidas	Ejemplos en el área de estudio
Naturales	Bosque abierto, bosque de galería y/o ripario, bosque denso, vegetación secundaria o en transición, ríos, cuerpos de agua, tierras desnudas o degradadas	Bosque ripario, vegetación secundaria, cauces de río
Semi naturales	Cultivos agroforestales, cultivos permanentes arbóreos y arbustivos, cultivos permanentes herbáceos, mosaicos de cultivos y pastos, pastos (limpios, arbolados, enmalezados)	Cultivos de café, mosaico de pastos con cultivos, pastos limpios
No naturales	Tejido urbano continuo y discontinuo, instalaciones recreativas, zonas industriales o comerciales, red vial/ferroviaria, zonas de disposición de residuos	Centros poblados, vías, zonas industriales

Fuente: Elaboración propia, 2025.

9.6. Cuantificación y comparación de coberturas

Una vez obtenidos los mapas de coberturas correspondientes a cada año, se procedió a su cuantificación. Para ello, las coberturas resultantes de la interpretación fueron exportadas en formato shapefile (SHP), los cuales contienen en su tabla de atributos la información de cada polígono clasificado.

Posteriormente, mediante las herramientas de cálculo de geometría en ArcGIS 10.8, se determinó el área (en hectáreas) de cada cobertura dentro de la cuenca. Estos valores se incorporaron a la tabla de atributos y se exportaron a hojas de cálculo en formato Excel, con el fin de organizar la información y sistematizarla en tablas resumen por categorías.

A partir de esta información se calcularon los valores absolutos y porcentuales de cada clase de cobertura para cada año, lo que permitió establecer la distribución espacial de la cobertura vegetal, áreas de producción y tejido urbano.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo multitemporal, contrastando los resultados de los diferentes años y construyendo una matriz de cambios. Dicha matriz permitió identificar las transiciones más relevantes (por ejemplo, bosque cultivo o cultivo urbano), cuantificando tanto la pérdida como la ganancia de superficie en cada categoría. Estos resultados fueron representados en tablas, gráficos y mapas de variación, para facilitar su interpretación y análisis en relación con los factores antrópicos y naturales presentes en la cuenca.

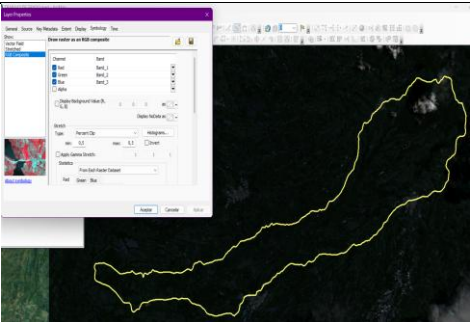
10. Resultados

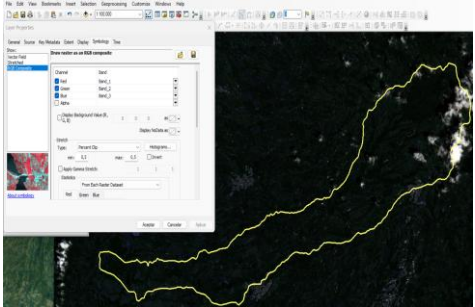
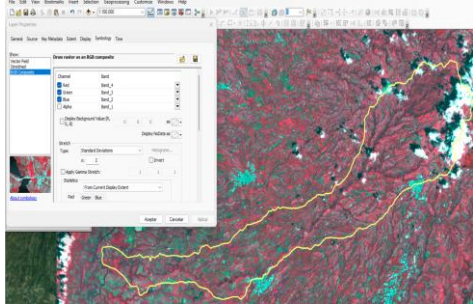
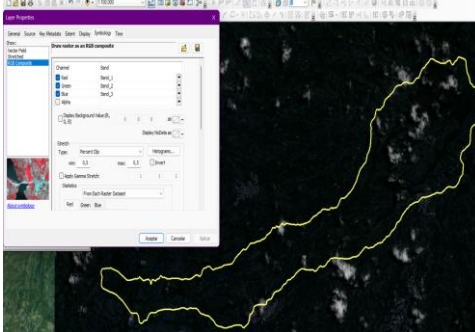
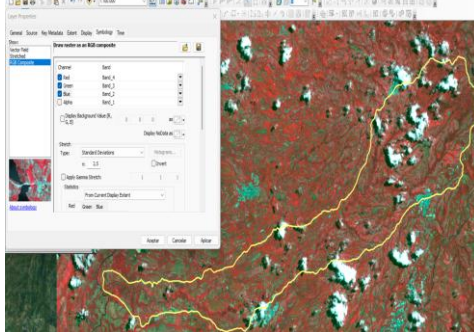
Los resultados de la investigación se derivan del procesamiento y análisis de imágenes satelitales correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023. Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la metodología Corine Land Cover (CLC), se elaboraron mapas temáticos que representan la distribución de las coberturas presentes en la microcuenca del río Roble. El procedimiento incluyó la descarga y preprocesamiento de imágenes Sentinel-2, la fotointerpretación y la clasificación supervisada, lo que permitió obtener una representación cartográfica homogénea y comparable en los tres periodos analizados.

10.1. Insumos y fuente de información

Las imágenes satelitales utilizadas en el estudio fueron descargadas de las plataformas oficiales (Copernicus) y posteriormente sometidas a procesos de corrección y preparación con el fin de garantizar una adecuada calidad para el análisis multitemporal. Entre las fases de procesamiento realizadas se incluyeron la unión de bandas, el recorte del área de estudio, así como ajustes radiométricos y geométricos básicos que permitieron estandarizar los insumos. A continuación, se presenta una tabla resumen con las características principales de cada imagen seleccionada, junto con los procedimientos aplicados para su preparación y análisis (Tabla 8).

Tabla 8. Procesamiento de imágenes Sentinel-2.

Imagen	Imagen Procesada	características principales
		Fecha: 09-01-2018
		Sensor: Sentinel-2A
		Resolución: 10 m
		Nubosidad: 5.4
		Procesos aplicados: Corrección y alineamiento

		geométrico. Fecha: 18-02-2021 Sensor: Sentinel-2^a Resolución: 10m Nubosidad: 12.5 Procesos aplicados: Corrección y alineamiento geométrico.
		Fecha: 12-06-2023 Sensor: Sentinel-2^a Resolución: 10m Nubosidad: 10 Procesos aplicados: Corrección y alineamiento geométrico.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

10.2. Clasificación supervisada mediante la metodología CLC

La clasificación supervisada se realizó aplicando la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia por el IDEAM (2010), siguiendo una leyenda jerárquica de cinco niveles. En este trabajo se trabajó hasta nivel 3, lo que permitió identificar con detalle coberturas como bosques densos, cultivos permanentes, pastos arbolados, mosaicos de cultivos, entre otras.

