



Análisis de la cobertura vegetal afectada por asentamientos en zonas de restricción severa en el sector El Guamo, municipio de Manizales, mediante técnicas de teledetección

Valentina Aguirre Patiño

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

Asesor: Eduard Alberto Ríos Guarín, Magíster (MSc) en Tecnologías de la Información Geográfica

Asesores de recursos académicos: Seleccione su asesor bibliográfico (A-Z), Claudia Marcela Cerón Rubio (asesora Centro de Escritura) y Elvia Lucía Sánchez García (asesora de integridad académica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Caldas, Colombia

2026

Cita	(Aguirre Patiño, 2026)
Referencia	Aguirre Patiño, V. (2026). <i>Análisis de la cobertura vegetal afectada por asentamientos en zonas de restricción severa en el sector El Guamo, municipio de Manizales, mediante técnicas de teledetección</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXII

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Perplexity, 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: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: 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.....	10
2.	Abstract.....	11
1.	Introducción.....	12
2.	Planteamiento del problema.....	13
2.1.	Antecedentes.....	15
3.	Justificación.....	19
4.	Objetivos.....	21
4.1.	Objetivo general.....	21
4.2.	Objetivos específicos.....	21
5.	Referente contextual.....	22
6.	Referente normativo y legal.....	24
7.	Referente teórico.....	26
7.1.	Cobertura vegetal.....	26
7.2.	Pérdida de vegetación nativa.....	26
7.3.	Asentamientos informales.....	27
7.4.	Degradación ambiental.....	28
7.5.	Uso y ocupación del suelo.....	28
7.6.	Ecosistemas estratégicos.....	29
7.7.	Servicios ecosistémicos.....	29
7.8.	Cambio de cobertura vegetal.....	30
7.9.	Expansión Urbana.....	30
7.10.	Ordenamiento territorial.....	31
7.11.	Acumulación de flujo.....	31
7.12.	Dirección de flujo.....	31

7.13.	Microcuencas hidrográficas	32
7.14.	Infraestructura ecológica	32
7.15.	Reserva forestal	33
7.16.	Conservación y restauración ecológica	33
7.17.	Amenaza Alta, media y baja.....	34
7.18.	Sistemas de Información Geográfica	35
7.19.	Análisis espacial	35
7.20.	Modelos Digitales de Elevación.....	35
7.21.	Curvas de nivel.....	36
7.22.	Teledetección.....	36
7.23.	Sensores remotos.....	37
7.24.	Satélite Sentinel.....	37
7.25.	Combinación de bandas	38
7.26.	Firmas espectrales	38
7.27.	Índice NDVI.....	39
7.28.	Clasificación supervisada	39
7.29.	Clasificación de Máxima Verosimilitud	40
7.30.	Matriz de confusión e índice Kappa.....	40
8.	Metodología	42
8.1.	Analizar la variación de la cobertura vegetal en el área de estudio mediante índices espectrales y técnica de clasificación supervisada	42
8.1.1.	Procedimiento.....	42
8.1.1.1.	Delimitación zona de estudio	43
8.1.1.2.	Obtención de imágenes satelitales.....	44
8.1.1.3.	Procesamiento de las imágenes satélite.....	45
8.1.1.4.	Recorte de los índices NDVI a partir del área de estudio	47

8.1.1.5.	Clasificación supervisada.....	48
8.1.1.6.	Validación de la clasificación mediante matriz de confusión e índice Kappa	52
8.2.	Determinar los patrones de dirección y acumulación de flujo superficial en el área de estudio con el fin de analizar su relación con la dinámica de escorrentía.....	53
8.2.1.	Modelo de elevación (DEM) y curvas de nivel.....	53
8.2.2.	Dirección de flujo (Ms. Graciela Pusiner, 2005) y acumulación.	58
8.2.3.	Acumulación de flujo	60
8.3.	Análisis correlacional de los resultados de la variación de la vegetación respecto a los cambios antrópicos por el incremento de asentamientos humanos irregulares en la zona de estudio	61
9.	Resultados	64
9.1.	Analizar la variación de la cobertura vegetal en el área de estudio mediante índices espectrales y técnica de clasificación supervisada	64
9.1.1.	Clasificación de coberturas de vegetación de las imágenes de satélite (2020 – 2024)	64
9.1.1.1.	Cuantificación de las coberturas	66
9.1.1.2.	Comparación entre coberturas (2020 vs 2024)	67
9.1.2.	Validación de la clasificación por medio de la matriz de confusión	70
9.2.	Determinar los patrones de dirección y acumulación de flujo superficial en el área de estudio con el fin de analizar su relación con la dinámica de escorrentía.....	70
9.2.1.	Dirección de flujo de la zona de estudio	71
9.3.	Análisis correlacional de los resultados de la variación de la vegetación respecto a los cambios antrópicos por el incremento de asentamientos humanos irregulares en la zona de estudio	74
10.	Discusión.....	83
11.	Conclusiones	86
12.	Recomendaciones.....	87

13.	Referencias	88
-----	-------------------	----

Lista de figuras

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio.....	43
Figura 2. Imagen Sentinel 2A año 2020.....	45
Figura 3. Imagen Sentinel 2A año 2024.....	45
Figura 4. Colorimetría para NDVI.	47
Figura 5.	47
Figura 6. Zona de estudio.....	48
Figura 7. Polígonos definidos como zonas de entrenamiento.....	49
Figura 8. Imagen clasificada.	50
Figura 9. Tabla de atributos con sus clases.	51
Figura 10. Imagen Ráster vectorizada.....	51
Figura 11. Tabla de atributos con áreas.....	52
Figura 12. Ruta de puntos en Google Earth.	54
Figura 13. Grilla de puntos homogénea.	55
Figura 14.	55
Figura 15. Tabla de atributos con elevaciones.	56
Figura 16. Modelo de elevación digital de la zona de estudio.	57
Figura 17. Dirección de flujo para la zona de estudio.....	59
Figura 18. Drenaje obtenido por la herramienta Flow Accumulation	60
Figura 19. Composición de bandas (12 – 11 – 8) para imágenes Sentinel de los años 2020 y 2024	62
Figura 20. Zonas urbanizadas para los años 2020 y 2024.....	63
Figura 21. Mapa índice NDVI para el año 2020.....	65
Figura 22. Mapa índice NDVI para el año 2024.....	66
Figura 23. Matriz de confusión para los años 2020 y 2024.	70
Figura 24. Mapa de dirección de flujo de la zona de estudio.....	71
Figura 25. Zonas de dispersión de flujo	72
Figura 26. Mapa de drenajes naturales en la zona de estudio	73
Figura 27. Mapa multitemporal de asentamientos informales para los años 2020 y 2024	74
Figura 28. Asentamientos irregulares en zona de amenaza alta para el 2020	75
Figura 29. Asentamientos irregulares en zona de amenaza alta para el año 2024	76

Figura 30. Asentamientos informales ubicados en fajas forestales protectoras para el 2020.	77
Figura 31. Asentamientos informales ubicados en fajas forestales protectoras en el 2024.	77
Figura 32. Mapa multitemporal de asentamientos informales ubicados sobre la red de drenaje....	78
Figura 33. Mapa de superposiciones.	79

Lista de tablas.

Tabla 1. Codificación de la dirección de flujo.....	59
Tabla 2. Áreas de cada cobertura para el año 2020.....	67
Tabla 3. Áreas de cada cobertura para el año 2024	67
Tabla 4. Tendencia de aumento o disminución por cobertura.	68

1. Resumen.

La presente investigación analiza la dinámica espacial y temporal de la cobertura vegetal y su relación con la expansión de asentamientos humanos informales en una zona de estudio del municipio de Manizales, Colombia, durante el periodo 2020–2024. A partir del uso de imágenes satelitales y técnicas de teledetección, se calcularon índices de vegetación (NDVI) y se realizó una clasificación supervisada para identificar cambios en las coberturas del suelo y la expansión de áreas construidas. Adicionalmente, se integraron análisis hidrológicos derivados de modelos de elevación digital, cartografía de amenazas por deslizamiento, fajas forestales protectoras y lineamientos normativos del Plan de Ordenamiento Territorial (POT).

Los resultados evidencian una disminución progresiva de la cobertura vegetal densa y un aumento de áreas con baja o nula vegetación, asociadas principalmente a procesos de ocupación informal. Entre 2020 y 2024, el área de asentamientos informales aumentó significativamente, incrementando su presencia en zonas clasificadas como de amenaza alta por deslizamiento y en sectores cercanos a la red de drenaje superficial. Esta superposición espacial revela un escenario de alta fragilidad ambiental y riesgo socioambiental, agravado por la eliminación de la cobertura vegetal y la alteración de los procesos hidrológicos naturales.

El estudio demuestra la utilidad del análisis espacial integrado y multitemporal como herramienta clave para la gestión del riesgo, el ordenamiento territorial y la planificación ambiental, resaltando la necesidad de fortalecer estrategias de control urbano, restauración ecológica y prevención de la ocupación de áreas ambientalmente sensibles.

2. Abstract.

This research analyzes the spatial and temporal dynamics of vegetation cover and its relationship with the expansion of informal human settlements in a study area of the municipality of Manizales, Colombia, during the period 2020–2024. Satellite imagery and remote sensing techniques were used to calculate vegetation indices (NDVI) and perform supervised classification in order to identify land cover changes and the growth of built-up areas. In addition, hydrological analyses derived from digital elevation models, landslide hazard maps, protective forest buffer zones, and regulatory guidelines from the Municipal Land Use Plan (POT) were integrated.

The results reveal a progressive decrease in dense vegetation cover and an increase in areas with low or no vegetation, mainly associated with informal settlement processes. Between 2020 and 2024, the area occupied by informal settlements increased considerably, with a growing proportion located in zones classified as high landslide hazard and near surface drainage networks. This spatial overlap reflects a scenario of high environmental fragility and socio-environmental risk, intensified by vegetation removal and the disruption of natural hydrological processes.

The study highlights the value of integrated and multitemporal spatial analysis as a key tool for risk management, land-use planning, and environmental management, emphasizing the need to strengthen urban control measures, ecological restoration strategies, and policies aimed at preventing occupation of environmentally sensitive areas.

1. Introducción.

El crecimiento urbano acelerado y no planificado constituye uno de los principales factores de transformación del territorio en ciudades intermedias de países en desarrollo, especialmente en contextos de alta fragilidad ambiental. En Colombia, este fenómeno se manifiesta con particular intensidad en ciudades andinas como Manizales, donde las condiciones geomorfológicas, climáticas y sociales convergen para generar escenarios complejos de ocupación del suelo, pérdida de cobertura vegetal y aumento del riesgo ambiental.

La expansión de asentamientos humanos informales sobre áreas de ladera, zonas de protección ambiental y corredores hídricos ha generado una presión creciente sobre los ecosistemas naturales, afectando la estabilidad del terreno, la regulación hídrica y la provisión de servicios ecosistémicos. La eliminación progresiva de la cobertura vegetal, asociada a estos procesos de ocupación, incrementa la escorrentía superficial, favorece la erosión del suelo y eleva la susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones, particularmente en territorios con alta pendiente y materiales geológicamente inestables, como los presentes en el municipio de Manizales.

En este contexto, el uso de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha consolidado como una estrategia fundamental para el análisis espacial y temporal de los cambios en la cobertura del suelo y la identificación de dinámicas de expansión urbana informal. La integración de índices de vegetación, modelos de elevación digital, análisis hidrológicos y cartografía oficial de amenazas permite comprender de manera integral la relación entre los procesos antrópicos y las condiciones ambientales del territorio.

El presente estudio tiene como propósito analizar la dinámica espacial y temporal de la cobertura vegetal y su relación con la expansión de asentamientos humanos informales en una zona de estudio del municipio de Manizales durante el periodo 2020–2024. A través de un enfoque multitemporal e integrado, se busca aportar insumos técnicos que contribuyan a la gestión del riesgo, al ordenamiento territorial y a la formulación de estrategias orientadas a la conservación ambiental y la planificación urbana sostenible.

2. Planteamiento del problema.

Los asentamientos humanos en zonas de restricción severa, como fajas forestales protectoras y áreas de amenaza alta y media, representan una problemática ambiental crítica impulsada por la expansión urbana descontrolada, que transforma territorios naturales en espacios habitados sin planificación adecuada. A nivel global, esta ocupación de áreas restringidas se consolida como uno de los motores principales de la pérdida de cobertura vegetal, particularmente en periferias urbanas donde la presión demográfica convierte ecosistemas sensibles en zonas residenciales, degradando la vegetación original y fragmentando hábitats esenciales, tal como lo evidencia Pezo Díaz (2023). Estudios internacionales destacan que esta dinámica, vinculada a procesos antrópicos no regulados, genera millones de hectáreas de pérdida forestal anual, alterando ciclos hidrológicos, regulación térmica y estabilidad geomorfológica, con impactos severos en países en desarrollo donde la planificación territorial es limitada (Sierra, 2024).

En Colombia, la normativa ambiental clasifica las fajas forestales protectoras como áreas inalienables de protección hídrica y edáfica, con restricciones severas que prohíben asentamientos para preservar su cobertura boscosa mínima, de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1449 de 1977 y el Decreto 1076 de 2015. De igual forma, las zonas de amenaza alta y media imponen limitaciones estrictas debido a su susceptibilidad a movimientos en masa, inundaciones y erosión, priorizando la vida humana sobre la ocupación, conforme a lo establecido en la Ley 1523 de 2012 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo. Esta problemática contribuye al 3 % de la pérdida anual de cobertura arbórea en el país, estimada entre 200.000 y 300.000 hectáreas, especialmente en departamentos como Caquetá, Antioquia y Meta, donde la urbanización en zonas restringidas acelera la degradación de ecosistemas estratégicos (Becerra, 2024). Asimismo, se ha reportado una reducción del 17 % de la cobertura vegetal en ecosistemas amazónicos y periurbanos, producto de estas presiones antrópicas (López Plazas, 2024).

En el contexto regional de Caldas y específicamente en Manizales, las fajas forestales protectoras y zonas de amenaza alta y media enfrentan presiones similares, con una reducción de espacios verdes del 59,6 % al 53,7 % entre 1986 y 2023, asociada a la ocupación de laderas pronunciadas y corredores ecológicos (Aristizábal Tamayo, 2024). Áreas como la Reserva Forestal

Río Blanco, clasificada como ecosistema estratégico, sufren intervenciones que incrementan la escorrentía superficial, reducen la infiltración y comprometen servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y la estabilidad de suelos, fenómeno documentado por Alma (2025).

La zona de estudio en Manizales ejemplifica esta dinámica, donde asentamientos en fajas protectoras y zonas de amenaza alta y media provocan tala indiscriminada, adecuación de terrenos y alteraciones en los patrones de drenaje, generando inestabilidad en laderas y deterioro de microcuencas que drenan hacia el sur y suroccidente del municipio, tal como lo describe Arenas Villegas (2024). Estas transformaciones no reguladas fragmentan el paisaje, afectan la biodiversidad y elevan la vulnerabilidad ambiental, pese a los controles institucionales locales alineados con el Plan de Gestión del Riesgo.

La ausencia de análisis espaciales y temporales detallados en estas zonas restringidas justifica el desarrollo de un estudio que integre procesamiento multitemporal de imágenes satelitales, clasificación supervisada, índices de vegetación (NDVI) y modelos digitales de elevación. Esta aproximación permitirá cuantificar la pérdida de cobertura vegetal ligada a la ocupación en fajas forestales protectoras y áreas de amenaza alta y media, generando insumos técnicos para la gestión del suelo, la planificación territorial sostenible y la protección de ecosistemas estratégicos bajo presión antrópica.

En este contexto, surge la necesidad de comprender la relación entre la pérdida de cobertura vegetal y la ocupación de áreas ambientalmente restringidas en el territorio analizado.

Por lo tanto, la pregunta que orienta esta investigación es: ¿Qué relación existe entre la pérdida de cobertura vegetal y la ocupación de zonas de restricción severa en el área de estudio de Manizales durante el periodo 2020–2024?

2.1. Antecedentes.

A escala global, la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como herramientas fundamentales para el análisis de la pérdida de cobertura vegetal y los procesos de deforestación, especialmente en regiones de alta biodiversidad y presión antrópica. En este contexto, informes recientes del Proyecto de Monitoreo de la Amazonía Andina evidencian la magnitud del fenómeno al documentar la pérdida de 476.030 hectáreas de bosque primario en la Amazonía boliviana durante 2024, la cifra más alta registrada hasta la fecha (Finner, 2025). Mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución, este estudio asocia la deforestación con invasiones, actividades ilegales y expansión de la frontera agroextractiva, resaltando la necesidad de sistemas de alerta temprana y vigilancia continua en regiones remotas. De manera complementaria, Loza del Carpio y Taype (2020) identificaron en la meseta andina de Costa Rica una reducción del 16,27 % de asociaciones vegetales naturales, equivalente a aproximadamente 2.000 hectáreas perdidas en 16 años, a través de análisis multitemporales con imágenes satelitales procesadas en SIG, evidenciando el impacto sostenido de actividades agrícolas en ecosistemas de montaña.

En el ámbito amazónico y andino sudamericano, diversos estudios han demostrado la eficacia del análisis multitemporal para cuantificar la pérdida de bosques y proyectar escenarios futuros. En Perú, Condori et al. (2022) desarrollaron un análisis multitemporal en el distrito de Pangoa, cuantificando la deforestación entre 2000 y 2020 mediante imágenes Landsat y el uso de software como ENVI y ArcGIS, concluyendo que la expansión agrícola y la infraestructura vial constituyen los principales motores de cambio. En esta misma línea, Zumaeta Lozano (2019) analizó la microcuenca Yuyac, en el Amazonas peruano, identificando una pérdida de 592,40 hectáreas de cobertura boscosa entre 1998 y 2018, y proyectando la pérdida adicional de 129,40 hectáreas hacia 2030 mediante simulación geoespacial en SIG, lo que resalta la importancia de enfoques predictivos para la formulación de políticas preventivas.

Asimismo, en la zona de amortiguamiento de la Reserva Nacional Tambopata, análisis multitemporales con imágenes Landsat 7, Landsat 8 y Sentinel-2A permitieron identificar tasas anuales de deforestación, alcanzando picos de 1.734 hectáreas entre 2019 y 2020, principalmente

por actividades antrópicas. Estas investigaciones se ven reforzadas por sistemas operativos de monitoreo como GeoBosques del Ministerio del Ambiente del Perú, que combinan imágenes Landsat y Sentinel-2 para generar alertas tempranas de deforestación con resoluciones espaciales entre 10 y 30 metros, facilitando la gestión ambiental en zonas de difícil acceso y alta nubosidad.

Desde una perspectiva metodológica, Condori et al. (2022) demostraron que la integración de herramientas SIG y técnicas avanzadas de teledetección, como la clasificación supervisada y el Análisis de Componentes Principales (ACP) en plataformas como ArcGIS y ERDAS, mejora significativamente la identificación de áreas degradadas y la precisión en la interpretación de cambios en el paisaje. Estos avances se complementan con investigaciones más recientes, como la de Jiménez Gómez y Moreno Rojas (2025), quienes integran imágenes satelitales con modelos logísticos y algoritmos de detección automática para proyectar escenarios futuros de deforestación, evidenciando el potencial de la modelización predictiva en contextos de alta presión sobre los recursos naturales. De igual manera, Hurtado Abril (2019) propone la generación de un índice espectro-temporal basado en series Landsat para detectar deforestación en la Amazonía colombo-peruana, aportando una innovación metodológica para estudios a gran escala y el diseño de políticas de control ambiental.

En el contexto colombiano, la teledetección ha sido ampliamente utilizada para analizar la relación entre deforestación y dinámicas socioeconómicas complejas. Murillo Malaver (2022) realizó un análisis comparativo del cambio en el uso del suelo en territorios afectados por el conflicto armado, identificando la conversión de áreas boscosas hacia otros usos mediante imágenes satelitales y SIG, y vinculando la pérdida de cobertura vegetal con procesos sociales, políticos y económicos. A su vez, la Food and Agriculture Organization (2024) introduce una solución innovadora para el mapeo y la predicción del riesgo de deforestación, integrando datos satelitales Sentinel y Landsat en plataformas como Google Earth Engine, junto con variables socioeconómicas, para anticipar focos futuros y apoyar el cumplimiento de la normativa ambiental internacional.

En la Amazonía colombiana, informes recientes reportan la pérdida de 81.396 hectáreas de bosque primario en 2024, lo que representa un incremento del 82,5 % respecto a 2023, asociado a dinámicas postacuerdo de paz, invasiones y ocupación ilegal del territorio (Finner, 2025). Estos hallazgos evidencian la urgencia de fortalecer los mecanismos institucionales de monitoreo y control

ambiental. De manera complementaria, en el Bajo Cauca antioqueño, un análisis multitemporal entre 1986 y 2016 con imágenes Landsat reveló un incremento del 7,9 % de suelos desnudos (1.996 hectáreas) debido principalmente a la minería ilegal, utilizando clasificación supervisada de máxima verosimilitud y correcciones radiométricas en software especializado, lo que permitió caracterizar con precisión la dinámica espacio-temporal de la degradación ambiental.

A escala subnacional, estudios en departamentos como Putumayo, Cauca y Caldas refuerzan la aplicabilidad de los SIG para la gestión territorial. En Puerto Asís (Putumayo), investigaciones recientes cuantificaron la pérdida de cobertura vegetal asociada a humedales mediante capas vectoriales y reclasificaciones en SIG, mientras que en el municipio de Bolívar (Cauca) se emplearon imágenes Landsat procesadas en QGIS para priorizar zonas de reforestación a partir de criterios como pendiente, disponibilidad hídrica y calidad del suelo. En el departamento de Caldas, un modelo de regresión basado en Machine Learning integró datos sociodemográficos del DANE y datos satelitales para predecir la deforestación, identificando relaciones significativas con variables como edad, nivel educativo y ocupación (Rivera Basto & Pajoy Peña, 2023), lo que aporta una perspectiva integral para la planificación territorial.

Finalmente, a escala local, la ciudad de Manizales y su entorno inmediato constituyen un escenario de creciente interés investigativo frente a la pérdida de cobertura vegetal asociada a la expansión urbana informal. Repositorios académicos como RIDUM documentan, mediante sensores como RapidEye y análisis multitemporales, pérdidas progresivas de espacios verdes y ocupaciones ilegales en laderas y áreas de protección ambiental. En este contexto, Cabrera Hurtado et al. (2025) evidencian la degradación de la Reserva Forestal Río Blanco, destacando la presión urbana sobre ecosistemas estratégicos. De igual manera, investigaciones desarrolladas en la Universidad Católica de Manizales (2021) aplican técnicas de procesamiento digital de imágenes para analizar la expansión urbana ilegal y fortalecer los procesos de ordenamiento territorial.

A estos aportes se suman análisis recientes como el de Duque Escobar y Torres Arango (2025), quienes examinan invasiones y pasivos ambientales en veredas de Manizales como San Luis y Potrerillo, documentando la destrucción de rondas hídricas y relictos boscosos mediante cartografía de estructura verde y SIG. Asimismo, Martínez y Ruiz Orjuela (2016) analizaron la pérdida de cobertura vegetal en el Parque Nacional Natural Alto Frío Ingleses y Viento, integrando

variables geomorfológicas, hídricas y urbanas en SIG para identificar áreas degradadas y priorizar acciones de conservación. Complementariamente, alertas recientes de Global Forest Watch registran eventos de deforestación en Manizales y el departamento de Caldas entre diciembre de 2025 y enero de 2026, lo que confirma la persistencia y actualidad del fenómeno.

En conjunto, estos antecedentes evidencian que la pérdida de cobertura vegetal es un proceso multiescalar y multifactorial, donde la teledetección y los SIG constituyen herramientas clave para su análisis, monitoreo y proyección. Asimismo, justifican la pertinencia de desarrollar estudios locales con enfoque multitemporal en Manizales, que permitan comprender las dinámicas específicas de ocupación en zonas de restricción severa y degradación ambiental, aportando insumos técnicos para la gestión territorial.

3. Justificación.

La pérdida de cobertura vegetal en zonas urbanas y periurbanas constituye un fenómeno que compromete de manera directa la biodiversidad, la regulación hídrica, el control natural de la erosión y la estabilidad geomorfológica, elementos esenciales para la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de la población. Este proceso ha sido ampliamente documentado a escala global como una consecuencia de la expansión urbana no planificada, especialmente en territorios ambientalmente sensibles, donde la ocupación del suelo genera fragmentación de hábitats y alteraciones en los ciclos hidrológicos y térmicos (Pezo Díaz, 2023; Sierra, 2024). En ciudades intermedias de países en desarrollo, estas dinámicas se intensifican debido a limitaciones en la planificación territorial y a presiones socioeconómicas que impulsan la ocupación de áreas con restricciones ambientales.

En la ciudad de Manizales, localizada en la media montaña del trópico andino, estas afectaciones adquieren mayor relevancia debido a sus condiciones fisiográficas complejas, caracterizadas por fuertes pendientes, suelos volcánicos poco consolidados y regímenes de alta pluviometría, factores que incrementan la vulnerabilidad del territorio frente a procesos de degradación ambiental y movimientos en masa (Álvarez del Castillo, 2013). A nivel local, estudios recientes evidencian una reducción sostenida de los espacios verdes urbanos, asociada al crecimiento urbano y la ocupación de laderas y corredores ecológicos, lo que incrementa los riesgos ambientales y la presión sobre ecosistemas estratégicos (Aristizábal Tamayo, 2024).

Este fenómeno se manifiesta de manera crítica en el sector del Alto del Guamo y la microcuenca de la quebrada El Guamo, zona de estudio del presente trabajo, donde la presencia de asentamientos en zonas de restricción severa ha generado una transformación acelerada del paisaje y una pérdida progresiva de la vegetación nativa. La ocupación de laderas, rondas hídricas y áreas clasificadas como de amenaza alta y media ha desencadenado impactos ambientales como la intensificación de la erosión superficial, el socavamiento de orillas, la alteración de los patrones de escorrentía y el aumento de la inestabilidad del terreno. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales, este sector presenta condiciones de amenaza alta por movimientos en masa e inundación, así como procesos de reptación, erosión laminar y deslizamientos traslacionales que

han afectado viviendas localizadas a lo largo de la quebrada El Guamo, especialmente en temporadas de lluvias intensas (Alcaldía de Manizales, 2015).

El interés por abordar esta problemática surge de la necesidad de contar con información precisa, actualizada y espacialmente detallada sobre la dinámica de la cobertura vegetal en esta zona específica del municipio, donde la ocupación en áreas ambientalmente restringidas se superpone con territorios de alta fragilidad ecológica. Comprender la relación entre la pérdida de vegetación y la presencia de asentamientos en zonas de restricción severa resulta fundamental para explicar el aumento de los riesgos socioambientales y apoyar la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial, gestión del riesgo y protección de ecosistemas estratégicos. En este contexto, el uso de imágenes satelitales y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante análisis multitemporales constituye una estrategia metodológicamente pertinente, ya que permite el monitoreo objetivo, continuo y cuantificable de los cambios en la cobertura vegetal y su relación con procesos antrópicos (Condori et al., 2022; Murillo Malaver, 2022).

El aporte técnico y científico de este trabajo radica en la generación de evidencia basada en datos satelitales ópticos del sensor Sentinel-2, así como en el uso de técnicas de teledetección y análisis espacial para evaluar la pérdida de cobertura vegetal asociada a la ocupación en zonas de restricción severa dentro de una microcuenca urbana de alta vulnerabilidad. Este enfoque contribuye a fortalecer el conocimiento académico sobre las interacciones entre ocupación del suelo, degradación ambiental y riesgo, al tiempo que aporta insumos técnicos para la formulación de políticas públicas, la priorización de acciones de conservación y la planificación de estrategias de restauración ecológica en Manizales. Asimismo, el estudio adquiere relevancia aplicada al constituirse en un modelo replicable para otras ciudades andinas que enfrentan problemáticas similares de crecimiento urbano sobre territorios ambientalmente sensibles (Álvarez del Castillo, 2013; Rivera Basto & Pajoy Peña, 2023).

4. Objetivos

4.1. Objetivo general.

Analizar la dinámica espacial y temporal de la cobertura vegetal y su relación con la expansión de asentamientos en zonas de restricción severa en el sector Alto el Guamo del municipio de Manizales para los años 2020 y 2024, mediante técnicas de teledetección, con el fin de evaluar las transformaciones antrópicas y sus implicaciones sobre las condiciones ambientales de la zona de estudio.

4.2. Objetivos específicos.

- Analizar la variación de la cobertura vegetal en el área de estudio mediante índice NDVI y técnica de clasificación supervisada.
- Determinar los patrones de dirección y acumulación de flujo superficial en el área de estudio con el fin de analizar su relación con la dinámica de escorrentía.
- Cuantificar correlacionalmente los resultados de la variación de la vegetación respecto a los cambios antrópicos por el incremento de asentamientos en zonas de restricción severa.

5. Referente contextual

En el contexto colombiano, la pérdida de cobertura vegetal se asocia a múltiples procesos antrópicos; sin embargo, en los entornos urbanos y periurbanos adquiere particular relevancia la ocupación de suelos ambientalmente restringidos. Estas áreas, definidas por la normativa como zonas de protección hídrica, fajas forestales protectoras o territorios con amenaza alta o media, presentan limitaciones explícitas para el asentamiento humano debido a su importancia ecológica y a los riesgos asociados a su ocupación. No obstante, las presiones urbanas y las dificultades de acceso a vivienda formal han favorecido la ocupación de estos espacios, generando transformaciones significativas en la cobertura vegetal y en la dinámica ambiental de los territorios.

De acuerdo con el Plan Integral de Contención a la Deforestación 2023–2026, Colombia ha perdido aproximadamente 3,3 millones de hectáreas de bosque entre 2001 y 2024, lo que evidencia la magnitud del deterioro de la cobertura vegetal a nivel nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Aunque gran parte de esta pérdida se asocia a actividades agropecuarias, extractivas y a la expansión de la frontera productiva, en los entornos urbanos la transformación del suelo responde a procesos de ocupación de áreas ambientalmente sensibles, donde la cobertura vegetal cumple funciones estratégicas para la estabilidad del territorio.

En zonas periféricas de ciudades latinoamericanas, diversos estudios han evidenciado que la ocupación no planificada del suelo genera reducciones significativas de la vegetación natural, especialmente cuando se desarrolla sobre áreas con valor ecológico o restricciones normativas. En estos contextos, la autoconstrucción, la remoción de suelos y la tala selectiva producen una transformación acelerada del paisaje, reduciendo la cobertura vegetal y alterando las condiciones ambientales locales (Therán-Nieto, 2022).

Este tipo de ocupación suele estar vinculado a factores estructurales como las desigualdades socioeconómicas, la migración rural-urbana y la limitada disponibilidad de suelo urbanizable, lo que conduce a la ocupación de terrenos con restricciones ambientales o condiciones de amenaza. En estos espacios, la pérdida de vegetación no solo implica una

transformación del paisaje, sino también la alteración de funciones ecológicas relacionadas con la regulación hídrica, la estabilidad de suelos y la provisión de servicios ecosistémicos, aspectos ampliamente reconocidos en la literatura ambiental (Del Castillo et al., s. f.).

En consecuencia, los asentamientos en zonas de restricción severa constituyen una problemática territorial compleja, donde confluyen factores sociales, normativos y ambientales. Su análisis requiere enfoques integrales que permitan comprender las transformaciones en la cobertura vegetal y su relación con los procesos de ocupación del suelo, con el fin de generar insumos técnicos para la planificación territorial, la gestión del riesgo y la protección de ecosistemas estratégicos.

6. Referente normativo y legal

El marco normativo que orienta el presente estudio se fundamenta en la legislación ambiental, territorial y urbanística vigente en Colombia, la cual establece los lineamientos para la protección de la cobertura vegetal, la regulación del uso del suelo y la gestión de los asentamientos humanos.

- **Constitución Política de Colombia (1991)**

Artículos 79 y 80: reconocen el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y el deber del Estado de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración.

- **Ley 99 de 1993**

Crea el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Establece los principios de desarrollo sostenible, prevención y protección de los recursos naturales renovables, entre ellos la vegetación nativa y los ecosistemas forestales.

- **Ley 388 de 1997 – Ley de Desarrollo Territorial**

Regula el ordenamiento del territorio municipal y la formulación de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT).

Define los instrumentos para el control del uso del suelo y la prevención de la ocupación de áreas no aptas para urbanización, como las zonas de protección ambiental y rondas hídricas.

- **Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables**

En su Título II establece la protección, conservación y manejo de la vegetación natural, incluyendo la prohibición de tala en zonas de protección y la necesidad de permisos para la intervención de bosques.

- **Ley 1454 de 2011 – Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT)**

Promueve la planificación y gestión sostenible del territorio, considerando la conservación ambiental como principio básico de ordenamiento y articulación entre niveles territoriales.

- **Ley 2ª de 1959 – Reserva Forestal Nacional**

Declara las reservas forestales nacionales, entre ellas la Reserva Forestal Central, que abarca parte del municipio de Manizales.

Prohíbe el uso del suelo incompatible con la conservación de la cobertura vegetal y los ecosistemas forestales.

- **Decreto 1076 de 2015 – Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible**

Compila las normas relacionadas con la conservación de ecosistemas, la gestión del recurso hídrico, las licencias ambientales y la compensación por pérdida de cobertura vegetal.

- **Ley 1523 de 2012 – Gestión del Riesgo de Desastres**

Incorpora la gestión del riesgo en los procesos de planificación territorial, especialmente en zonas con asentamientos informales localizados en áreas de amenaza o vulnerabilidad ambiental.

- **Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Manizales, Acuerdo 0957 de 2017**

Define las zonas de reserva, protección ambiental y áreas de conservación, así como las políticas de manejo de microcuencas y restricciones al uso del suelo en sectores con riesgo o función ecológica.

- **Plan Integral de Contención de la Deforestación (2023)**

Establece estrategias nacionales para reducir la deforestación, promover la restauración ecológica y fortalecer la gobernanza forestal, con énfasis en los ecosistemas estratégicos del país.

7. Referente teórico

7.1. Cobertura vegetal.

La cobertura vegetal la define Suárez (2021) como:

La cobertura vegetal se refiere a la proporción del suelo que está recubierto por plantas, incluyendo árboles, arbustos, hierba y demás vegetación natural o cultivada. Este indicador es fundamental para el equilibrio de los ecosistemas, la protección contra la erosión y el mantenimiento de la biodiversidad (p. 15).

La cobertura vegetal representa un elemento esencial para la estabilidad ambiental de un territorio, ya que actúa como un regulador natural del suelo, del agua y del clima local. En el contexto del área de estudio, su análisis permite comprender los efectos de la expansión urbana informal sobre los ecosistemas naturales, evidenciando cómo la pérdida de vegetación genera alteraciones directas en la capacidad del entorno para autorregularse. Reflexionar sobre la cobertura vegetal implica reconocerla no solo como un indicador físico, sino como un componente clave del equilibrio ecológico y del bienestar humano, cuya degradación conlleva impactos acumulativos sobre la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida de las comunidades.

7.2. Pérdida de vegetación nativa.

Como lo afirma Santillana (2006):

La pérdida de vegetación nativa es uno de los principales problemas ambientales en Colombia y en el mundo, causada por la deforestación, el cambio de uso del suelo (agrícola, ganadero, urbano), la tala ilegal, los incendios forestales y especies invasoras. Esta reducción afecta el equilibrio ecológico, la biodiversidad y la calidad ambiental de las regiones afectadas (p. 155).