Sin embargo, dado que el objetivo del análisis era evaluar procesos amplios de transformación territorial más que cambios en coberturas específicas, se realizó una reagrupación temática en tres categorías principales: Naturales, Semi-naturales y No naturales. Esta decisión metodológica está respaldada tanto por el IDEAM (2010) como por Chuvieco (2016), quienes

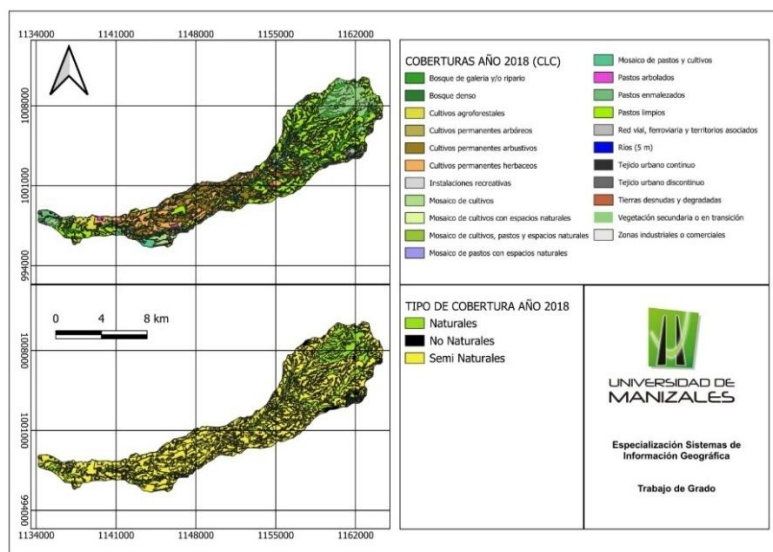
señalan que el nivel de detalle debe ser coherente con la escala de análisis y los objetivos para evitar interpretaciones confusas o sobre análisis. Así, la reagrupación no reemplaza la clasificación CLC, sino que facilita la interpretación multitemporal sin perder el rigor metodológico.

A continuación, se presentan los resultados por año, con los mapas y tablas correspondientes.

10.2.1. Resultados año 2018

El análisis para 2018 muestra un predominio de coberturas naturales como bosque denso y bosque de galería y ripario, especialmente en las zonas altas y centro del área de estudio. Las coberturas semi-naturales, principalmente mosaicos de cultivos con espacios naturales y vegetación secundaria, aparecen en sectores de transición. Por su parte, las coberturas no naturales (urbanas, industriales) se concentran en sectores localizados de la zona occidental (Figura 3).

Figura 3. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2018.



Fuente. Elaboración propia, 2025.

El análisis de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** revela que la categoría Natural domina ampliamente sobre las demás, mientras que las categorías Semi-

naturales y No naturales presentan coberturas de menor extensión, pero con localizaciones clave para la comprensión del paisaje en este año.

Tabla 9. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2018.

2018			
TIPO DE COBERTURA	COBERTURA	AREA (ha)	Porcentaje %
NATURALES	Bosque de galería y/o ripario	2431.85086	21.048%
	Bosque denso	7.304772	0.063%
	Ríos (5 m)	80.800885	0.699%
	Tierras desnudas y degradadas	2.139764	0.019%
	Vegetación secundaria o en transición	742.669444	6.428%
SEMINATURALES	Cultivos agroforestales	187.065131	1.619%
	Cultivos permanentes arbóreos	201.357135	1.743%
	Cultivos permanentes arbustivos	1847.38952	15.989%
	Cultivos permanentes herbáceos	876.620195	7.587%
	Mosaico de cultivos	163.400333	1.414%
	Mosaico de cultivos con espacios naturales	21.191399	0.183%
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	28.088176	0.243%
	Mosaico de pastos con espacios naturales	8.724593	0.076%
	Mosaico de pastos y cultivos	190.371286	1.648%
	Pastos arbolados	50.690373	0.439%
	Pastos enmalezados	391.246528	3.386%
	Pastos limpios	3954.60447	34.227%
NO NATURALES	Red vial, ferroviaria y territorios asociados	103.278838	0.894%
	Zonas industriales o comerciales	52.046681	0.450%
	Tejido urbano continuo	90.343055	0.782%
	Tejido urbano discontinuo	3.417812	0.030%
	Instalaciones recreativas	119.441933	1.034%
TOTAL		11554.0432	100.000%

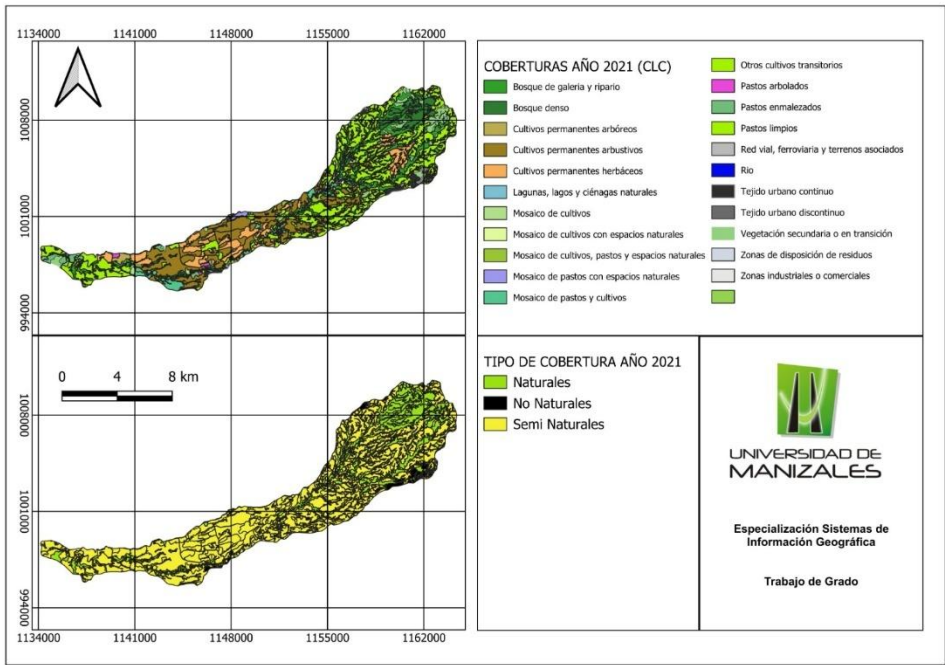
Fuente: Elaboración propia, 2025.