La pérdida de vegetación nativa constituye una señal crítica del deterioro ambiental y de la presión antrópica sobre los ecosistemas. Este fenómeno no solo implica la desaparición de especies vegetales autóctonas, sino también la fragmentación de hábitats y la alteración de procesos ecológicos esenciales, como la regulación hídrica y la captura de carbono. En el contexto del estudio, esta pérdida refleja el impacto directo de los asentamientos informales y de las dinámicas urbanas no planificadas sobre los ecosistemas locales. Reconocer y analizar esta problemática permite evidenciar la urgencia de implementar estrategias de ordenamiento territorial y restauración ecológica que mitiguen los efectos negativos y promuevan una relación más equilibrada entre el desarrollo humano y el entorno natural.

7.3. Asentamientos informales.

Para Mur Días y Vargas (2021), los asentamientos informales se describen como:

Los asentamientos informales son áreas residenciales donde los habitantes no tienen tenencia legal del terreno ni acceso pleno a servicios básicos, y se caracterizan por su desarrollo espontáneo, desordenado y fuera de la regulación estatal. Estas comunidades suelen ubicarse en periferias urbanas o zonas ambientalmente vulnerables, como laderas inestables, áreas inundables o reservas naturales, y son típicas en contextos donde el acceso formal a la vivienda es limitado (p. 26).

Los asentamientos informales representan una expresión visible de las desigualdades sociales y del crecimiento urbano no planificado. Su expansión refleja la falta de políticas efectivas de vivienda y planificación territorial, lo que conduce a la ocupación de espacios ambientalmente frágiles, como áreas protegidas o de valor ecológico. En el contexto ambiental, estos asentamientos no solo transforman el paisaje natural, sino que también generan presiones sobre los recursos, contribuyendo a la pérdida de cobertura vegetal y a la degradación de ecosistemas estratégicos. Analizar su relación con la disminución de la vegetación nativa permite comprender cómo las dinámicas sociales y económicas inciden directamente sobre la sostenibilidad ecológica de las ciudades y sus entornos.

7.4. Degradación ambiental.

Según Jhonson, Ambrose, Bassett y Bowen (1999), la degradación o deterioro ambiental es:

El deterioro del medio ambiente a través del agotamiento de recursos como el aire, el agua y el suelo; la destrucción de los ecosistemas; la destrucción del hábitat; la extinción de la vida silvestre; y la contaminación. Se define como cualquier cambio o perturbación del medio ambiente que se perciba como perjudicial o indeseable (p. 581).

La degradación ambiental constituye una de las principales amenazas para la estabilidad de los ecosistemas y la calidad de vida humana. Este fenómeno es el resultado de una interacción desequilibrada entre las actividades humanas y el entorno natural, donde la búsqueda de desarrollo económico y urbano frecuentemente supera los límites de sostenibilidad. En este contexto, la pérdida de vegetación, la contaminación y la alteración de los suelos actúan como indicadores directos del deterioro ambiental. Reflexionar sobre este concepto implica reconocer que la degradación no solo afecta los recursos naturales, sino también las dinámicas sociales y económicas, ya que compromete los servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar colectivo y la resiliencia ambiental de los territorios.

7.5. Uso y ocupación del suelo

El concepto de uso y ocupación del suelo permite comprender cómo las dinámicas humanas transforman el territorio y generan impactos diferenciales según el tipo de actividad que se desarrolle. En ciudades complejas como Manizales, donde el crecimiento urbano se ha dado sobre laderas con altas restricciones ambientales, estas transformaciones adquieren mayor relevancia, ya que la expansión desordenada no solo reconfigura el paisaje, sino que también profundiza fenómenos como la fragmentación ecológica y social. La presión sobre áreas inestables o de valor ambiental evidencia la necesidad de una planificación territorial que oriente la ocupación hacia criterios de sostenibilidad, protegiendo los servicios ecosistémicos y minimizando la exposición a riesgos. Por ello, reflexionar sobre el uso del suelo implica reconocer que las decisiones de

urbanización legales o informales no son neutras, sino que determinan la calidad ambiental, la seguridad del entorno y la capacidad de la ciudad para mantener un equilibrio entre crecimiento y conservación (Secretaría de Planeación Municipal de Manizales, 2015)

7.6. Ecosistemas estratégicos

Los ecosistemas estratégicos representan la base funcional de los sistemas ambientales, ya que sostienen procesos esenciales para la vida humana y el equilibrio ecológico. En territorios de montaña como Manizales, estos ecosistemas, entre ellos los bosques altoandinos, los páramos y áreas protegidas como la Reserva de Río Blanco, cumplen un papel determinante en la regulación hídrica, la calidad del aire y la reducción de riesgos asociados a desastres naturales. Su fragilidad frente a la expansión urbana y las actividades antrópicas evidencia la necesidad de conservarlos no solo por su valor ecológico, sino también por los servicios ecosistémicos que garantizan bienestar y seguridad para la población. Reconocer su importancia implica entender que la degradación o pérdida de estos entornos afecta directamente la resiliencia ambiental de la ciudad, comprometiendo tanto su biodiversidad como la estabilidad de los procesos naturales que la sostienen (Álvarez del Castillo, 2013).

7.7. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos constituyen la base del bienestar humano, pues representan los múltiples beneficios que los sistemas naturales proporcionan a la sociedad y de los cuales depende la salud, la economía y la calidad de vida. Comprenderlos desde sus cuatro dimensiones (aprovisionamiento, regulación, culturales y de soporte) permite reconocer que estos procesos no son aislados, sino interdependientes y esenciales para la estabilidad ambiental. En contextos urbanos y de alta complejidad ecológica como Manizales, la provisión de agua, la regulación climática, el control de la erosión y la biodiversidad adquieren un valor estratégico, especialmente ante presiones como la pérdida de cobertura vegetal y la ocupación informal del suelo. Así, la conservación de los servicios ecosistémicos no solo es una responsabilidad ambiental, sino una condición necesaria para garantizar ciudades sostenibles y resilientes, tal como lo plantea Revilla (2016), quien resalta su

papel en la sostenibilidad y en la permanencia de los procesos naturales que sustentan la vida humana.

7.8. Cambio de cobertura vegetal

El cambio de cobertura vegetal se refiere a la transformación que sufre la cubierta vegetal natural en la superficie terrestre, causada por procesos naturales o, principalmente, por actividades humanas como la urbanización, agricultura, ganadería y deforestación. Este cambio implica la sustitución o degradación de la vegetación original, alterando la dinámica de los ecosistemas, el ciclo hidrológico y la estabilidad del suelo. Según Figueredo Fernández, Ramón Puebla, & Barrero Medel (2020), este proceso puede incluir la conversión de áreas boscosas a usos agrícolas, zonas urbanas o incluso tierras degradadas, y suele ir acompañado de cambios en la biodiversidad y funciones ambientales. La tasa y dirección del cambio varían según el contexto local y temporal, pero representan un indicador clave para entender el impacto humano sobre el paisaje y diseñar estrategias de conservación y restauración.

7.9. Expansión Urbana

La expansión urbana se entiende como un proceso asociado al crecimiento poblacional que es inevitable y a la valorización del uso del suelo convirtiéndose en un fenómeno profundamente transformador del territorio. No solo redefine los límites físicos de la ciudad, sino que también altera las dinámicas ecológicas y sociales de los espacios donde se extiende. Tal como señala Anzaldo (2019), la expansión abarca tanto el núcleo urbano como los bordes rurales funcionalmente conectados, produciendo tensiones que impactan la estructura del paisaje. En territorios como Manizales, donde las laderas, microcuencas y ecosistemas estratégicos cumplen funciones ambientales críticas, esta expansión, particularmente cuando ocurre de forma ilegal o desordenada, profundiza la fragmentación, aumenta la presión sobre los servicios ecosistémicos y genera vulnerabilidad ante riesgos geológicos y climáticos. Reflexionar sobre este concepto permite comprender que el crecimiento urbano no es neutro: implica decisiones colectivas sobre cómo habitar el territorio y qué valores priorizar en su transformación.

7.10. Ordenamiento territorial

El ordenamiento territorial, concebido como una política de Estado que articula dimensiones sociales, ambientales, económicas y culturales, constituye el marco esencial para orientar un desarrollo equilibrado y sostenible. Como expone Lücke (1999), su propósito no se limita a distribuir actividades en el espacio, sino a garantizar bienestar, justicia territorial y preservación del ambiente para las generaciones presentes y futuras. En un contexto donde proliferan ocupaciones ilegales, degradación ambiental y presiones urbanas sobre zonas frágiles, el ordenamiento adquiere un papel crítico: es el instrumento que permite prevenir conflictos por el uso del suelo, proteger ecosistemas estratégicos y asegurar que la expansión urbana ocurra dentro de límites ecológicos. Reflexionar sobre este concepto implica reconocer que la planificación no es solo un ejercicio técnico, sino también ético y político, donde se define el modo en que una sociedad decide cuidar o descuidar su territorio.

7.11. Acumulación de flujo

De acuerdo con Jenson (1988), la herramienta Flow Accumulation calcula el flujo acumulado como el peso total de todas las celdas que drenan hacia una celda específica siguiendo la dirección de pendiente descendente previamente determinada en el ráster de dirección de flujo.

Cuando no se asigna un peso específico a las celdas, el algoritmo considera un valor de 1 por defecto, de manera que el resultado representa el número de celdas que contribuyen con flujo hacia cada punto del terreno. Esto permite visualizar las áreas de mayor convergencia de escorrentía, las cuales suelen corresponder con los cauces principales o secundarios de drenaje.

7.12. Dirección de flujo

Para determinar la dirección de flujo es necesario establecer un patrón de movimiento del agua superficial a partir de las orientaciones de cada celda del modelo de elevación, las cuales se

calculan con base en las pendientes del terreno. Según lo expuesto por Ms. Graciela Pusiner (2005), este proceso se fundamenta en el principio del menor potencial, donde el flujo se desplaza hacia la dirección de máxima pendiente, es decir, hacia la ruta de menor resistencia que seguiría una gota de agua por efecto de la gravedad.

7.13. Microcuencas hidrográficas

Las microcuencas hidrográficas, descritas por Vasconez, y otros (2019) como unidades pequeñas que drenan hacia un cauce principal, representan escalas fundamentales para la gestión del agua y la conservación ambiental. Su importancia radica en que permiten observar, con mayor detalle, los procesos hidrológicos y ecológicos que sostienen la disponibilidad hídrica y la estabilidad del paisaje. En ciudades con compleja topografía como Manizales, muchas microcuencas cumplen funciones críticas al regular escorrentías, controlar erosión y sostener ecosistemas estratégicos en laderas. Sin embargo, cuando la expansión urbana ilegal avanza sobre estos espacios, se genera una alteración directa en los flujos hídricos, incrementando riesgos de deslizamientos y deterioro de la calidad del agua. Este concepto resalta que los problemas ambientales no se originan únicamente a gran escala: comienzan en pequeñas unidades territoriales cuya afectación acumulada determina la salud ecológica de toda la ciudad.

7.14. Infraestructura ecológica

La infraestructura ecológica, definida como la red de ecosistemas naturales y seminaturales que proveen servicios claves como regulación climática, control hídrico y sustentación de la biodiversidad como lo define el Gobierno de España (2014), constituye un soporte vital para los territorios, tan esencial como las infraestructuras grises tradicionales. Este concepto invita a reconocer que los ecosistemas no son “vacíos” disponibles para urbanizar, sino componentes estructurales del bienestar humano y la resiliencia ambiental urbana. En ciudades con alta diversidad ecológica y vulnerabilidad geológica como Manizales, la infraestructura ecológica cumple funciones irremplazables al mitigar riesgos y sostener servicios ecosistémicos cotidianos. No obstante, la expansión urbana ilegal tiende a fragmentarla y reducir su funcionalidad. Reflexionar

sobre ella permite comprender que cualquier intervención territorial debe integrar la naturaleza como parte activa del sistema urbano, no como un obstáculo para su crecimiento.

7.15. Reserva forestal

Las reservas forestales, concebidas por Herrera Martínez (2005) como áreas destinadas simultáneamente a la conservación ambiental y al aprovechamiento sostenible, representan espacios donde convergen la protección de la biodiversidad y la gestión responsable del recurso forestal. Su existencia permite garantizar procesos ecológicos esenciales, como la regulación hídrica, la protección del suelo y la conservación de flora y fauna. En contextos urbanos y periurbanos, como el de Manizales, estas reservas, entre ellas la Reserva Forestal Río Blanco, actúan como pulmones ecológicos y zonas de amortiguación frente a fenómenos naturales. Sin embargo, la ocupación ilegal y la presión urbanística sobre estas áreas debilitan sus funciones ecológicas y amenazan su sostenibilidad. Este concepto subraya la importancia de reconocer estas zonas no solo como reservas de madera o áreas protegidas, sino como pilares ecológicos necesarios para la estabilidad ambiental y la resiliencia urbana.

7.16. Conservación y restauración ecológica

La conservación y la restauración ecológica representan procesos fundamentales para enfrentar la degradación de los ecosistemas y recuperar su funcionalidad. Según la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (TEEB, 2010), este enfoque no solo busca reconstruir la estructura física de un ecosistema deteriorado, sino reactivar su capacidad para sostener biodiversidad y proporcionar servicios ecosistémicos esenciales. Reflexionar sobre este concepto implica reconocer que restaurar no es “devolver al pasado”, sino asistir la evolución de sistemas dinámicos marcados por la incertidumbre. En ciudades como Manizales, donde la presión sobre ecosistemas estratégicos es constante, la restauración ecológica permite reconstruir la resiliencia del territorio, considerando la memoria ecológica presente en suelos, clima y comunidades biológicas. Así, se convierte en un eje para mitigar impactos de la expansión urbana ilegal y recuperar espacios clave para la sostenibilidad.

7.17. Amenaza Alta, media y baja

En el marco de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial en Colombia, el Decreto 1807 de 2014 establece la clasificación de la amenaza natural como un criterio fundamental para orientar el uso del suelo y la ocupación del territorio, a partir de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de eventos potencialmente peligrosos, tales como deslizamientos e inundaciones. Esta clasificación se estructura en tres categorías: amenaza alta, media y baja, las cuales reflejan diferentes niveles de recurrencia, intensidad y potencial de afectación sobre la población, la infraestructura y los ecosistemas.

La amenaza alta corresponde a zonas donde existen procesos naturales activos o una alta recurrencia histórica de eventos de gran intensidad, lo que implica un riesgo inminente de afectación severa. Estas áreas se caracterizan por la presencia de fenómenos como deslizamientos, inundaciones intensas o socavamiento, con capacidad de generar daños significativos a la vida humana, las edificaciones y los sistemas ambientales. En consecuencia, esta categoría exige restricciones estrictas al uso del suelo, así como la realización de estudios técnicos detallados, dado su carácter crítico dentro de la gestión del riesgo territorial.

Por su parte, la amenaza media se refiere a territorios que no presentan procesos activos permanentes, pero que poseen condiciones físicas, geomorfológicas e hidrológicas que los hacen susceptibles a la ocurrencia de eventos de intensidad intermedia. Esta clasificación se fundamenta en análisis históricos y técnicos que evidencian una recurrencia moderada y un potencial de daño que puede materializarse bajo determinadas condiciones ambientales o antrópicas. En estas zonas se permiten usos del suelo condicionados, siempre que se implementen medidas de manejo y control del riesgo.

Finalmente, la amenaza baja agrupa áreas con baja probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos, ya sea por la mínima recurrencia histórica, la baja intensidad de los fenómenos registrados o la ausencia de evidencias relevantes de procesos activos. Estas zonas presentan condiciones físicas relativamente estables, lo que permite una mayor flexibilidad en los usos del

suelo; no obstante, su gestión debe apoyarse en análisis complementarios que garanticen la prevención frente a posibles vulnerabilidades latentes.

7.18. Sistemas de Información Geográfica

Los SIG, definidos por UEB (2024) como herramientas capaces de integrar, analizar y representar datos geoespaciales, son hoy esenciales para cualquier estudio que involucre el territorio. Su valor no radica solo en la capacidad tecnológica de manejar grandes volúmenes de información, sino en su potencial para integrar múltiples capas de datos ambientales, sociales y espaciales en un mismo entorno analítico. En investigaciones sobre cobertura vegetal, expansión urbana ilegal o planificación territorial, los SIG permiten observar el territorio desde múltiples dimensiones, revelando patrones complejos y generando evidencia científica que soporta la toma de decisiones. Este concepto implica reconocer que los SIG han transformado la forma en que entendemos y gestionamos el espacio.

7.19. Análisis espacial

El análisis espacial, definido por ICDE (2021) como el conjunto de métodos que permiten manipular y estudiar datos distribuidos en el espacio, constituye la base interpretativa de la geografía moderna y la gestión ambiental. Su poder radica en revelar patrones, relaciones y dinámicas que no serían evidentes mediante simples observaciones locales. A través del análisis espacial es posible comprender cómo interactúan los elementos del territorio, identificar zonas de riesgo, detectar cambios multitemporales y tomar decisiones informadas para la planificación. En investigaciones que examinan pérdida de cobertura vegetal o expansión urbana ilegal, esta herramienta permite transformar datos satelitales y cartográficos en conocimiento útil para explicar procesos complejos y orientar intervenciones territoriales.

7.20. Modelos Digitales de Elevación

Los Modelos Digitales de Elevación, descritos por Felicísimo (s.f) son representaciones numéricas del relieve que se convierten en insumos indispensables para analizar la morfología del territorio. Permiten derivar pendientes, sombras, cuencas, rutas de drenaje y condiciones geomorfológicas que influyen directamente en los procesos ambientales. Su utilidad es especialmente relevante en ciudades de topografía compleja como Manizales, donde los análisis de riesgo, erosión y expansión urbana requieren comprender cómo la forma del terreno condiciona la dinámica ecológica y urbana. Estos modelos, ya sean matrices regulares (DTM) o redes irregulares triangulares (TIN), posibilitan caracterizar el relieve con precisión y, por tanto, construir diagnósticos más confiables sobre el uso del suelo y la estabilidad ambiental.

7.21. Curvas de nivel

Las curvas de nivel, definidas por Gourou (s.f) como líneas que unen puntos con igual altitud, constituyen una representación clásica pero indispensable para comprender el relieve. A través de su lectura es posible interpretar pendientes, formas de terreno, valles, cimas y cambios abruptos que condicionan la dinámica del uso del suelo. Aunque simples, estas líneas contienen información clave para la planificación urbana y ambiental, especialmente en territorios montañosos como Manizales. Su análisis permite identificar zonas de riesgo, orientar proyectos de infraestructura, delimitar áreas de protección y evaluar la viabilidad de asentamientos humanos. Reflexionar sobre este concepto destaca la importancia de las representaciones cartográficas tradicionales como soporte para decisiones contemporáneas basadas en SIG.

7.22. Teledetección

La teledetección, conceptualizada por la Universidad de Murcia como la obtención de información a distancia mediante sensores, constituye una herramienta fundamental para monitorear el territorio de manera constante, precisa y eficiente. Gracias a ella es posible analizar cambios temporales en la cobertura vegetal, identificar áreas afectadas por procesos antrópicos y caracterizar condiciones ambientales sin necesidad de desplazarse físicamente. Su importancia es aún mayor en ciudades como Manizales, donde la topografía dificulta el acceso a muchas áreas y la dinámica

ambiental requiere información actualizada. Reflexionar sobre este concepto evidencia cómo la tecnología satelital se ha convertido en un soporte clave para la investigación científica, la planificación territorial y la gestión sostenible del ambiente.

7.23. Sensores remotos

Los sensores remotos constituyen la base tecnológica de la teledetección y permiten observar, medir y analizar fenómenos ambientales sin necesidad de contacto directo con la superficie terrestre. Su clasificación en sensores pasivos y activos resulta fundamental para comprender el tipo de información que se obtiene y su aplicabilidad en estudios ambientales: mientras los sensores pasivos dependen de la radiación solar reflejada o emitida por los objetos, los sensores activos emiten su propia energía y registran la señal de retorno, lo que amplía las posibilidades de análisis en condiciones atmosféricas o de iluminación adversas. En el contexto del análisis de la cobertura vegetal y la expansión urbana informal, el uso de sensores remotos posibilita la adquisición sistemática y multitemporal de información espacialmente continua, facilitando la detección de cambios en el paisaje, la identificación de áreas intervenidas y la evaluación de procesos de degradación ambiental. De este modo, los sensores remotos se consolidan como herramientas indispensables para el monitoreo territorial, el análisis ambiental y la toma de decisiones en la planificación urbana y la gestión sostenible del suelo (Parra Henao, 2010)

7.24. Satélite Sentinel

Los satélites Sentinel, desarrollados por la Agencia Espacial Europea en el marco del programa Copernicus, representan un avance estratégico para la observación sistemática y continua de la Tierra, al ofrecer información gratuita, estandarizada y de alta calidad para el análisis ambiental y territorial. En particular, misiones como Sentinel-2, con su capacidad multiespectral y alta resolución espacial y temporal, resultan especialmente relevantes para el estudio de la cobertura vegetal, los cuerpos de agua y los cambios en el uso y ocupación del suelo. La disponibilidad periódica de imágenes permite realizar análisis multitemporales robustos, fundamentales para identificar dinámicas de transformación del paisaje asociadas a procesos antrópicos como la

expansión urbana informal. En este sentido, el uso de datos Sentinel fortalece la objetividad y replicabilidad de los estudios geoespaciales, al tiempo que contribuye a la construcción de diagnósticos ambientales confiables que apoyan la planificación territorial, la gestión del riesgo y la toma de decisiones basadas en evidencia científica (Plan Nacional de Observación del Territorio, s.f)

7.25. Combinación de bandas

Las combinaciones de bandas constituyen una herramienta fundamental en el análisis de imágenes satelitales, ya que permiten resaltar y diferenciar de manera visual y analítica las características biofísicas del territorio que no son evidentes en una imagen de color natural. Al asignar distintas bandas espectrales a los canales rojo, verde y azul, es posible enfatizar coberturas como la vegetación, los cuerpos de agua, las áreas urbanizadas o los suelos desnudos, facilitando la interpretación de patrones espaciales y procesos ambientales. En estudios de dinámica de cobertura vegetal y expansión urbana, las combinaciones en color falso son especialmente útiles para identificar zonas de pérdida de vegetación, estrés vegetal o transformación antrópica, ya que amplifican las diferencias espectrales entre superficies naturales y artificiales. De este modo, su aplicación no solo mejora la lectura visual del paisaje, sino que también apoya etapas clave del procesamiento digital, como la selección de áreas de entrenamiento y la validación de clasificaciones supervisadas, fortaleciendo el análisis espacial y la comprensión de los cambios territoriales (Alonso, 2019)

7.26. Firmas espectrales

Las firmas espectrales constituyen un elemento fundamental para la identificación y diferenciación de coberturas en estudios de teledetección, ya que permiten reconocer el comportamiento específico de cada tipo de superficie frente a la radiación electromagnética. En el análisis de la cobertura vegetal, estas firmas reflejan las condiciones fisiológicas de la vegetación, como su densidad, vigor y estado de salud, lo que posibilita distinguir entre áreas con vegetación natural, suelos desnudos y superficies intervenidas antrópicamente. En contextos de expansión

urbana informal, el conocimiento y la correcta interpretación de las firmas espectrales adquieren especial relevancia, pues facilitan la detección precisa de cambios en el uso del suelo y la identificación de procesos de deforestación y degradación ambiental. De esta manera, las firmas espectrales no solo permiten una clasificación supervisada más confiable, sino que también fortalecen el análisis temporal de las transformaciones del paisaje, aportando evidencia objetiva para la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión ambiental (Teledetección, s.f).

7.27. Índice NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se consolida como una de las herramientas más robustas y ampliamente utilizadas para el análisis de la cobertura vegetal a partir de sensores remotos, debido a su capacidad para sintetizar el comportamiento espectral de la vegetación en un indicador cuantitativo y comparable en el tiempo. Al relacionar la reflectancia del infrarrojo cercano, asociada a la estructura celular y el vigor de la vegetación, con la reflectancia en la banda roja, ligada a la absorción por la clorofila, el NDVI permite discriminar con claridad áreas con vegetación sana, vegetación degradada y superficies sin cobertura vegetal. En contextos urbanos y periurbanos, este índice resulta especialmente pertinente para evaluar procesos de pérdida de vegetación asociados a la expansión de asentamientos humanos, ya que evidencia disminuciones progresivas en el vigor y continuidad de la cobertura vegetal. Asimismo, su aplicación en análisis multitemporales facilita la identificación de tendencias espaciales de degradación o recuperación ecológica, aportando un insumo clave para la toma de decisiones en ordenamiento territorial, gestión ambiental y evaluación de impactos antrópicos sobre ecosistemas estratégicos (Gonzaga Aguilar, 2015)

7.28. Clasificación supervisada

La clasificación supervisada constituye una metodología clave en los estudios de análisis de cobertura y uso del suelo, dado que incorpora el conocimiento previo del investigador sobre el territorio mediante la selección de áreas de entrenamiento representativas de cada clase temática. Este enfoque permite establecer una relación directa entre las firmas espectrales de referencia y las

coberturas reales presentes en el área de estudio, incrementando la precisión y confiabilidad de los resultados. En investigaciones orientadas a evaluar la pérdida de cobertura vegetal asociada a la expansión urbana informal, la clasificación supervisada resulta especialmente pertinente, ya que facilita diferenciar de manera más rigurosa la vegetación natural, las áreas intervenidas y los suelos expuestos producto de procesos antrópicos. Además, al aplicarse de forma multitemporal, esta técnica permite analizar la evolución espacial de las coberturas, identificar tendencias de transformación del paisaje y sustentar análisis comparativos que fortalecen la interpretación de los cambios ambientales en contextos urbanos y periurbanos (Rasilla & Conde, 2023)

7.29. Clasificación de Máxima Verosimilitud

La Clasificación de Máxima Verosimilitud representa un enfoque estadístico sólido para la interpretación de imágenes satelitales, al basarse en principios probabilísticos que permiten una asignación más rigurosa de las coberturas del suelo. Su fortaleza radica en que no solo considera la distancia espectral entre un píxel y las clases definidas, sino también la variabilidad interna y la relación entre las bandas espectrales, lo que incrementa la confiabilidad de los resultados cuando las firmas espectrales están bien caracterizadas. En estudios ambientales y urbanos, como aquellos enfocados en la pérdida de cobertura vegetal por expansión de asentamientos informales, este método resulta especialmente pertinente, ya que permite diferenciar de manera precisa entre vegetación, suelo desnudo y superficies construidas, aun cuando existan solapamientos espectrales parciales. No obstante, su desempeño depende en gran medida de la calidad, representatividad y homogeneidad de las áreas de entrenamiento, lo que exige un conocimiento previo del territorio y un cuidadoso proceso de validación. En este sentido, la Clasificación de Máxima Verosimilitud no solo aporta resultados cuantitativos confiables, sino que también refuerza el análisis espacial al ofrecer una base técnica robusta para evaluar transformaciones antrópicas del paisaje y sus implicaciones ambientales (Liang, Cheng, & Wei Zhang, 2021).

7.30. Matriz de confusión e índice Kappa

Como lo afirma Muñoz (2016):

“La matriz de confusión se construye a partir de una imagen satélite con N celdillas clasificadas en M clases. Sobre las columnas se ordenan las clases reales y sobre las filas las unidades. Los elementos que aparecen en la diagonal nos indican el número de clasificaciones realizadas correctamente, y aquellos que aparecen fuera suponen mitigaciones o fugas” (p. 11)

La matriz de confusión constituye una herramienta fundamental para la evaluación de la calidad de los procesos de clasificación de imágenes satelitales, en tanto permite contrastar de manera sistemática la información obtenida a partir del análisis digital con una referencia considerada como “real” o de mayor confiabilidad. Más allá de ser un simple cuadro comparativo, la matriz de confusión ofrece una lectura estructurada de los aciertos y errores del proceso de clasificación, evidenciando tanto la capacidad del modelo para identificar correctamente las clases como las confusiones existentes entre ellas.

8. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados, se implementaron diversas etapas metodológicas que permitieron organizar y ejecutar de manera secuencial las actividades necesarias para el desarrollo del presente proyecto con aplicaciones significativas en el ámbito ambiental, al centrarse en los cambios de cobertura vegetal dentro del área de estudio, zona norte de la cabecera municipal de Manizales. Su relevancia radica en que contribuye a la comprensión de los procesos de transformación del territorio, particularmente en sectores con presencia de asentamientos humanos y presión antrópica.

La metodología se basa en el procesamiento de imágenes ópticas satelitales correspondientes a los años 2020 y 2024, lo que permitió realizar una comparación temporal de la cobertura vegetal mediante el uso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y técnica de clasificación supervisada. Este enfoque permitió identificar las variaciones en la cobertura, así como cuantificar los cambios en extensión y densidad de la vegetación.

Complementariamente, se elaboró un modelo de elevación digital del terreno a partir de la obtención de puntos con coordenadas en Google Earth, lo que posibilitó generar un análisis topográfico del área. A partir de este modelo se derivaron productos como las curvas de nivel, la dirección y acumulación de flujo, los cuales fortalecen la interpretación espacial de los resultados y su relación con las condiciones del terreno.

8.1. Analizar la variación de la cobertura vegetal en el área de estudio mediante índice NDVI y técnica de clasificación supervisada

8.1.1. Procedimiento

En cumplimiento del presente objetivo, se desarrolló las siguientes actividades:

8.1.1.1. Delimitación zona de estudio

Figura 1.

Delimitación de la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

La delimitación de la zona de estudio abarca un territorio con diversas características ecosistémicas de relevancia ambiental, entre las que se incluyen áreas de reserva forestal de Ley Segunda, infraestructura ecológica estratégica, así como la presencia de microcuencas y fajas forestales protectoras. Estas condiciones hacen de la zona un espacio ambientalmente sensible, donde los procesos de pérdida de vegetación y cambios en la cobertura pueden tener repercusiones significativas en la dinámica ecológica y en la provisión de servicios ambientales.

Particularmente, el sector del Alto del Guamo se caracteriza por la presencia de asentamientos en zonas de restricción severa, debido a que parte del territorio se localiza dentro de áreas clasificadas como de amenaza alta y media por movimientos en masa, así como en fajas forestales protectoras asociadas a la quebrada El Guamo. Esta quebrada constituye una microcuenca de importancia para el abastecimiento del acueducto municipal, lo que incrementa la relevancia ambiental y funcional del área.

La coexistencia de asentamientos en estos espacios de protección y riesgo configura un escenario de alta fragilidad territorial, donde la ocupación antrópica se superpone con áreas destinadas a la conservación hídrica y a la mitigación de amenazas naturales. Por esta razón, la zona del Alto del Guamo representa un caso de estudio pertinente para analizar la relación entre la pérdida de cobertura vegetal, la dinámica hidrológica y la ocupación en zonas de restricción severa.

8.1.1.2. Obtención de imágenes satelitales.

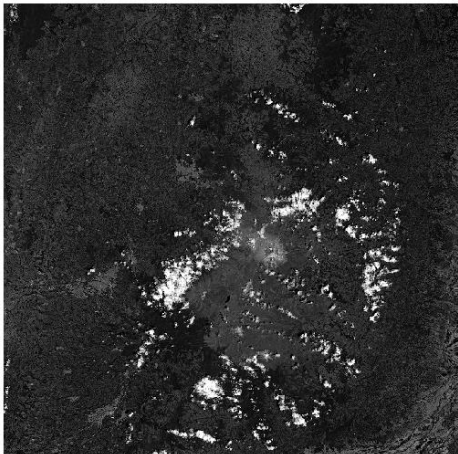
En primera instancia se procedió a la búsqueda de las imágenes satélite de los años 2016 al 2024 para el análisis multitemporal de la pérdida de vegetación en el área de estudio a través del portal USGS Earth Explorer, con la finalidad de evaluar la pertinencia de los productos Landast. Sin embargo, se identificó que la resolución espacial de dichas imágenes (30m por píxel), las cuales no se adecuaban para el objetivo de la investigación, dado que se requería un nivel de detalle más específico de (10m por píxel) para la caracterización de los cambios en la cobertura vegetal, adicionalmente, las imágenes de satélite de acuerdo con el área de estudio, en su mayoría tienen cobertura de nubes del 90%, lo que imposibilita el análisis correspondiente.

En efecto, ante esta limitación se decidió trabajar con imágenes de satélite Sentinel-2 nivel 2A, disponibles en el portal de Copernicus Browser, el cual incluye la corrección atmosférica y permite tener índices espectrales de manera más confiable.

Posteriormente, se estableció como criterio de búsqueda, un rango de fechas entre los años 2016 y 2024, priorizando aquellas cuyo porcentaje de nubosidad fuera (el más bajo (entre 0 a 20%) y obteniendo como resultado las siguientes dos escenas: una del 18 de febrero del año 2020 y otra del 30 de agosto del año 2024, las cuales presentaron condiciones óptimas de resolución 10m por píxel en las bandas 4 y 8 para su posterior análisis.

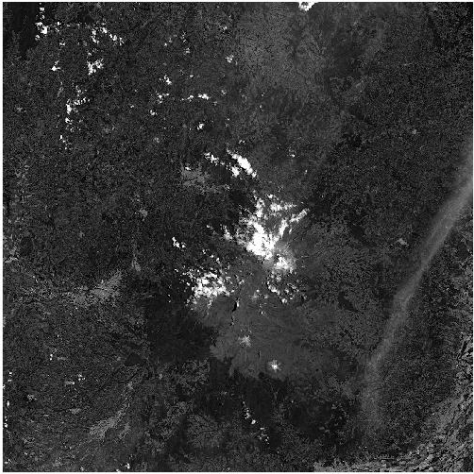
Los datos específicos de cada una de las imágenes contienen las características descritas en la figura 2 y figura 3.

Figura 2.*Imagen Sentinel 2A año 2020.*

<u>Características imagen Sentinel año 2020</u>	
Fecha: 2020-02-18 Nombre: S2A_MSIL2A_20200218T152631_N0500_R025_T18NVL_20230612T221639.SAFE Satélite: Sentinel 2 Nivel de procesamiento: 2A Número de órbita: 24332 Cobertura de nubes: 5.563993 Origen: ESA	

Fuente: Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea – ESA – Año 2020.

Figura 3. *Imagen Sentinel 2A año 2024.*

<u>Características imagen Sentinel año 2024</u>	
Fecha: 2024-08-30 Nombre: S2B_MSIL2A_20240830T152659_N0511_R025_T18NVL_20240830T210844.SAFE Satélite: Sentinel 2 Nivel de procesamiento: 2A Número de órbita: 39090 Cobertura de nubes: 5.267189 Origen: ESA	

Fuente: Copernicus Open Access Hub de la Agencia Espacial Europea – ESA – Año 2024.

8.1.1.3. Procesamiento de las imágenes satélite.

Se decidió emplear el software ArcGIS Pro, que ofrece un entorno más robusto y versátil para el tratamiento de datos espaciales y la generación de productos cartográficos. Una de las principales ventajas de ArcGIS Pro radica en la integración de múltiples herramientas en un mismo

entorno, lo cual facilita el flujo de trabajo desde la preparación de datos hasta el análisis final. Además, este software proporciona algoritmos de clasificación supervisada altamente optimizados, con opciones como el método de Maximun Likelihood Classification, el cual es ampliamente validado en estudios de teledetección. (Clasificación de Máxima Verosimilitud (Spatial Analyst), s.f)

Por consiguiente, a través de la herramienta geográfica de ArcGIS Pro se procesaron las imágenes de satélite Sentinel -2 previamente seleccionadas para generar en esta fase el índice de vegetación, de modo que, con el fin de obtener una representación NDVI de la cobertura vegetal del área de estudio, se empleó la herramienta Ráster Calculator de ArcGIS Pro en la cual se implementó la siguiente ecuación:

Ecuación 1.