10.2.2. Resultados año 2021

Para 2021 se observa una diversificación de coberturas en varios sectores, con la aparición de otros cultivos transitorios y un incremento en vegetación secundaria y mosaicos de cultivos. Esto sugiere procesos de transformación en el uso del suelo, posiblemente relacionados con la expansión de la frontera agropecuaria (Figura 4).

Las áreas no naturales mantienen su localización principal, aunque se detectan ligeras expansiones periféricas respecto a 2018.

Figura 4. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2021.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Tabla 10 muestra que, en comparación con 2018, existe una reducción relativa de la categoría Natural y un incremento de Semi-naturales, reflejando la tendencia hacia una mayor transformación del territorio.

Tabla 10. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2021.

2021			
TIPO DE COBERTURA	COBERTURA	AREA (ha)	Porcentaje %

2021			
TIPO DE COBERTURA	COBERTURA	AREA (ha)	Porcentaje %
NATURALES	Bosque de galería y ripario	2259.6822	19.56%
	Bosque denso	444.0523	3.84%
	Rio	84.5652	0.73%
	Vegetación secundaria o en transición	373.6606	3.23%
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0.2967	0.00%
SEMINATURALES	Cultivos permanentes arbóreos	76.4522	0.66%
	Cultivos permanentes arbustivos	2200.9992	19.05%
	Cultivos permanentes herbáceos	1031.9630	8.93%
	Mosaico de cultivos	70.4872	0.61%
	Mosaico de cultivos con espacios naturales	14.6645	0.13%
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	84.9928	0.74%
	Mosaico de pastos con espacios naturales	49.0394	0.42%
	Mosaico de pastos y cultivos	236.0718	2.04%
	Otros cultivos transitorios	219.1229	1.90%
	Pastos arbolados	39.7212	0.34%
	Pastos enmalezados	454.5066	3.93%
	Pastos limpios	3613.9937	31.28%
	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	49.1979	0.43%
NO NATURALES	Tejido urbano continuo	181.2443	1.57%
	Tejido urbano discontinuo	38.3977	0.33%
	Zonas de disposición de residuos	2.5118	0.02%
	Zonas industriales o comerciales	28.8938	0.25%
TOTAL		11554.5172	100.00%

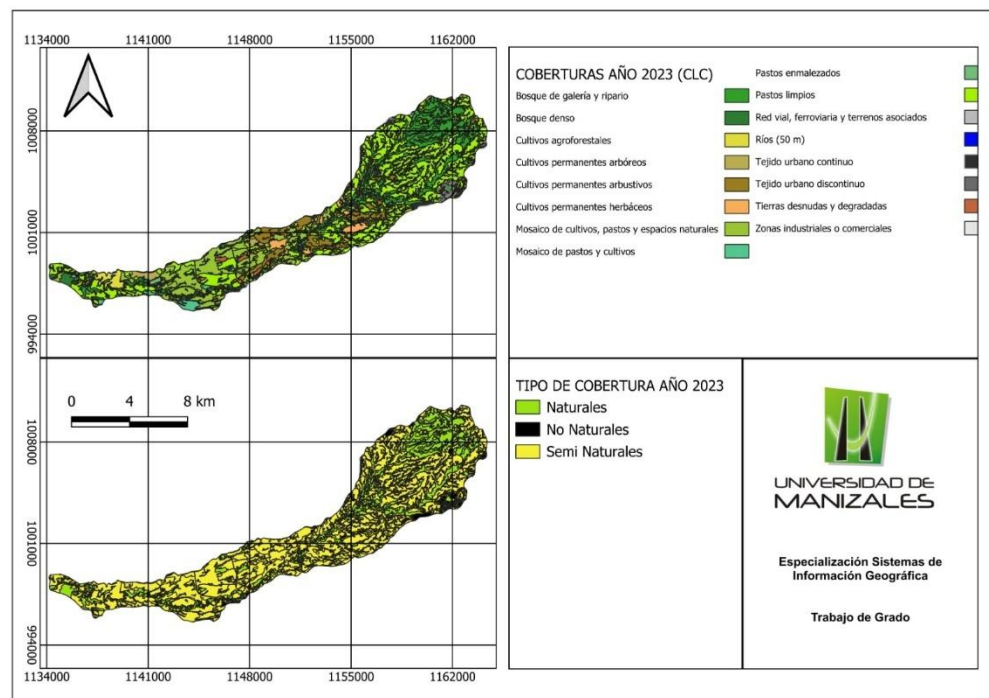
Fuente: Elaboración propia, 2025.

10.2.3. Resultados año 2023

En 2023, la clasificación evidencia la persistencia de áreas naturales, aunque se nota la consolidación de zonas agropecuarias, principalmente en forma de mosaicos de pastos y cultivos, que han ganado extensión frente a 2018 y 2021.

Las áreas no naturales mantienen su distribución general, pero con un proceso de consolidación en sectores donde ya estaban presentes en años anteriores (Figura 5).

Figura 5. Clasificación CLC y agrupación de coberturas. Año 2023.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La Tabla 11 confirma esta dinámica, mostrando un incremento progresivo de Semi-naturales y cierta estabilidad en las áreas No naturales, lo que sugiere una consolidación del patrón de transformación territorial observado en años previos.

Tabla 11. Coberturas a nivel 3 CLC. Año 2023.