Cálculo del índice NDVI.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Fuente: (Ferrerias, 2021).

Donde:

B8= banda de infrarrojo cercano

B4= banda del rojo, ambas con resolución de 10m

El resultado de la operación anterior da como resultado un ráster cuyos valores oscilan entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican una mayor densidad y vigorosidad de la vegetación y los valores cercanos al -1 corresponden a áreas con escasa cobertura vegetal, superficies construidas o cuerpos de agua.

Cabe resaltar que la fórmula aplicada se utiliza explícitamente para imágenes Sentinel-2, porque para las de Landsat se utilizan las bandas 4 (rojo) y 5 (infrarrojo cercano), de acuerdo con la configuración espectral de dicho sensor según (Adminbeersmacon, 2019).

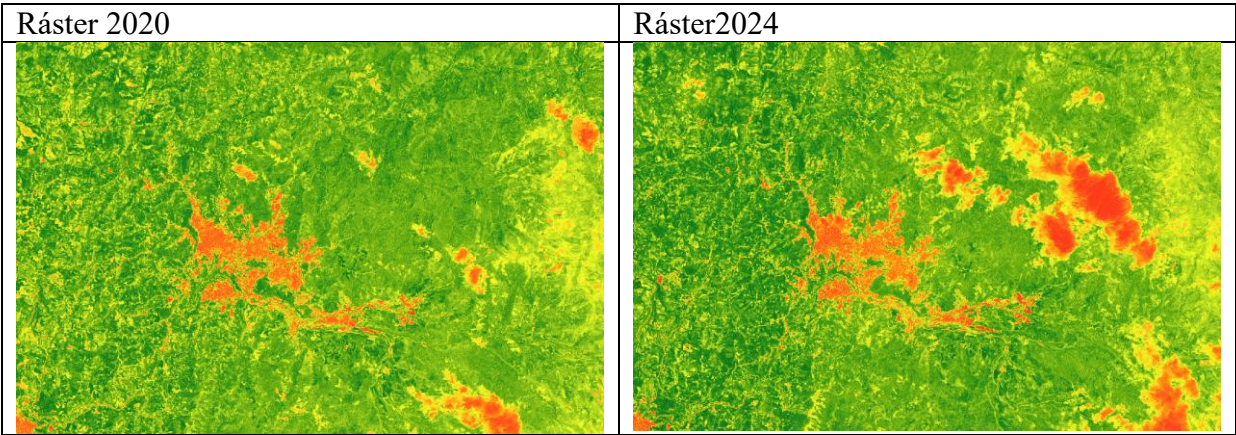
De ahí que, una vez obtenidos los ráster, se procede a aplicar la colorimetría que se observa en la figura 4, de verde a rojo, con el objetivo de facilitar la interpretación visual: los tonos verdes representaron áreas con mayor densidad de vegetación, mientras que los tonos rojos identificaron zonas con menor cobertura vegetal o presencia de superficies artificiales, como lo afirma la NASA (EarthData, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 2025) y descrita en la figura 5.

Figura 4.
Colorimetría para NDVI.

	Vegetacion_Muy_Densa
	Vegetacion_Abundante
	Vegetacion_Dispersa
	Poca_Vegetacion
	Sin_Vegetacion

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.
Índices NDVI.



Fuente: elaboración propia.

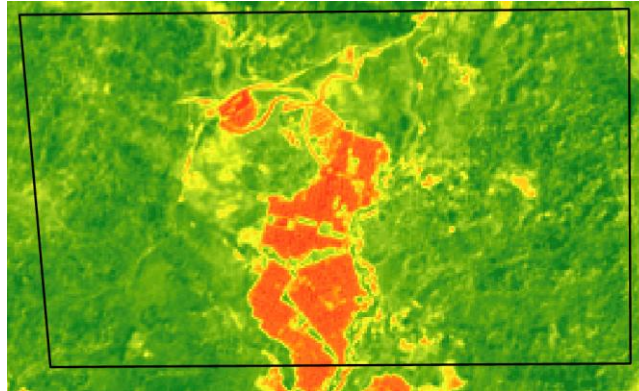
8.1.1.4. Recorte de los índices NDVI a partir del área de estudio

Con el propósito de centrar el análisis en el área específica objeto de investigación, la cual se ubica en la zona norte de la ciudad de Manizales, se procedió al recorte del polígono correspondiente al área de estudio. Una vez ajustado este polígono, se utilizó la herramienta Extract

by Mask, lo que permitió recortar los ráster únicamente a la extensión geográfica de interés. Este procedimiento garantizó que el procesamiento posterior se enfocara exclusivamente en la zona bajo análisis optimizando la precisión de los resultados.

Figura 6.

Zona de estudio.



Fuente: elaboración propia.

8.1.1.5. Clasificación supervisada.

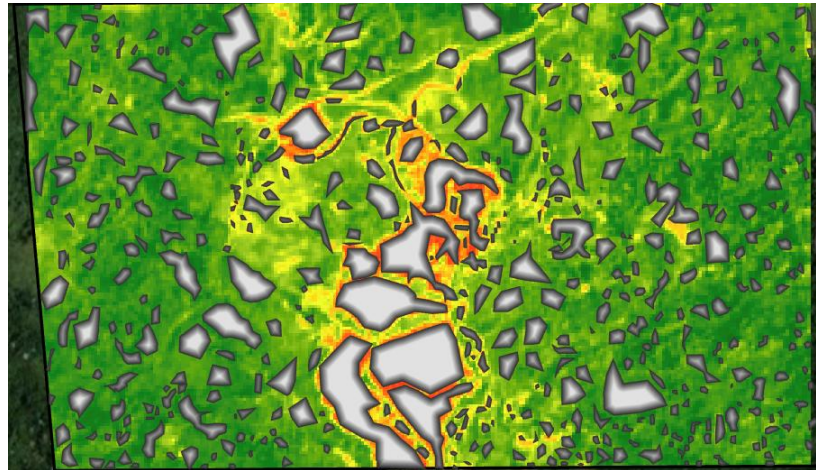
Definición de zonas de entrenamiento:

El procedimiento de clasificación supervisada se llevó a cabo, ya que al vectorizar el Ráster NDVI mediante la herramienta de conversión en Arcgis Pro, no muestra los valores de la clase, por ende, cada clase se identifica por su colorimetría. Significa entonces que, se requiere de las geometrías poligonales para obtener las áreas de clasificación, cuya actividad de describe a continuación:

Se realizó la creación de una Feature Class de tipo polígono, sobre la cual se georreferenciaron manualmente diferentes áreas en zonas representativas de las coberturas presentes en la imagen Ráster ajustada al área de estudio, la figura 7 representa gráficamente dichas zonas.

Figura 7.

Polígonos definidos como zonas de entrenamiento.



Fuente: elaboración propia.

De modo que, cada polígono (Zona de entrenamiento) se le asignó un valor numérico en la tabla de atributos, correspondiente a la categoría de cobertura vegetal identificada según la siguiente clasificación:

Vegetación muy densa (color verde oscuro): valor 1

Vegetación abundante (color verde claro): valor 2

Vegetación dispersa (color amarillo): valor 3

Poca vegetación (color naranja): valor 4

Sin vegetación (color rojo): valor 5

Este proceso permitió estructurar la base de las zonas de entrenamiento que posteriormente se empleó para aplicar el algoritmo de clasificación supervisada, diferenciando de manera precisa los diferentes niveles de cobertura vegetal presentes en la imagen.

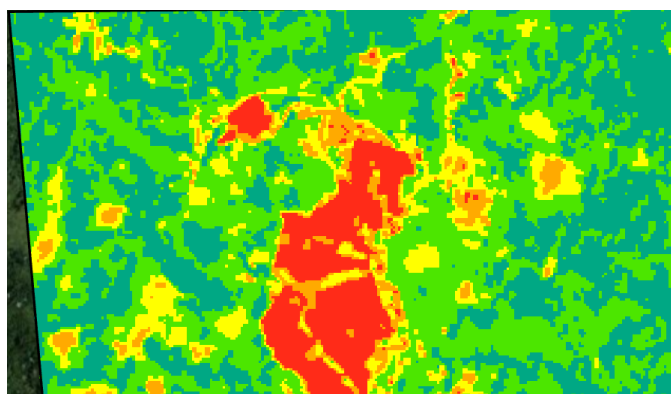
Mediante la herramienta Creature Signatures, se generaron las firmas espectrales correspondientes a cada cobertura definida previamente, estas firmas constituyen la base estadística para que el algoritmo pueda diferenciar los diferentes tipos de coberturas presentes en las imágenes ráster. Posteriormente, se procesa la firma espectral con la herramienta Maximun Likelihood

Classification en el que se asume que los valores de cada clase representando una distribución normal multivariante asignando cada píxel a la categoría con la mayor probabilidad estadística de pertenencia.

Este proceso generó una imagen clasificada que se muestra en la figura 8, en la que se representaron las cinco categorías establecidas: vegetación muy densa, vegetación abundante, vegetación dispersa, poca vegetación y sin vegetación. Dicho producto constituyó la base para el análisis comparativo multitemporal entre los años, orientado a identificar los cambios en la cobertura vegetal del área de estudio.

Figura 8.

Imagen clasificada.



Fuente: elaboración propia.

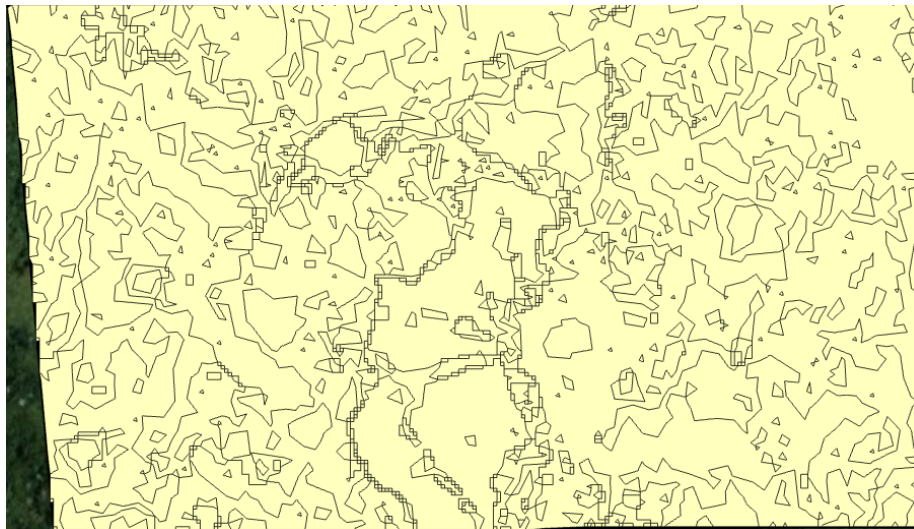
A cada una de las imágenes ráster resultantes, se les anexaron en la tabla de atributos un campo de clase pertenecientes a cada clasificación de la manera que se muestra en la figura 9.

Figura 9.*Tabla de atributos con sus clases.*

	OBJECTID *	Value	Count	Clase
1	1	1	19842	Vegetacion_muy_densa
2	2	2	11639	Vegetacion_abundante
3	3	3	2054	Vegetacion_dispersa
4	4	4	1403	Poca_Vegetacion
5	5	5	2655	Sin_Vegetacion

Fuente: elaboración propia.

Seguidamente, mediante la herramienta Ráster to polygon se procedió a la vectorización de la clasificación de la imagen Ráster, la cual permitió convertir cada categoría en entidades poligonales. Este proceso facilitó la obtención de información espacial más detallada y la realización de los cálculos de área de las superficies de cada clase.

Figura 10.*Imagen Ráster vectorizada.*

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se calcula el área expresada en hectáreas y con esta información se agrupan por la variable “clase”. Esto constituyó la base para la comparación entre los dos periodos temporales (2020 y 2024).

Figura 11.

Tabla de atributos con áreas.

	OBJECTID *	Clase	FREQUENCY	SUM_Ha
1	1	Poca_Vegetacion	201	13,916386
2	2	Sin_Vegetacion	18	26,677519
3	3	Vegetacion_abundante	277	116,068265
4	4	Vegetacion_dispersa	317	20,06884
5	5	Vegetacion_muy_densa	102	199,214405

Fuente: elaboración propia.

8.1.1.6. Validación de la clasificación mediante matriz de confusión e índice Kappa

Para evaluar la precisión de la clasificación supervisada, se construyó una matriz de confusión con base en puntos de validación independientes. Para ello, se creó una Feature Class de tipo punto y se realizó la caracterización directamente sobre la imagen ráster original del NDVI. A cada punto se le asignaron dos campos en la tabla de atributos: (clase, Val_In)

- Con los puntos de referencia se cruzó la clasificación y se obtuvo la matriz de confusión, a partir de la cuales se calcularon:
 - Exactitud global (Po): proporción de aciertos (suma de la diagonal principal/ total de observaciones)
 - Exactitudes por clase: del productor (omisiones) y del usuario (comisiones), para identificar sesgos específicos.

- Exactitud esperada por azar (P_e): estimada con los totales de filas y columnas de la matriz.
- Índice Kappa (k): medida de acuerdo que descuenta el azar, calculada como:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Ecuación 2. Fórmula para calcular el índice Kappa

El valor k obtenido se reporta en la sección de resultados junto con su interpretación cualitativa, lo que permite contextualizar la confiabilidad del mapa clasificado más allá de la exactitud global. Esta verificación respalda el uso de los productos generados para el análisis comparativo entre las imágenes de los años 2020 y 2024.

8.2. Determinar los patrones de dirección y acumulación de flujo superficial en el área de estudio con el fin de analizar su relación con la dinámica de escorrentía.

8.2.1. Modelo de elevación (DEM) y curvas de nivel.

Para el cumplimiento de este objetivo, se completó el análisis de cobertura vegetal y comprendió la dinámica topográfica del área de estudio, se elaboró un modelo de elevación digital con el propósito de identificar las variaciones del relieve y su influencia en los patrones de drenaje y dirección de flujo.

Este modelo permitió representar de manera tridimensional la superficie del terreno, facilitando la generación de productos derivados como las curvas de nivel, dirección de flujo y acumulación de flujo, fundamentales para analizar la relación entre la morfología del terreno y los procesos de pérdida de cobertura vegetal. Dado que no se contaba con información oficial de curvas de nivel o modelos de elevación de alta resolución para el área de estudio, se optó por construir un Modelo de Elevación Digital (DEM) a partir de la obtención manual de puntos de altitud utilizando

Google Earth Pro. Este método permitió generar una representación aproximada del relieve, suficiente para complementar el análisis de cobertura vegetal desarrollado previamente.

En primera instancia, se insertó el polígono correspondiente al área de estudio en Google Earth, delimitando la zona de análisis sobre la vía al Guamo, en el municipio de Manizales zona norte. A partir de este límite, se creó una ruta aleatoria que permitió cubrir de todo el polígono con una gran cantidad de puntos de forma manual como se representa en la figura 12. Es importante resaltar que, a mayor número de puntos, mayor precisión tendrá el modelo generado, dado que se representa con más detalle la variación altitudinal del terreno.

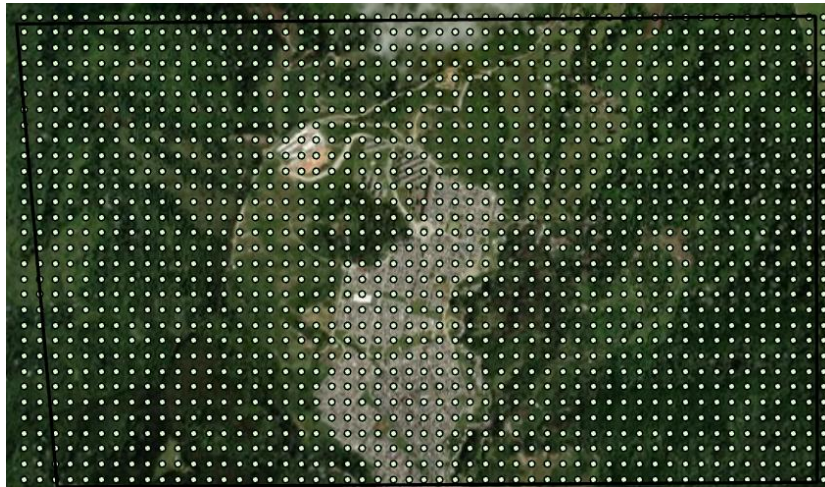
Figura 12.

Ruta de puntos en Google Earth.



Fuente: elaboración propia.

De manera paralela, la figura 13 muestra el resultado del proceso de generación de puntos con el software ArcGIS Pro, en el que se creó una grilla regular de puntos con espaciamiento de 50 metros, distancia definida a partir de la capacidad máxima admitida por la plataforma GPSVisualizer para la extracción de datos de elevación sin pérdida de información ni sobrecarga del sistema. Esta grilla permitió asegurar una cobertura espacial uniforme y una adecuada representatividad del relieve dentro del polígono de estudio.

Figura 13.*Grilla de puntos homogénea.*

Fuente: elaboración propia.

Una vez completada la digitalización, la ruta se guardó en formato .KML. Sin embargo, al revisar el archivo en un editor de texto (Bloc de notas), se evidenció en la figura 14 que los puntos no contenían información de altura. Por tal motivo, fue necesario recurrir a la herramienta en línea GPSVisualizer (<https://www.gpsvisualizer.com/elevation>), la cual permite obtener los valores de elevación a partir de las coordenadas geográficas de cada punto, basándose en modelos globales de altitud (como SRTM o ALOS). De este proceso se obtuvo un nuevo archivo en formato .GPX, que incluye tanto la ubicación geográfica como la altitud correspondiente a cada punto.

Figura 14.*Elevaciones creadas en GPX.*

```

<trkseg>
<trkpt lat="5.093806202" lon="-75.500444249">
  <ele>2031.053</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.093657125" lon="-75.500352753">
  <ele>2033.624</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.093686821" lon="-75.500213966">
  <ele>2027.394</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.09366198" lon="-75.500135636">
  <ele>2024.282</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.093591424" lon="-75.500029305">
  <ele>2020.76</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.093610332" lon="-75.499935439">
  <ele>2017.382</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.09366246" lon="-75.499776532">
  <ele>2013.228</ele>
</trkpt>
<trkpt lat="5.093572124" lon="-75.499597191">
  <ele>2013.477</ele>

```

Fuente: elaboración propia.

La nube de puntos generada y procesada tanto en Google Earth como en ArcGIS Pro fue comparada, evidenciándose que los valores de elevación obtenidos en ambos entornos fueron consistentes y equivalentes. Esta concordancia valida la confiabilidad del procedimiento empleado y garantiza la robustez de los insumos utilizados para la posterior construcción del modelo digital de elevación y los análisis hidrológicos asociados.

Posteriormente, el archivo .GPX fue importado a ArcGIS Pro mediante la herramienta Conversion Tools → From GPS → GPX to Features, que convierte los datos del GPS a una capa vectorial tipo Feature Class, compatible con los procesos de análisis geográfico. Una vez realizado este paso, se verificó la tabla de atributos para confirmar que el campo de elevación (Elevation) se hubiera cargado correctamente, garantizando la confiabilidad de los datos como se muestra en la figura 15.

Figura 15.

Tabla de atributos con elevaciones.

OBJECTID *	Shape *	Name	Type	Elevation
1	Point Z	Curvas	TRKPT	2031,053
2	Point Z	Curvas	TRKPT	2033,624
3	Point Z	Curvas	TRKPT	2027,394
4	Point Z	Curvas	TRKPT	2024,282
5	Point Z	Curvas	TRKPT	2020,76
6	Point Z	Curvas	TRKPT	2017,382
7	Point Z	Curvas	TRKPT	2013,228
8	Point Z	Curvas	TRKPT	2013,477

Fuente: elaboración propia.

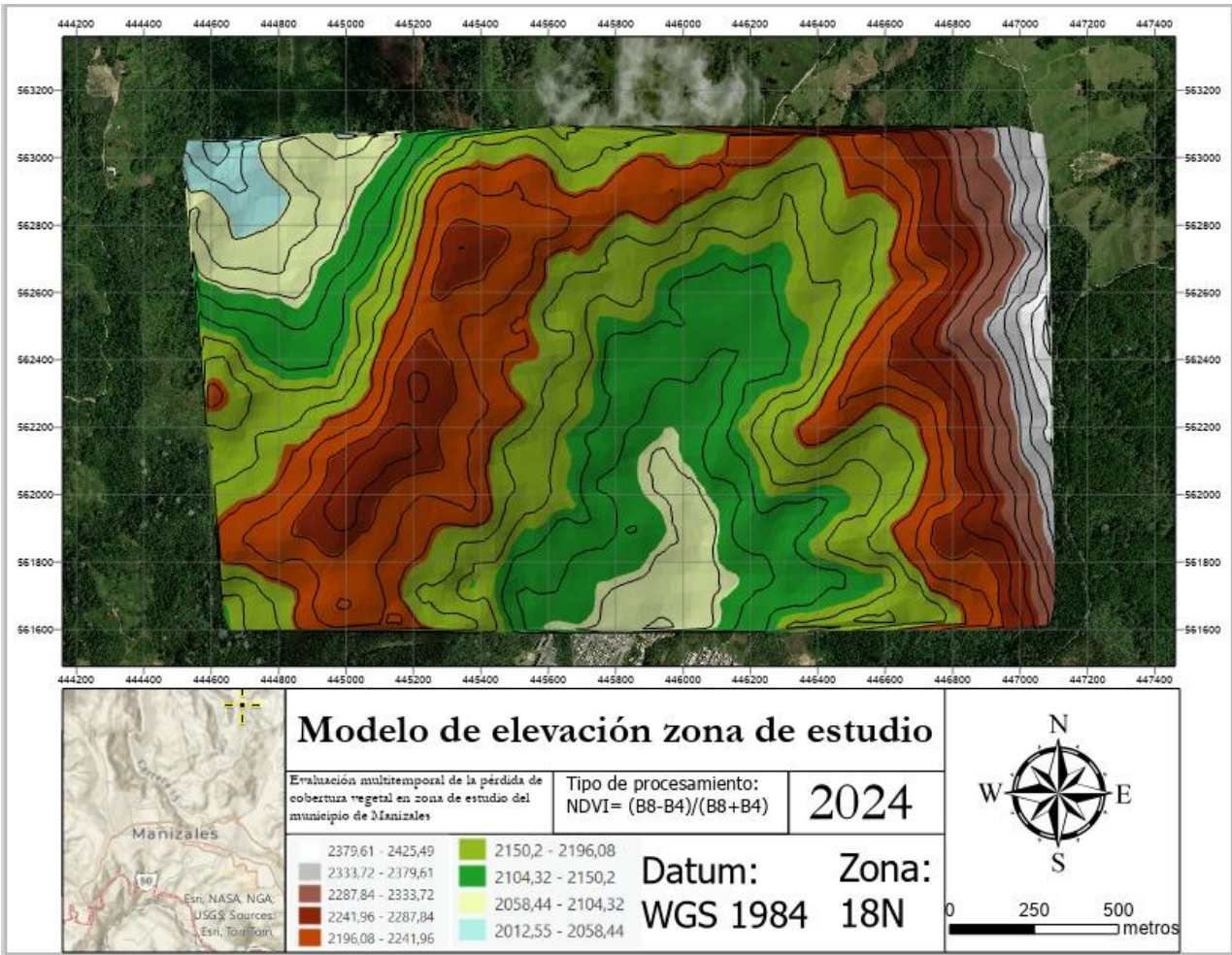
Con la información verificada, se procedió a generar el modelo TIN (Triangular Irregular Network) utilizando la herramienta 3D Analyst Tools → TIN Dataset → Create TIN. Este procedimiento permitió interpolar las alturas registradas en los puntos y construir una superficie tridimensional continua del terreno. El modelo resultante constituye una base fundamental para la derivación de productos secundarios relacionados con la topografía y finalmente, a partir del modelo

TIN se generaron las curvas de nivel mediante la herramienta Surface Contour, estableciendo intervalos de equidistancia acordes con la escala de trabajo. Este proceso permitió visualizar las variaciones altitudinales y definir de forma más clara las zonas altas, bajas y de pendiente pronunciada dentro del área de estudio.

El modelo de elevación digital (MDE) representa la variación altitudinal del terreno en la zona de estudio seleccionada en el municipio de Manizales. En la figura 16 se observan curvas de nivel generadas a partir de datos Ráster, las cuales permiten identificar con claridad los gradientes de elevación y la morfología del relieve.

Figura 16.

Modelo de elevación digital de la zona de estudio.



Fuente: elaboración propia.

El rango altitudinal oscila entre aproximadamente 2012,55 m y 2.379 m s.n.m., lo que evidencia una topografía moderadamente ondulada a fuertemente inclinada, característica de las laderas cafeteras del eje andino central.

Las zonas en tonos azul claro y color crema representan las áreas más bajas, mientras que las en tonos rojizos, grises y blancos indican sectores más elevados, que podrían corresponder a divisorias de aguas o zonas con mayor pendiente.

Este comportamiento altitudinal influye directamente en los procesos de escorrentía superficial, erosión del suelo y distribución de la vegetación, por lo que el MDE constituye una base fundamental para el análisis de acumulación de flujo y delimitación de microcuencas.

Además, la relación entre el relieve y la pérdida de cobertura vegetal puede explicar la mayor vulnerabilidad de las zonas con pendientes pronunciadas frente a procesos de deforestación o movimientos en masa.

En conjunto, este modelo de elevación permite establecer la estructura topográfica sobre la cual se desarrollan los ecosistemas y actividades humanas, siendo un insumo clave para el análisis espacial de la pérdida de vegetación nativa y para la modelación hidrológica de la zona.

8.2.2. Dirección y acumulación de flujo.

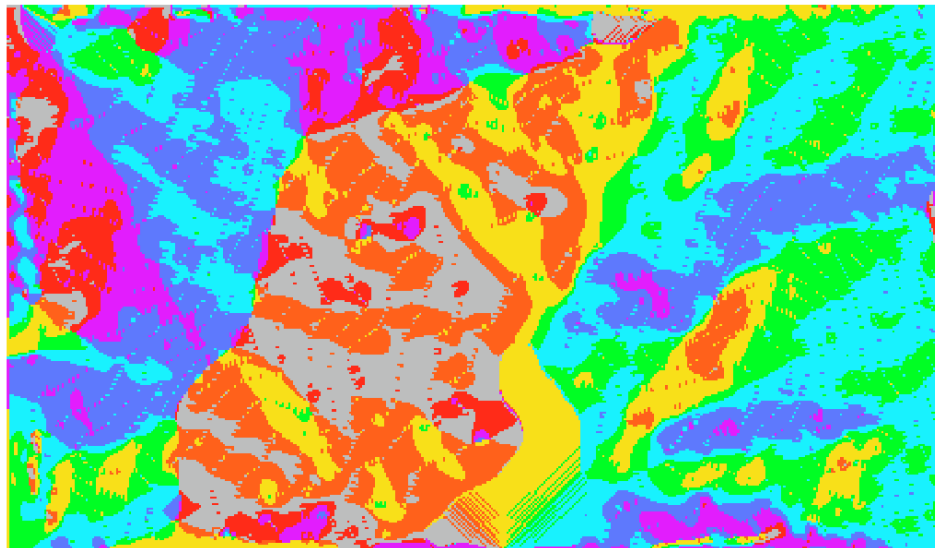
El método más comúnmente utilizado para calcular la dirección de flujo es el algoritmo D8, el cual considera ocho direcciones posibles de salida para cada celda dentro de una ventana de análisis ($n \times n$). A partir de la comparación de la celda central con sus celdas vecinas, el algoritmo asigna una dirección de drenaje que representa el camino que seguiría el flujo de agua desde los puntos más altos hacia los más bajos, permitiendo identificar la estructura general del drenaje superficial.

Tabla 1.*Codificación de la dirección de flujo.*

32	64	128
16	El valor que dé es la orientación	1
8	4	2

Fuente: elaboración propia.

En el desarrollo de esta investigación, para el cálculo de la dirección de flujo se realizó mediante la herramienta Flow Direction, disponible en la extensión Spatial Analyst Tools de ArcGIS Pro. Como dato de entrada se utilizó el Modelo Digital del Terreno (DTM) obtenido a partir del modelo TIN. Este proceso generó un ráster en el que cada celda almacena un valor que representa la dirección hacia la que el agua fluiría, constituyendo la base para el análisis posterior de acumulación de flujo y zonas de drenaje natural dentro del área de estudio como lo representa la figura 17.

Figura 17.*Dirección de flujo para la zona de estudio.*

Fuente: elaboración propia.

8.2.3. Acumulación de flujo

El cálculo de la acumulación de flujo constituye una etapa fundamental dentro del análisis hidrológico, ya que permite identificar las zonas hacia donde se concentra el escurrimiento superficial y, por ende, los posibles cauces o drenajes naturales.

El proceso se realizó en ArcGIS Pro utilizando la herramienta Flow Accumulation, disponible en el módulo Spatial Analyst → Hydrology. Para ello, se tomó como dato de entrada el ráster de dirección de flujo obtenido en el paso anterior. El resultado fue un nuevo ráster en el que los valores altos representan zonas de acumulación significativa de agua superficial.

En la figura 15 se presenta el producto final derivado de este análisis que permitió delimitar los cauces principales, identificar posibles cuencas de drenaje y modelar la red hídrica natural presente dentro de la zona de estudio, aportando información clave para la interpretación espacial de los procesos de esorrentía superficial y dinámica hídrica del terreno.

Figura 18.

Drenaje obtenido por la herramienta Flow Accumulation



Fuente: elaboración propia.

8.3. Análisis correlacional de los resultados de la variación de la vegetación respecto a los cambios antrópicos por el incremento de asentamientos humanos irregulares en la zona de estudio

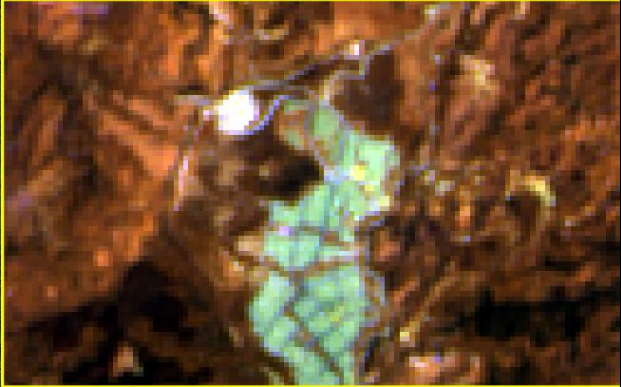
Para el cumplimiento del objetivo 3, orientado a evaluar la presencia de asentamientos en zonas de restricción severa y su relación con áreas ambientalmente sensibles, se desarrolló una metodología basada en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en la integración de información oficial del municipio de Manizales.

En una primera etapa, se realizó la búsqueda y descarga de información geoespacial desde el geoportal de datos abiertos de la Alcaldía de Manizales. Se seleccionaron los shapefiles correspondientes a bienes municipales, fajas forestales protectoras y zonas de amenaza por deslizamiento, por tratarse de capas fundamentales para la identificación de áreas protegidas, ocupación del suelo y condiciones de amenaza en la zona de estudio.

Posteriormente, los archivos fueron cargados en el software ArcGIS Pro, donde se realizaron los procesos de recorte espacial utilizando el polígono de la zona de estudio, con el fin de limitar el análisis únicamente al área de interés asociada al sector de la quebrada El Guamo.

Para la identificación de las zonas urbanizadas, se realizó un proceso de clasificación supervisada a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 correspondientes a los años 2020 y 2024. Previamente, se generó una combinación de bandas espectrales 12-11-8, la cual permitió diferenciar con mayor claridad las zonas urbanizadas respecto a las demás coberturas del suelo, al resaltar las superficies construidas en tonalidades contrastantes frente a la vegetación como se muestra en la figura 19.

Figura 19.
Composición de bandas (12 – 11 – 8) para imágenes Sentinel de los años 2020 y 2024

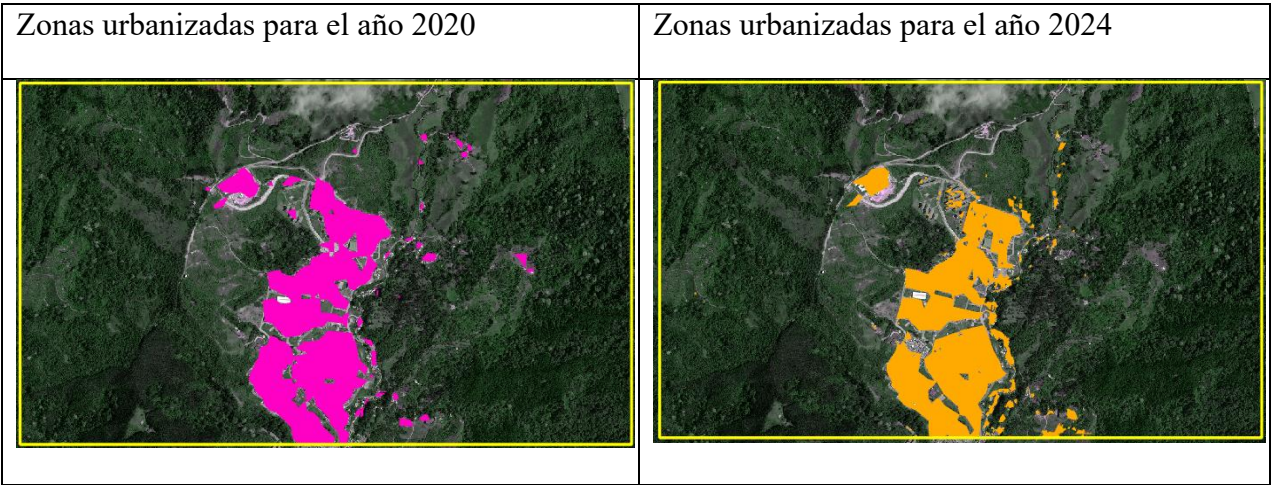
Composición de bandas para el año 2020	Composición de bandas para el año 2024
	

Fuente: elaboración propia.

Con base en esta combinación, se definieron zonas de entrenamiento correspondientes únicamente a la clase “zonas urbanizadas” para cada año de análisis. A partir de estas muestras se generaron las firmas espectrales, las cuales sirvieron como insumo para la aplicación del algoritmo de clasificación supervisada Maximum Likelihood. El resultado fue un raster temático que representó exclusivamente las áreas urbanizadas dentro de la zona de estudio para los años 2020 y 2024; posteriormente, los resultados de la clasificación fueron sometidos a un proceso de poligonización, con el fin de obtener las áreas construidas en formato vectorial y permitir su cuantificación espacial.

Figura 20.

Zonas urbanizadas para los años 2020 y 2024



Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidas las zonas urbanizadas, se realizó la superposición espacial con las capas de fajas forestales protectoras y zonas de amenaza por deslizamiento. De acuerdo con la normatividad vigente, las fajas forestales protectoras son áreas de protección ambiental definidas por el Decreto 1449 de 1977 y compiladas en el Decreto 1076 de 2015, donde se restringe cualquier tipo de asentamiento humano para garantizar la protección hídrica y edáfica. Asimismo, las zonas de amenaza alta y media por movimientos en masa, reguladas por la Ley 1523 de 2012 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, corresponden a áreas con limitaciones para la ocupación debido a su susceptibilidad a fenómenos naturales.