2023			
TIPO DE COBERTURA	COBERTURA	AREA (ha)	Porcentaje %
NATURALES	Bosque de galería y ripario	2991.8879	25.90%
	Bosque denso	550.8887	4.77%
	Ríos (50 m)	78.5861	0.68%
	Tierras desnudas y degradadas	193.8489	1.68%
SEMINATURALES	Cultivos agroforestales	168.1679	1.46%
	Cultivos permanentes arbóreos	126.0445	1.09%
	Cultivos permanentes arbustivos	819.1523	7.09%
	Cultivos permanentes herbáceos	248.7141	2.15%
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1703.6920	14.75%
	Mosaico de pastos y cultivos	134.7721	1.17%
	Pastos limpios	4201.1233	36.36%

NO NATURALES	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	42.2250	0.37%
	Tejido urbano continuo	177.3875	1.54%
	Tejido urbano discontinuo	50.5370	0.44%
	Zonas industriales o comerciales	66.6915	0.58%
TOTAL		11553.7188	100.00%

Fuente: Elaboración propia, 2025.

10.2.4. Análisis temporal integrado

El análisis conjunto de los tres años revela que, aunque las coberturas naturales siguen siendo dominantes, existe una tendencia a la expansión de coberturas semi-naturales y a la consolidación de áreas no naturales.

Estos patrones sugieren procesos de transformación del territorio vinculados a la agricultura, ganadería y urbanización.

La interpretación detallada bajo la metodología CLC fue esencial para identificar estos cambios, mientras que la agrupación en tres categorías permitió sintetizar la información, facilitando la visualización de tendencias y patrones en el tiempo.

10.3. Cuantificación de cambios de cobertura

Con el propósito de dar cumplimiento al objetivo de cuantificar los cambios de coberturas presentes en cada uno de los años de las imágenes obtenidas, con el fin de evaluar las variaciones en la cobertura vegetal, áreas de producción y casco urbano, analizando el impacto de las actividades humanas y naturales en la cuenca, se desarrolló la cuantificación multitemporal a partir de los mapas de coberturas generados en la interpretación.

Tal como se describió en la metodología, los polígonos resultantes fueron procesados en ArcGIS 10.8 para calcular su superficie en hectáreas, y posteriormente sistematizados en hojas de cálculo para organizar la información por categorías. Con estos datos se elaboraron tablas y gráficos comparativos que permiten observar los cambios en términos absolutos y porcentuales, así como su distribución espacial.

10.3.1. Interpretación CLC nivel 3

Tabla 12. Distribución de coberturas CLC nivel 3 por año.

COBERTURA	2018		2021		2023	
	ÁREA (ha)	Porcentaje %	ÁREA (ha)	Porcentaje %	ÁREA (ha)	Porcentaje %
Bosque de galería y/o ripario	2431.85	21.0%	2259.68	19.6%	2991.89	25.9%
Bosque denso	7.30	0.1%	444.05	3.8%	550.89	4.8%
Cultivos agroforestales	187.07	1.6%	-	-	168.17	1.5%
Cultivos permanentes arbóreos	201.36	1.7%	76.45	0.7%	126.04	1.1%
Cultivos permanentes arbustivos	1847.39	16.0%	2201.00	19.0%	819.15	7.1%
Cultivos permanentes herbáceos	876.62	7.6%	1031.96	8.9%	248.71	2.2%
Instalaciones recreativas	119.44	1.0%	-	-	-	-
Mosaico de cultivos	163.40	1.4%	70.49	0.6%	-	-
Mosaico de cultivos con espacios naturales	21.19	0.2%	14.66	0.1%	-	-
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	28.09	0.2%	84.99	0.7%	1703.69	14.7%
Mosaico de pastos con espacios naturales	8.72	0.1%	49.04	0.4%	-	-
Mosaico de pastos y cultivos	190.37	1.6%	236.07	2.0%	134.77	1.2%
Pastos arbolados	50.69	0.4%	39.72	0.3%	-	-
Pastos enmalezados	391.25	3.4%	454.51	3.9%	-	-
Pastos limpios	3954.60	34.2%	3613.99	31.3%	4201.12	36.4%
Otros cultivos transitorios	-	-	219.12	1.9%	-	-
Red vial, ferroviaria y territorios asociados	103.28	0.9%	49.20	0.4%	42.23	0.4%
Ríos (50 m)	80.80	0.7%	84.57	0.7%	78.59	0.7%
Tejido urbano continuo	90.34	0.8%	181.24	1.6%	177.39	1.5%
Tejido urbano discontinuo	3.42	0.0%	38.40	0.3%	50.54	0.4%
Tierras desnudas y degradadas	2.14	0.0%	-	-	193.85	1.7%
Vegetación secundaria o en transición	742.67	6.4%	373.66	3.2%	-	-
Zonas de disposición de residuos	-	-	2.51	0.0%	-	-
Zonas industriales o comerciales	52.05	0.5%	28.89	0.3%	66.69	0.6%
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	-	-	0.30	0.0%	-	-
TOTAL ÁREA	11554.04	100.0%	11554.52	100.0%	11553.72	100.0%

Fuente: Elaboración propia, 2025.

La cuantificación inicial permitió identificar un conjunto amplio de categorías de cobertura, reflejando la diversidad de usos del suelo en la cuenca. Los resultados muestran que algunas categorías mantienen cierta estabilidad en superficie a lo largo de los años, mientras que otras presentan reducciones o incluso desaparecen del registro, lo cual es coherente con dinámicas propias del territorio, como la rotación de cultivos, la expansión de áreas productivas o

los procesos de transición vegetal (Tabla 12). Esta variabilidad evidencia tanto la complejidad de los cambios de uso como la dificultad de sostener un análisis detallado con tantas clases específicas.

En términos generales, los valores obtenidos permiten constatar transformaciones que, aunque menores en superficie dentro de categorías particulares, en conjunto configuran cambios relevantes en la estructura de coberturas. Esto sustenta la necesidad de reagrupar las categorías en tres bloques más amplios, con el fin de identificar las tendencias predominantes en la dinámica de la cuenca.