Bajo estos criterios normativos, se identificaron como asentamientos en zonas de restricción severa aquellas áreas urbanizadas que se superponen espacialmente con fajas forestales protectoras o zonas clasificadas con amenaza alta y media por deslizamientos, lo que permitió evaluar la ocupación antrópica en territorios ambientalmente sensibles dentro de la zona de estudio.

9. Resultados

A partir del modelo de elevación digital (DTM) generado para la zona de estudio, se desarrollaron los análisis de dirección y acumulación de flujo, los cuales permitieron comprender el comportamiento del relieve y los patrones de drenaje superficial. El DTM constituye la base topográfica que refleja la morfología del terreno, sobre la cual se calculó la dirección del flujo mediante el algoritmo D8, identificando así las trayectorias potenciales del escurrimiento superficial.

Posteriormente, con el uso de la herramienta Flow Accumulation, se obtuvo el ráster de acumulación de flujo, que muestra las áreas donde se concentra el drenaje natural. Este proceso permitió reconocer los cauces principales, microcuencas y zonas con mayor propensión a la acumulación de agua, información fundamental para interpretar la dinámica hídrica del sector.

Al integrar estos resultados con el análisis de cobertura vegetal, se identificaron áreas donde la pérdida de vegetación nativa coincide con zonas de alta acumulación de flujo, lo que sugiere posibles procesos de erosión, compactación del suelo o alteración del drenaje natural por expansión urbana o asentamientos informales.

En conjunto, este análisis hidromorfológico fortaleció la comprensión de los procesos ambientales del territorio, permitiendo un enfoque integral que combina la topografía, la hidrología y la dinámica de cobertura vegetal.

9.1. Analizar la variación de la cobertura vegetal en el área de estudio mediante índices espectrales y técnica de clasificación supervisada

9.1.1. Clasificación de coberturas de vegetación de las imágenes de satélite (2020 – 2024)

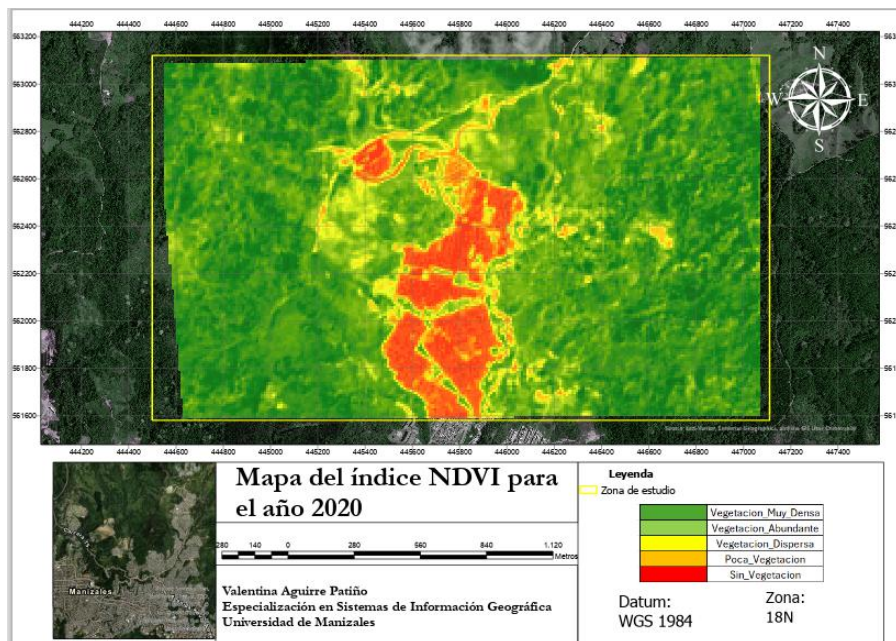
La clasificación supervisada de las imágenes Sentinel-2 permitió diferenciar cinco categorías de cobertura vegetal como: vegetación muy densa, abundante, dispersa, poca y sin vegetación.

Para el año 2020, la clasificación de las imágenes evidenció que predominan la vegetación muy densa y abundante en amplias zonas del área de estudio; para el año 2024, aunque en las imágenes ráster persiste la dominancia de estas dos coberturas, se evidencia una reducción en las áreas clasificadas como vegetación muy densa y un incremento en vegetación dispersa y en áreas sin vegetación.

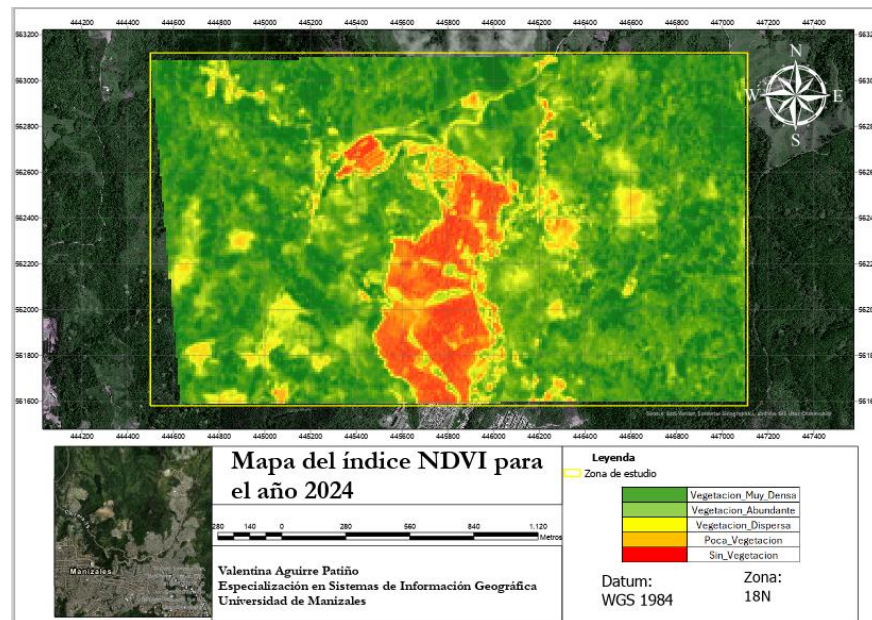
Estos resultados están representados en las figuras 22 y 23 y muestran claramente una tendencia hacia la fragmentación y pérdida de cobertura vegetal, asociada a procesos de transformación del suelo.

Figura 21.

Mapa índice NDVI para el año 2020.



Fuente: elaboración propia.

Figura 22.*Mapa índice NDVI para el año 2024.**Fuente: elaboración propia.*

9.1.1.1. Cuantificación de las coberturas

El análisis de áreas permitió determinar la extensión ocupada por cada clase de vegetación en los dos periodos:

- Para el 2020, la vegetación muy densa y abundante representaban la mayor proporción del área total.
- Para el 2024, se evidencia una disminución de estas coberturas, acompañada de un incremento en las categorías de poca y sin vegetación.

Tabla 2.*Áreas clasificadas 2020*

2020		
No°	Clase	Ha
1	Poca_Vegetación	13,916386
2	Sin_Vegetación	26,677519
3	Vegetación_Abundante	116,068265
4	Vegetación_Dispersa	20,068840
5	Vegetación_Muy_Densa	199,214405

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.*Áreas clasificadas 2024*

2024		
No°	Clase	Ha
1	Poca_Vegetación	19,061512
2	Sin_Vegetación	30,400545
3	Vegetación_Abundante	157,710882
4	Vegetación_Dispersa	37,505802
5	Vegetación_Muy_Densa	137,216744

Fuente: elaboración propia.

Esta cuantificación refleja un proceso de degradación progresiva de la cobertura vegetal.

9.1.1.2. Comparación entre coberturas (2020 vs 2024)

El análisis evidencia cambios significativos en la cobertura vegetal:

- Vegetación muy densa: pasó de 199,21 hectáreas en 2020 a 137,22 hectáreas en 2024, con una pérdida de 62 hectáreas.
- Vegetación abundante: aumentó de 116,07 hectáreas a 157,7 hectáreas, lo que representa una ganancia de 41,64 hectáreas.
- Vegetación dispersa: pasó de 20,07 hectáreas a 37,51 hectáreas, con un incremento de 17,44 hectáreas.
- Poca vegetación: aumentó de 13,92 hectáreas a 19,06 hectáreas.
- Sin vegetación: se incrementó 3,73 hectáreas pasando de 26,68 hectáreas a 30,40 hectáreas.

Tabla 4. *Tendencia de aumento o disminución por cobertura.*

Clase	2020 (ha)	2024 (ha)	Variación (ha)	Tendencia
Poca vegetación	13,92	19,06	+5,15	Aumento
Sin vegetación	26,68	30,40	+3,73	Aumento
Vegetación abundante	116,07	157,71	+41,64	Aumento
Vegetación dispersa	20,07	37,51	+17,44	Aumento
Vegetación muy densa	199,21	137,22	-62	Disminución

Fuente: elaboración propia.

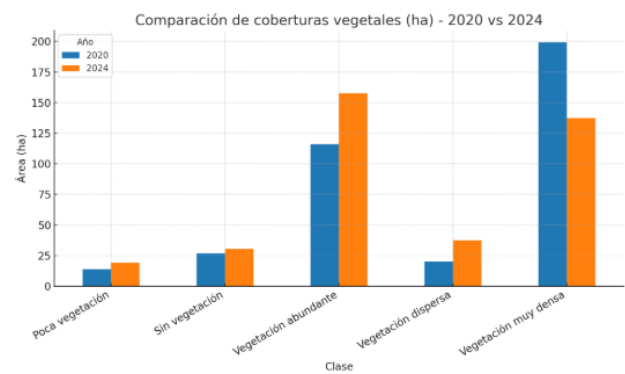
Los resultados muestran una pérdida de coberturas de vegetación muy densa y una transición hacia clases menos compactas como vegetación abundante y vegetación dispersa. Asimismo, se incrementan las áreas clasificadas como poca vegetación y sin vegetación, lo que sugiere procesos de degradación y fragmentación de la cobertura vegetal.

A continuación, se obtuvieron dos gráficos, el primero llamado gráfico comparativo 2020 vs 2024 se observa como cambió cada clase de cobertura vegetal en hectáreas, el segundo gráfico de variación se muestra el incremento en verde y la disminución en rojo de área en cada clase.

La pérdida de vegetación densa y el aumento de áreas sin cobertura comprometen los servicios ecosistémicos, la conectividad ecológica y la resiliencia del territorio frente a fenómenos de riesgo.

En este sentido, los resultados constituyen un insumo valioso para la planificación territorial y la definición de estrategias de gestión ambiental orientadas a la conservación de la vegetación nativa.

Gráfico 1.
Comparación de coberturas (2020 vs 2024).



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 2.
Variación de coberturas entre 2020 y 2024.



Fuente: elaboración propia.

9.1.2. Validación de la clasificación por medio de la matriz de confusión

La precisión de las clasificaciones fue evaluada mediante matrices de confusión e índice Kappa:

Para el año 2020 se tuvo una exactitud global del 93,6%

Para el año 2024 una exactitud global del 92,4%

Figura 23. Matriz de confusión para los años 2020 y 2024.

2020	RASTER VALU	Vegetación_Muy_Densa	Vegetación_Abundante	Vegetación_Dispersa	Poca_Vegetación	Sin_Vegetación	Total	Porcentaje
	Vegetación_Muy_Densa	50	4	0	0	0	54	92,6
	Vegetación_Abundante	0	46	3	0	0	49	93,9
	Vegetación_Dispersa	0	0	47	3	0	50	94
	Poca_Vegetación	0	0	0	47	6	53	88,7
	Sin_Vegetación	0	0	0	0	44	44	100
	Total	50	50	50	50	50	250	93,60%
2024	RASTER VALU	Vegetación_Muy_Densa	Vegetación_Abundante	Vegetación_Dispersa	Poca_Vegetación	Sin_Vegetación	Total	Porcentaje
	Vegetación_Muy_Densa	50	1	0	0	0	51	98
	Vegetación_Abundante	0	45	0	0	0	45	100
	Vegetación_Dispersa	0	4	48	48	1	53	90,6
	Poca_Vegetación	0	0	2	2	45	54	83,3
	Sin_Vegetación	0	0	0	0	4	47	91,5
	Total	50	50	50	50	50	250	92,40%

Fuente: elaboración propia.

Ambos resultados indican una muy buena concordancia entre la clasificación y la realidad de campo, lo que respalda la confiabilidad de las coberturas generadas.

La exactitud global disminuyó ligeramente en un 1,2% lo que indica que la clasificación en el año 2020 fue un poco más precisa en términos generales.

En ambos años, la clase mejor clasificada fueron vegetación densa y vegetación abundante, las categorías con mayor dificultad fueron poca vegetación y sin vegetación, debido a la similitud espectral en las zonas de transición.

9.2. Determinar los patrones de dirección y acumulación de flujo superficial en el área de estudio con el fin de analizar su relación con la dinámica de escorrentía.

9.2.1. Dirección de flujo de la zona de estudio

El análisis de la dirección de flujo superficial, derivado del Modelo Digital de Elevación (MDE), permitió identificar la organización espacial del drenaje y el comportamiento preferencial de la esorrentía en el área de estudio. Los resultados evidencian un patrón de flujo claramente condicionado por la topografía, en el cual el desplazamiento del agua superficial responde a gradientes altitudinales bien definidos desde las zonas altas periféricas hacia los sectores más bajos del territorio como se representa en la figura 24.

Figura 24.

Mapa de dirección de flujo de la zona de estudio.



Fuente: elaboración propia.

El análisis de la dirección de flujo superficial, derivado del Modelo Digital de Elevación (MDE), permitió identificar la organización espacial del drenaje y el comportamiento preferencial de la esorrentía en el área de estudio. Los resultados evidencian un patrón de flujo claramente condicionado por la topografía, en el cual el desplazamiento del agua superficial responde a

gradientes altitudinales bien definidos desde las zonas altas periféricas hacia los sectores más bajos del territorio.

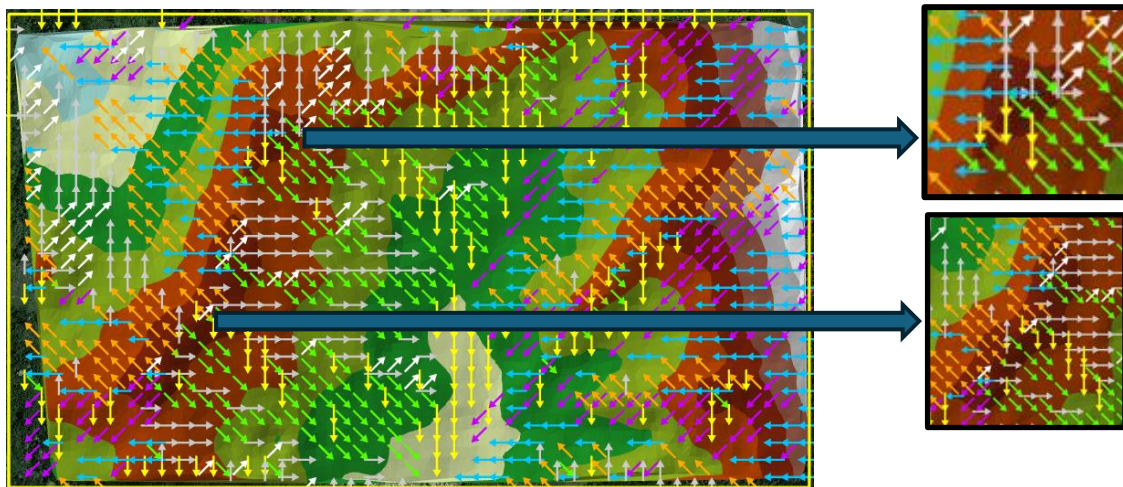
De manera general, se identifica una tendencia dominante del flujo hacia el eje central de la microcuenca, siguiendo la traza natural del sistema de drenaje asociado a la quebrada El Guamo. Este patrón indica que gran parte del escurrimiento superficial generado en las laderas circundantes converge progresivamente hacia este cauce principal, configurándolo como el principal receptor de aguas superficiales dentro del área analizada.

Las zonas donde se observa una mayor concentración y alineación de vectores de flujo corresponden a sectores de convergencia hídrica, los cuales representan corredores naturales de escorrentía y acumulación de agua. Estas áreas coinciden con fondos de valle, talwegs y sectores de pendiente moderada a baja, donde el flujo superficial tiende a concentrarse y a incrementar su energía hidráulica, favoreciendo procesos de erosión, transporte de sedimentos y socavamiento de orillas.

En contraste, las áreas donde los vectores de flujo presentan una mayor dispersión corresponden a divisorias topográficas y zonas de mayor elevación relativa, las cuales actúan como áreas generadoras de escorrentía como se observa en la figura 25.

Figura 25

Zonas de dispersión de flujo



Fuente: elaboración propia.

El modelo de acumulación de flujo refuerza esta interpretación al mostrar que los mayores valores de acumulación se concentran a lo largo del cauce principal y sus tributarios, evidenciando una jerarquización del drenaje y una dependencia directa entre la morfología del terreno y la dinámica hidrológica. Este comportamiento que se representa en la figura 26, resulta clave para comprender la distribución espacial de la escorrentía superficial y su papel en la configuración de áreas ambientalmente sensibles dentro de la zona de estudio.

Figura 26.