10.3.2. Agrupación de coberturas

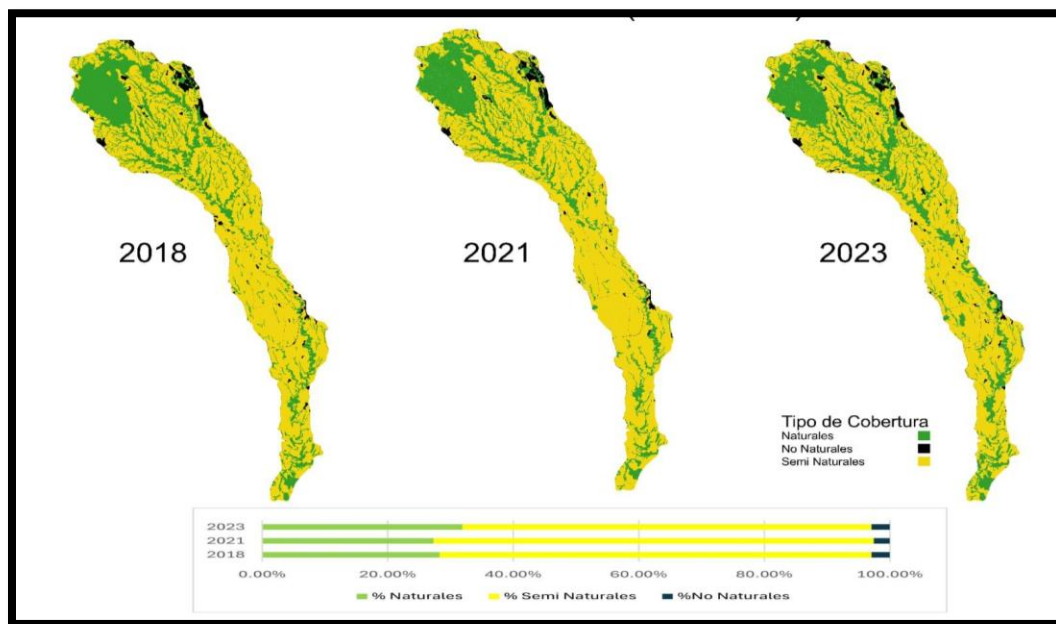
Tabla 13. Distribución de coberturas agrupadas por año.

Año	Naturales (ha)	%	Semi Naturales (ha)	%	No Naturales (ha)	%	Total (ha)
2018	3.264,77	28,26	7.920,75	68,55	368,53	3,19	11.554,04
2021	3.157,96	27,33	8.096,31	70,07	300,25	2,60	11.554,52
2023	3.815,21	33,00	7.401,73	64,00	336,78	3,00	11.553,72

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Los resultados de la agrupación muestran que las coberturas naturales representaban el 28,26 % en 2018, descendieron a 27,33 % en 2021 y aumentaron a 33,00 % en 2023. Las seminaturales dominaron durante todo el periodo, con un 68,55 % en 2018, un incremento a 70,07 % en 2021 y una reducción marcada a 64,00 % en 2023. Finalmente, las coberturas no naturales se mantuvieron en valores bajos y relativamente estables, cercanos al 3 (Tabla 13).

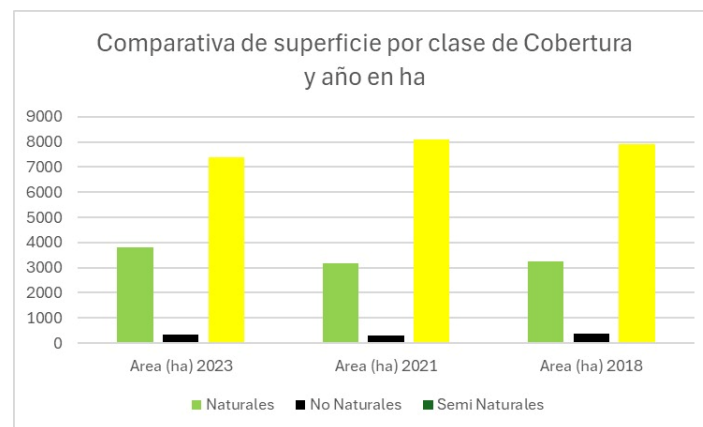
Figura 6. Mapa comparativo de coberturas para 2018, 2021 y 2023.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El mapa confirma que las coberturas seminaturales predominan en la parte central y sur de la cuenca, mientras que en el norte y occidente se observa un repunte de coberturas naturales en 2023. Las coberturas no naturales aparecen de manera puntual, vinculadas a centros poblados y corredores viales (Figura 6).

Figura 7. Comparativa de superficies por clase de cobertura y año.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El diagrama reafirma las tendencias (Figura 7), incremento de naturales en 2023, disminución de seminaturales y estabilidad de no naturales.

En conjunto, los resultados muestran que la dinámica de la cuenca en el periodo analizado está marcada por el intercambio entre coberturas seminaturales y naturales, mientras que las no naturales mantienen una incidencia reducida. Este comportamiento refleja procesos de regeneración ecológica y variaciones en la intensidad de las actividades agropecuarias, aspectos que se discutirán en relación con la gestión ambiental de la cuenca.

10.4. Validación de la clasificación

Con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en las clasificaciones supervisadas para los años 2018, 2021 y 2023, se realizó un proceso de validación basado en la comparación visual de las coberturas clasificadas con imágenes de alta resolución disponible en la plataforma de Google Earth, así como con información cartográfica de referencia proporcionada por el IGAC y el IDEAM. Esta validación se apoyó en el uso de puntos de control generados de forma aleatoria estratificada, distribuidos proporcionalmente entre las tres clases agrupadas: naturales, semi-naturales y no naturales.

El procedimiento permitió evaluar la correspondencia entre los valores clasificados y las coberturas reales observadas en el terreno, obteniendo como resultado una buena precisión general en todos los periodos. Si bien no se realizó una validación con puntos de campo (ground truth), el enfoque de verificación por fotointerpretación es ampliamente aceptado en estudios multitemporales cuando se dispone de series históricas y se trabaja a escala regional.

Los niveles de precisión global alcanzados se estimaron en rangos superiores al 85 %, con una concordancia especialmente alta en las coberturas naturales (por ejemplo, bosque de galería y bosque denso), gracias a su diferenciación espectral clara en las imágenes Sentinel-2. Las mayores confusiones se presentaron entre algunas coberturas semi-naturales, como los mosaicos de pastos y cultivos o los cultivos arbustivos y herbáceos, que presentan firmas espectrales similares y patrones espaciales complejos. A pesar de ello, los errores de comisión y omisión se mantuvieron dentro de márgenes aceptables, lo cual se reflejó en valores de exactitud en los tres años evaluados.

La calidad de la clasificación se considera adecuada y consistente para el análisis multitemporal, permitiendo detectar los principales patrones de transformación del paisaje en la microcuenca del río Roble. La aplicación de la metodología Corine Land Cover, junto con la reagrupación temática en tres clases, contribuyó a mejorar la interpretabilidad de los resultados y a reducir los errores derivados del exceso de detalle en clases con alta variabilidad espacial o temporal.

11. Discusión

El análisis multitemporal de coberturas en la microcuenca del río Roble entre 2018 y 2023 evidencia procesos significativos de transformación del paisaje, con implicaciones directas en uso del suelo y la gestión territorial. Mediante la aplicación de la metodología Corine Land Cover (CLC) adaptada para Colombia (IDEAM, 2010) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fue posible identificar y cuantificar cambios relevantes en las dinámicas de cobertura.

En primer lugar, los resultados muestran una predominancia sostenida de las coberturas semi-naturales, asociadas principalmente a usos agropecuarios como cultivos permanentes y pastos. Esta categoría presentó su valor más alto en 2021 (70,07%), con una posterior reducción en 2023 (64,00%), lo cual sugiere una transición hacia procesos de regeneración ecológica o disminución de la intensidad productiva en ciertos sectores. En paralelo, las coberturas naturales mostraron una tendencia inversa: disminuyeron en 2021 (27,33%) respecto a 2018 (28,26%), pero experimentaron un repunte significativo en 2023 (33,00%), evidenciando una posible recuperación de vegetación nativa, particularmente en zonas de bosque ripario y denso.

Este comportamiento puede interpretarse como resultado de dinámicas mixtas de presión antrópica y procesos de regeneración pasiva, lo que es consistente con estudios previos en sistemas rurales andinos, donde la expansión de la frontera agrícola coexiste con áreas en abandono o en transición ecológica (Chuvieco, 2016; Armenteras & Rodríguez, 2018).

Por su parte, las coberturas no naturales principalmente urbanas, industriales y de infraestructura se mantuvieron relativamente estables en torno al 3% durante todo el periodo analizado. Este hallazgo sugiere que, aunque existen procesos de urbanización, estos no constituyen el principal motor de cambio del uso del suelo en la cuenca, al menos durante una ventana temporal considerada. Por otro lado, se observaron procesos de consolidación del tejido urbano entre 2018 y 2021, lo cual puede anticipar escenarios de expansión futura si no se aplican mecanismos de control en el ordenamiento territorial.

La clasificación supervisada basada en imágenes Sentinel-2, con resolución de 10 m, demostró ser una herramienta eficaz para monitorear cambios en cobertura, especialmente al integrarse CLC y su agrupación en tres categorías. Esta decisión metodológica permitió sintetizar

tendencias territoriales sin perder la trazabilidad de las clases originales, facilitando así el análisis multitemporal a escala local (Congalton & Green, 2009).

No obstante, se reconocen algunas limitaciones al enfoque empleado. La clasificación supervisada depende en gran medida de la calidad de las muestras de entrenamiento, y ciertas coberturas como la vegetación secundaria o los mosaicos complejos pueden presentar espectros similares que dificultan su diferenciación precisa (Lu & Weng, 2007). Asimismo, los resultados reflejan solo la expresión superficial del territorio y no contemplan variables subyacentes como propiedad del suelo, intensidad de uso o cambios institucionales.

Finalmente, los cambios observados evidencian una transformación, donde la actividad agropecuaria sigue siendo dominante, pero con señales claras de recuperación vegetal en algunos sectores. Este patrón debe ser considerado en los procesos de planificación ambiental y ordenamiento del territorio, promoviendo estrategias diferenciadas según el tipo de cobertura y su evolución. El uso continuo de SIG y datos satelitales ofrece una vía eficiente y costo-efectiva para implementar sistemas de monitoreo espacial que sustenten la toma de decisiones basadas en evidencia.

12. Conclusiones

- En este estudio se logró seleccionar y procesar adecuadamente imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2018, 2021 y 2023, garantizando la calidad espacial y temporal necesaria para realizar un análisis multitemporal de la cobertura del suelo en la microcuenca del río Roble. El preprocesamiento de las imágenes, que incluyó correcciones geométricas y radiométricas, permitió contar con insumos homogéneos y comparables para cada periodo.

- La aplicación de la metodología Corine Land Cover (CLC), adaptada para el contexto colombiano, facilitó la clasificación detallada de las coberturas del suelo en la cuenca. Para simplificar la interpretación y responder a los objetivos planteados, se reagruparon las coberturas en tres categorías principales: naturales, semi-naturales y no naturales. Esta estrategia permitió identificar con claridad las tendencias generales en el uso del suelo sin perder el enfoque metodológico.

- Los resultados muestran que, a lo largo de los años estudiados, las coberturas semi-naturales dominan el paisaje, especialmente en relación con actividades agropecuarias. No obstante, se observa una recuperación notable de las áreas naturales en 2023, en particular en las zonas de bosque de galería y bosque denso, lo que sugiere procesos de regeneración o menor presión sobre estas áreas. Por otro lado, las coberturas no naturales, relacionadas con la urbanización y la infraestructura, se mantienen relativamente estables y localizadas en sectores específicos.

- El análisis multitemporal y cuantitativo de las coberturas evidencia dinámicas complejas de transformación territorial, donde la interacción entre actividades humanas y procesos naturales genera cambios en la estructura del paisaje. Estos cambios reflejan tanto la expansión y consolidación de usos productivos como la capacidad de recuperación de la vegetación natural en ciertos sectores de la cuenca.

- Finalmente, la validación realizada mediante fotointerpretación y el uso de información de alta resolución confirmó la fiabilidad de los resultados obtenidos. La precisión global superior al 85 % respalda la calidad del análisis y la aplicabilidad de la metodología CLC para estudios de monitoreo ambiental en la región. En conjunto, este trabajo aporta información valiosa para la gestión sostenible del territorio y la conservación de los recursos naturales en la microcuenca del río Roble.

13. Recomendaciones

Este análisis multitemporal evidencia que la microcuenca del río Roble presenta una dinámica territorial marcada por la alternancia entre coberturas naturales y seminaturales, lo que refleja tanto presiones antrópicas como procesos de regeneración ecológica. En este contexto, es necesario fortalecer la gestión ambiental local a través de estrategias integrales de restauración y conservación. Se recomienda que las autoridades ambientales y los gobiernos municipales articulen programas que promuevan la conectividad ecológica mediante la recuperación de corredores biológicos y la protección de los bosques riparios, los cuales cumplen un papel esencial en la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Estas acciones deben orientarse no solo a recuperar áreas degradadas, sino también a mantener y consolidar aquellas que muestran signos de regeneración natural, aprovechando la tendencia positiva identificada en el año 2023.

Asimismo, se considera prioritario que los instrumentos de planificación territorial, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), incorporen la información geoespacial generada en este estudio para orientar el uso sostenible del suelo y prevenir la expansión no planificada de actividades agropecuarias o urbanas. La integración de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la gestión ambiental permitirá un seguimiento continuo de las coberturas, por lo que se sugiere realizar actualizaciones periódicas cada dos o tres años de los mapas de uso y cobertura del suelo. Esto garantizará la disponibilidad de información precisa y actualizada para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y al desarrollo sostenible de la microcuenca del río Roble.

14. Referencias

- Ávila Ramírez, R., Rodríguez Méndez, F. A., Van Stralen Iguarán, H. E., Rentería Rodríguez, Y., & Ciro Hoyos, M. (2025). Análisis multitemporal del cambio de coberturas del suelo por minería ilegal en el Cantón de San Pablo – Chocó. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/7461>.
- Barrios Amaya, A., & Ochoa Cáceres, F. (2021). Cambios en el uso del suelo en la cuenca media del río Bogotá 2013–2020. *Revista Geográfica Colombiana*, 43(2), 67–82.
- Barrios Amaya, J. F., & Ochoa Cáceres, D. A. (2021). Análisis multitemporal de cambios en la cobertura del suelo en la cuenca media del río Bogotá (2013-2020). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 20(38), 123–137. <https://doi.org/10.22395/rium.v20n38a6>.
- Cabrera, M. I., Rodríguez, L. J., & Gómez, P. A. (2020). Aplicación de teledetección y SIG en el análisis multitemporal de coberturas del suelo en cuencas hidrográficas andinas. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 123–141. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n2.85210>
- Cabrera, D., López, C., & Paredes, J. (2020). Cambios en la cobertura del suelo en cuencas altoandinas de Colombia: análisis multitemporal con imágenes Sentinel-2. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(2), 45–62. <https://doi.org/10.15446/rcg.v29n2.85632>
- Castro, S. L., & Franco, J. A. (2021). Caracterización y monitoreo del cambio de uso del suelo mediante herramientas SIG y percepción remota. *Revista Ambiente & Desarrollo*, 25(1), 45–60.
- Caputi, E., Delogu, G., Patriarca, A., et al. (2025). Comparison of tree typologies mapping using random forest classifier algorithm of PRISMA and Sentinel-2 products in different areas of central Italy. *Remote Sensing*, 17(3), 356. <https://doi.org/10.3390/rs17030356>.
- Chacón Paja, J. A. (2023). Uso de los SIG en la zonificación ambiental de las canteras de arcilla en la vereda Pueblillo, municipio de Popayán (Cauca). *Revista Novedades*, 18, Art. 2300. <https://doi.org/10.47374/novcol.2023.v18.2300>.
- Chamberlain, D. A., Phinn, S. R., & Possingham, H. P. (2021). Mangrove forest cover and phenology with Landsat dense time series in central Queensland, Australia. *Remote Sensing*, 13(15), 3032. <https://doi.org/10.3390/rs13153032>.

- Chariarse Muñiz, A. D. (2021). Análisis multitemporal de uso de suelo y cobertura vegetal en la cuenca del río Chuyapi (Perú) [Tesis de grado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12557/4638>.
- Chuvieco, E. (2016). Fundamentos de teledetección espacial (5.^a ed.). Ediciones Rialp.
- Condori-Luna, I., Loza-Murguía, M., Mamani-Pati, F., & Solíz-Valdivia, H. (2018). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa mediante teledetección espacial y SIG en la subcuenca del río Coroico (Bolivia), 1989–2014. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 9(1), 25–44. http://scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942018000100003.
- Corzo Ramírez, M., Jerena Montiel, D. M., & Rubio Mendoza, A. (2012). Priorización de áreas para restauración ecológica usando herramientas SIG: un caso de estudio en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, (36), 46–54. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i36.414>.
- Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ). (2018). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río La Vieja (POMCA). <https://www.crq.gov.co>.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). (2020). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja (Cuenca, diagnóstico de cobertura vegetal en el Quindío). https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-02/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf.
- Cuellar, Y., & Perez, L. (2023). Multitemporal modeling and simulation of the complex dynamics in urban wetlands: the case of Bogota, Colombia. *Scientific Reports*, 13, 9374. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36600-8>.
- Escobar-López, A., Castillo-Santiago, M. Á., Hernández-Stefanoni, J. L., Mas, J. F., & López-Martínez, J. O. (2022). Identifying Coffee Agroforestry System Types Using Multitemporal Sentinel-2 Data and Auxiliary Information. *Remote Sensing*, 14(16), 3847. <https://doi.org/10.3390/rs14163847>.
- Espinosa-Herrera, J., Macedo-Cruz, A., Fernández-Reynoso, D. S., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Ordoñez, Y. M., & Soria-Ruiz, J. (2022). Monitoring and identification of agricultural crops through multitemporal analysis of optical images and machine learning algorithms. *Sensors*, 22(16), 6106. <https://doi.org/10.3390/s22166106>.
- European Environment Agency [EEA]. (2018). Corine Land Cover Manual – Technical guidelines. <https://www.eea.europa.eu>.

- European Environment Agency. (2018). CORINE Land Cover – Methodology. <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34, 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>.
- FAO. (2020). The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020: Principales resultados. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/ca8753es>.
- García, J. D. (2018). Transformaciones del paisaje en el Eje Cafetero: agricultura y pérdida de cobertura forestal. *Estudios Ambientales*, 12(2), 91–106. <https://doi.org/10.15332/ea.v12i2.1234>.
- García, R. (2018). La transformación de los paisajes del Eje Cafetero: Retos y oportunidades para la sostenibilidad. *Revista de Ciencias Ambientales*, 14(2), 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.rsca.2018.04.001>.
- Gessner, U., & Fuchs, M. (2020). Satellite-based monitoring of vegetation change in response to land-use intensification in tropical regions. *Remote Sensing*, 12(6), 975. <https://doi.org/10.3390/rs12060975>.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Hernández Reyes, A. R., & Arroyo Navarro, M. D. (2024). Evaluación del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la cuenca del río Fonce considerando factores tales como la condición meteorológica y topografía. [Trabajo de grado, Universidad CUC]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/0a79c0da-9ce4-49ea-9c93-855e9bb4a6f7/content>.
- Hong, F., He, G., Wang, G., Zhang, Z., & Peng, Y. (2023). Monitoring of land cover and vegetation changes in Juhugeng coal mining area based on multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 15(13), 3439. <https://doi.org/10.3390/rs15133439>.

- IDEAM. (2020). Monitoreo de la deforestación en Colombia: Informe técnico anual 2020. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co>.
- IDEAM. (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). Informe de deforestación en Colombia 2019–2020. IDEAM.
- Jácome-Aguirre, G., Farinango-Guatemal, D., León-Espinoza, M., & Rosales-Enríquez, O. (2024). Efectos del cambio de cobertura vegetal en la distribución potencial de la Mosquera (*Croton wagneri* Müll. arg.) en la cuenca hidrográfica del río Mira, Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (82), 127–144. <https://doi.org/10.14198/INGEO.27083>.
- Jiang, L., & Li, Y. (2024). Analysis of landscape pattern evolution and impact factors in the mainstream basin of the Tarim River from 1980 to 2020. *Hydrology*, 11(7), 93. <https://doi.org/10.3390/hydrology11070093>.
- Kurbanov, E., Vorobev, O., Lezhnin, S., Sha, J., Wang, J., Li, X., Cole, J., Dergunov, D., & Wang, Y. (2022). Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: A review. *Remote Sensing*, 14(19), 4714. <https://doi.org/10.3390/rs14194714>.
- Lara Rivera, D. E., Obando Hidalgo, C., & Quiñonez López, F. G. (2016). *Análisis multitemporal de coberturas vegetales y usos del suelo de la cuenca media del río San Francisco de Puracé, (1989-2014)* <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3007>.
- Lizarazo, T., Ramírez, D., & González, C. (2019). Aplicaciones de sensores remotos en el monitoreo de coberturas forestales en el Eje Cafetero. *Revista Geográfica Colombiana*, 45(2), 123–139.
- Londoño, C. A. (2022). Transformaciones territoriales y deforestación en Unguía, Chocó. *Revista Estudios Ambientales*, 20(1), 112–129.
- Manco Jaraba, D. C., Rojas Martínez, E. E., Gutiérrez Arbesú, J. D., & Ariza Mogollón, F. I. (2025). Multitemporal analysis for the identification of zones affected by erosion in the municipality of Plato, department of Magdalena (Colombia). *Inge CUC*, 20(2). <https://doi.org/10.17981/ingecuc.20.2.2024.14>.
- Murillo Patiño, J., & Obando Loja, M. (2024). Análisis multitemporal de cambios de cobertura en la subcuenca del río Burgay utilizando Landsat y Sentinel-2. *Revista Geoespacial*.

- Ogashawara, I., & Bastos, L. (2012). A quantitative approach for assessing urban vegetation cover using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 6(2), 95–105. <https://doi.org/10.4090/juee.2012.v6n2.095105>
- Pacheco, P., & Lima, C. (2020). Monitoring forest cover and land-use changes in tropical regions using remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 272, 111031. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111031>
- Paredes, J., Valencia, C., & Ruiz, S. (2022). Transformación del paisaje y conflictos socioambientales en cuencas rurales del Quindío. *Revista Estudios Ambientales*, 18(1), 45–62.
- Patiño, C., & Estupiñán, D. (2019). Fragmentación del paisaje y su relación con la pérdida de biodiversidad en ecosistemas andinos. *Revista de Ecología y Territorio*, 15(2), 123–137.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Ramírez, J., Ortega, F., & Lozano, C. (2020). Análisis morfométrico de parches forestales y calidad ecológica. *Revista Bosques y Paisaje*, 12(3), 211–230.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., & Schell, J. A. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report*, 371–411.
- Silva Varela, J. (2022). Métricas de fragmentación del paisaje aplicadas a cuencas hidrográficas [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia].
- Soria, J., Ruiz, M., & Morales, S. (2022). Monitoring subaquatic vegetation using Sentinel-2 imagery in Gallocanta Lake (Aragón, Spain). *Earth*, 3(1), 363. <https://doi.org/10.3390/earth3010022>
- Tamayo, L. (2024). Tamaño de parches forestales y conectividad ecológica: un estudio en el Quindío. *Revista Ambiental Andina*.
- Tamiru, A., & Rientjes, T. (2017). Modeling the impact of land use dynamics on ecosystem services using LIDAR and remote sensing data. *Environmental Modeling & Software*, 95, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.010>
- Valencia-Gaspar, S., Mejía-Leyva, F., Valles-Aragón, M. C., Martínez-Salvador, M., Hernández-Quiroz, N. S., Nevarez-Rodríguez, M. C., López-Serrano, P. M., & Vázquez-Quintero, G. (2024). Evaluación de la dinámica de los cambios en el uso y la cobertura del suelo entre

1974 y 2016: un caso de estudio de la cuenca de Bustillos mediante teledetección. *Tierra*, 13(8), 1320. <https://doi.org/10.3390/land13081320>.

Vargas Portela, D. (2024). Análisis multitemporal de coberturas en zonas de minería aurífera aluvial y su impacto en el recurso forestal entre los años 2014 al 2023, en municipios del Bajo Cauca Antioqueño. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/7215>

Vargas, H., Muñoz, L., & Rivera, J. (2020). Deforestación y pérdida de biodiversidad en zonas rurales de la región andina colombiana. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(1), 78–91.

Vitar-Mendoza, J., Sandoval-Parra, K., & Ortiz-Moreno, M. (2022). Land-cover change in the department of Vichada, Colombia, from 1985 to 2017. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 149–174. <https://doi.org/10.22490/21456453.4630>

Wendson de Oliveira Silva, L. G. M., Ruiz-Armenteros, A. M., et al. (2022). Analysis of environmental and atmospheric influences in the use of SAR and optical imagery from Sentinel-1, Landsat-8, and Sentinel-2 in the operational monitoring of reservoir water level. *Remote Sensing*, 14(9), 2218. <https://doi.org/10.3390/rs14092218>

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2018). Improvement of land cover classification in tropical forests using Landsat and radar data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.032>