Mapa de drenajes naturales en la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

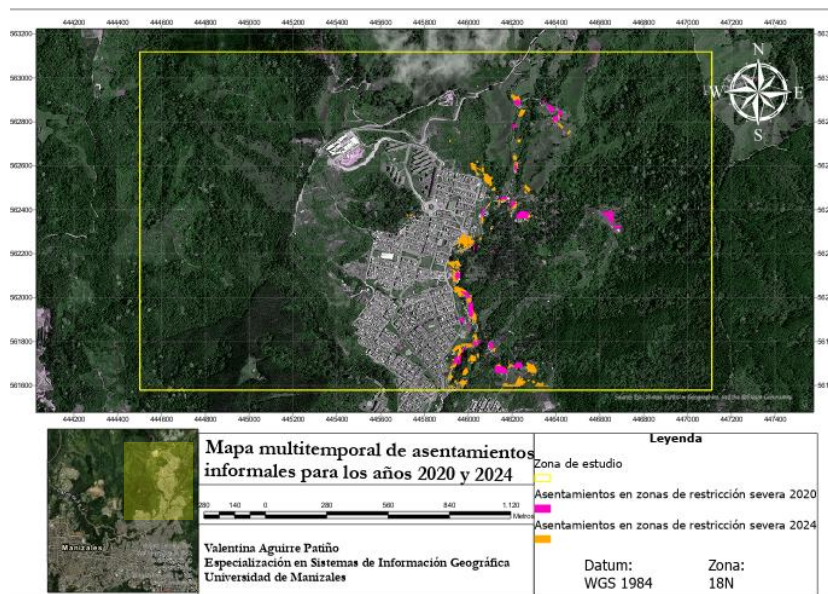
En conjunto, los patrones identificados permiten establecer una base hidrológica sólida para analizar la interacción entre escorrentía, cobertura vegetal y ocupación del territorio, aportando insumos fundamentales para la gestión del riesgo, el ordenamiento ambiental y la planificación de intervenciones orientadas a la conservación de la microcuenca.

9.3. Análisis correlacional de los resultados de la variación de la vegetación respecto a los cambios antrópicos por el incremento de asentamientos humanos irregulares en la zona de estudio

El análisis espacial integrado de los asentamientos en zonas de restricción severa, las fajas forestales protectoras, las zonas de amenaza por deslizamiento y la dinámica hidrológica del territorio evidencia una condición de alta fragilidad ambiental y riesgo en la zona de estudio, particularmente en el entorno de la quebrada El Guamo. La superposición de estas variables permite identificar patrones espaciales consistentes que revelan una interacción crítica entre factores naturales y antrópicos.

Los resultados muestran que los asentamientos informales han experimentado una expansión significativa entre los años 2020 y 2024. En el año 2020, la superficie ocupada por asentamientos en zonas de restricción severa correspondía a 1,44 hectáreas, mientras que para el año 2024 esta área aumentó hasta 3,25 hectáreas, lo que representa un incremento absoluto de 1,81 hectáreas y un crecimiento aproximado del 44,3% en un periodo de cuatro años como se representa en la figura 26. Esta dinámica confirma una acelerada expansión de la ocupación informal en el sector analizado.

Figura 27. Mapa multitemporal de asentamientos informales para los años 2020 y 2024



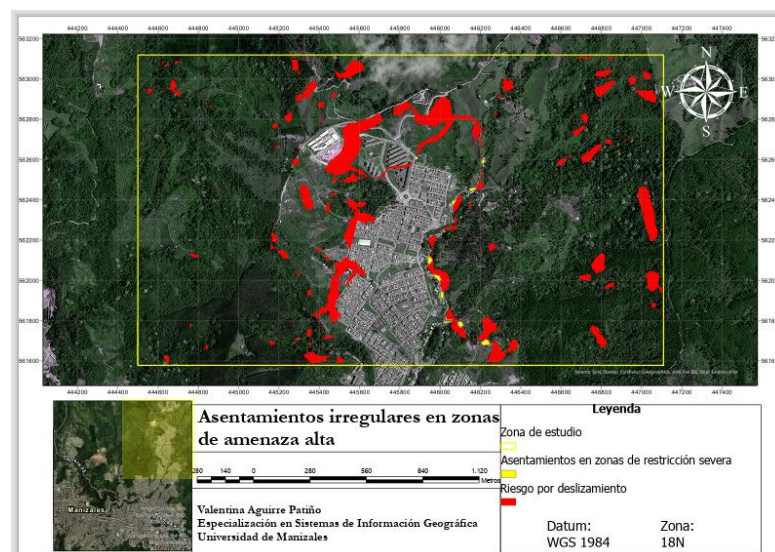
Fuente: elaboración propia

Desde el punto de vista espacial, estos asentamientos no solo se superponen parcialmente a las fajas forestales protectoras, cuya extensión total es de 91,27 hectáreas, sino que además se localizan mayoritariamente en zonas clasificadas como de amenaza alta y media por deslizamiento, de acuerdo con la cartografía oficial de riesgos del municipio de Manizales. Esta coincidencia espacial confirma que los procesos de ocupación irregular se están desarrollando sobre áreas que presentan condiciones geomorfológicas y geotécnicas desfavorables para la urbanización.

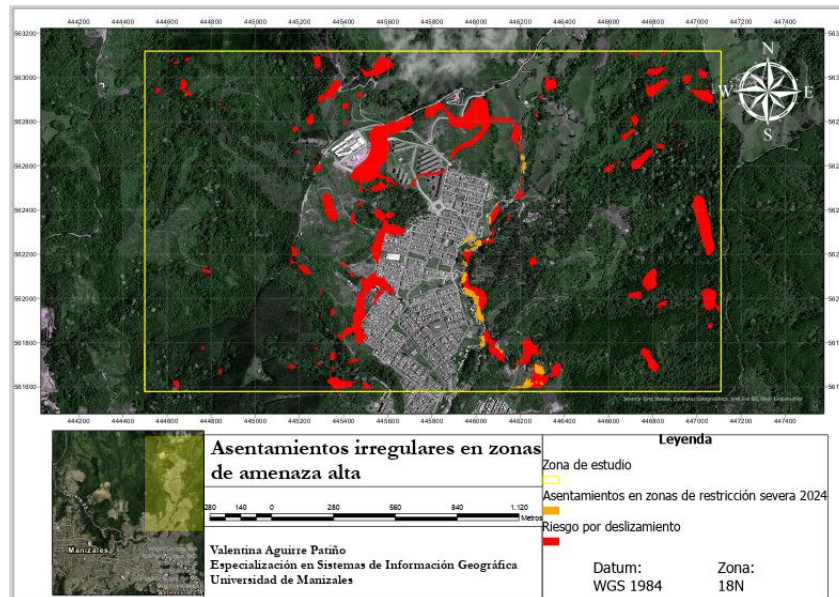
El análisis estadístico evidencia que, en el año 2020, 0,46 hectáreas de asentamientos informales se encontraban dentro de zonas de amenaza alta, lo que corresponde aproximadamente al 32 % del total de asentamientos existentes en ese año como se representa en la figura 27. Esta superficie representa cerca del 2,06 % de las 22,37 hectáreas clasificadas como amenaza alta en el área de estudio. En la figura 28 para el año 2024, se representa que la superficie de asentamientos informales localizada en zonas de amenaza alta aumentó a 1,421 hectáreas, equivalente al 29,5 % del total de asentamientos informales identificados. Aunque el porcentaje relativo disminuye frente a 2020, el incremento absoluto de 1,01 hectáreas dentro de zonas de amenaza alta evidencia una presión creciente sobre territorios con restricciones severas de ocupación, representando aproximadamente el 6,24 % del total de estas áreas de alto riesgo.

Figura 28.

Asentamientos irregulares en zona de amenaza alta para el 2020



Fuente: elaboración propi

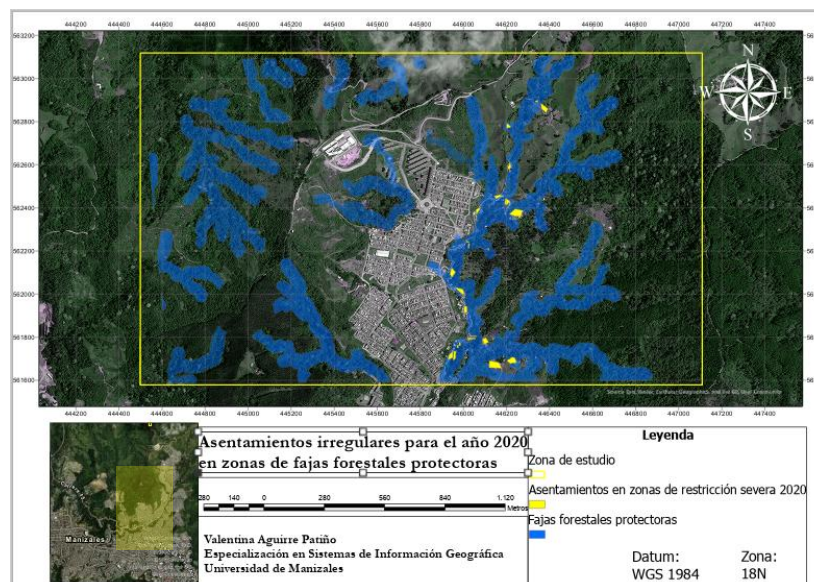
Figura 29.*Asentamientos irregulares en zona de amenaza alta para el año 2024*

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las fajas forestales protectoras, en las figuras 29 y 30 se representan para los años 2020 y 2024 los asentamientos irregulares que invaden dichas fajas en territorio, si bien su extensión total permanece constante, la relación porcentual con los asentamientos informales evidencia una afectación progresiva. En el año 2020, los asentamientos informales representaban cerca del 1,16 % del área total de las fajas forestales evidenciado en la figura 23, mientras que en 2024 esta proporción aumentó hasta aproximadamente el 3,22% como lo muestra la figura 24, lo que indica una pérdida funcional significativa de espacios destinados a la protección hídrica, la estabilidad de laderas y la conservación ecosistémica.

Figura 30.

Asentamientos informales ubicados en fajas forestales protectoras para el 2020.

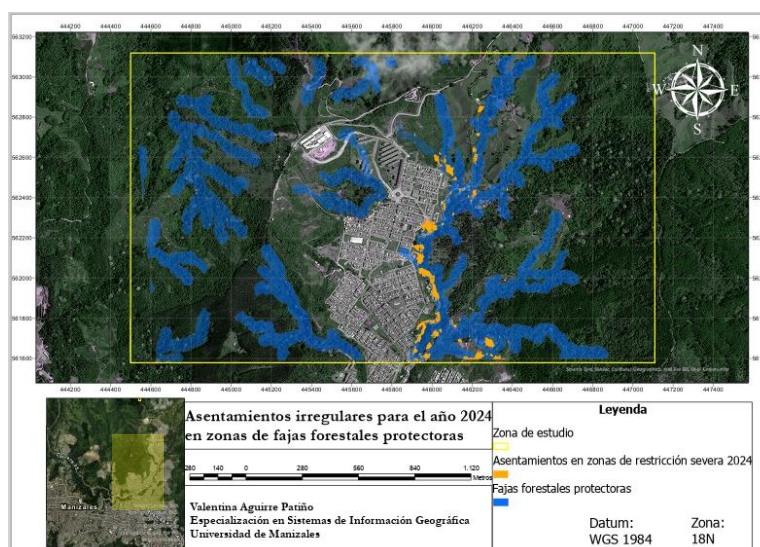


Nota: La capa de fajas forestales protectoras fue tomada del Geoportal de la Alcaldía de Manizales

Fuente: elaboración propia.

Figura 31.

Asentamientos informales ubicados en fajas forestales protectoras en el 2024.



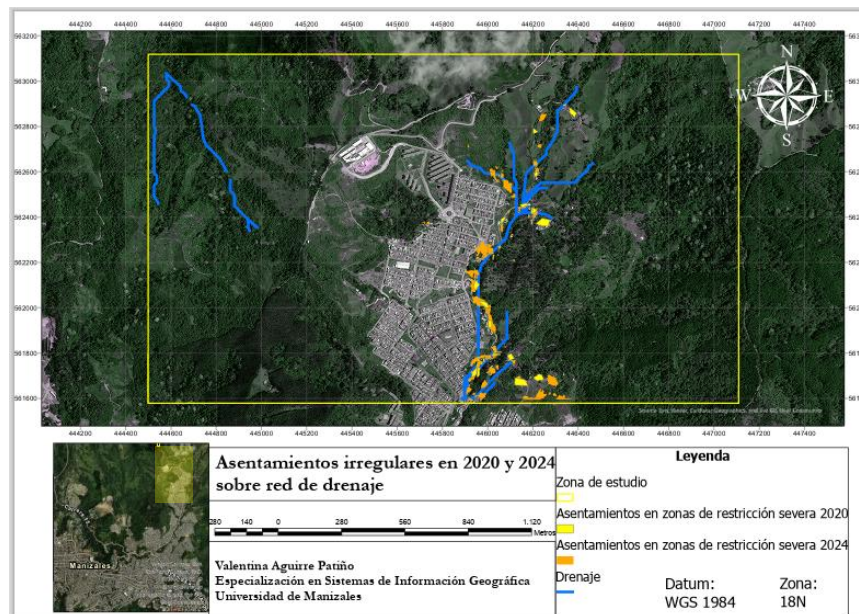
Nota: La capa de fajas forestales protectoras fue tomada del Geoportal de la Alcaldía de Manizales

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, el análisis de acumulación de flujo indica que las mayores concentraciones de escorrentía superficial se presentan precisamente en los sectores donde se ubican los asentamientos irregulares, coincidiendo con el trazado de la quebrada principal El Guamo como se muestra en la figura 31. Esta situación incrementa la susceptibilidad a procesos de inundación súbita, socavamiento de orillas y desestabilización de taludes, especialmente durante eventos de alta precipitación, característicos del régimen climático de Manizales.

Figura 32.

Mapa multitemporal de asentamientos informales ubicados sobre la red de drenaje



Fuente: elaboración propia

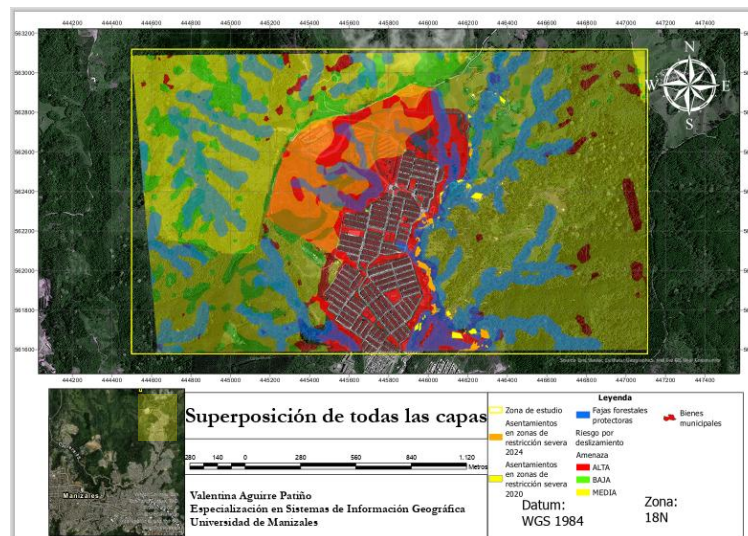
Estos resultados son coherentes con la información consignada en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Manizales, el cual clasifica el sector de El Guamo como un área de amenaza alta, asociada a la presencia de llanuras de inundación, depósitos aluviales recientes y flujos de escombros. El POT identifica además la ocurrencia de procesos activos de socavamiento de orillas, definidos como el desgaste progresivo de los márgenes de la quebrada por la acción hidráulica, lo que genera pérdida de soporte basal, formación de taludes inestables y la ocurrencia posterior de deslizamientos.

Desde el punto de vista de la vulnerabilidad geológica, el territorio está conformado por materiales correspondientes a la Formación Quebrada Grande, depósitos aluviales y cenizas volcánicas, los cuales presentan baja cohesión y alta susceptibilidad a procesos de reptación, erosión laminar y deslizamientos traslacionales. La eliminación progresiva de la cobertura vegetal, evidenciada en el análisis multitemporal del NDVI, actúa como un factor agravante que reduce la capacidad de estabilización del suelo, incrementa la escorrentía superficial y eleva la probabilidad de represamientos y afectaciones directas a las viviendas localizadas en las márgenes de la quebrada.

El mapa de superposición espacial que se representa en la figura 32, permite comprender de forma integrada la configuración territorial del área de estudio, evidenciando cómo los distintos componentes físicos y normativos convergen en un mismo espacio. La disposición de los asentamientos informales en relación con los bienes municipales, las zonas de amenaza y la red de drenaje revela un patrón de ocupación estrechamente condicionado por la estructura ambiental del territorio. La lectura cartográfica muestra que los asentamientos se desarrollan siguiendo el corredor hídrico principal, lo que sugiere una relación directa entre la ocupación informal del suelo y los ejes naturales de escorrentía.

Figura 33.

Mapa de superposiciones.



Nota: Las capas de bienes municipales y zonas de riesgo fueron tomadas del Geoportal de la Alcaldía de Manizales

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, la coexistencia de bienes municipales y asentamientos irregulares en zonas de amenaza pone de manifiesto tensiones entre la planificación del suelo, la gestión del riesgo y la dinámica real de ocupación, evidenciando vacíos en el control y seguimiento del territorio. Desde una perspectiva espacial, los resultados confirman que la problemática no responde a un elemento aislado, sino a la convergencia de múltiples variables que se refuerzan entre sí.

En conjunto, los resultados permiten establecer que la expansión de asentamientos humanos informales, la ocupación de fajas forestales protectoras, la localización en zonas de amenaza alta y media, y la concentración de flujos hídricos en el eje de la quebrada El Guamo conforman un sistema interrelacionado que incrementa significativamente el riesgo ambiental y social en la zona de estudio. Esta integración cartográfica y estadística constituye una herramienta clave para la interpretación del riesgo y la priorización de áreas críticas, reforzando la necesidad de fortalecer las estrategias de ordenamiento territorial, control de ocupaciones ilegales, gestión del riesgo y restauración ecológica en sectores de alta sensibilidad ambiental del municipio de Manizales.

Análisis correlacional de Pearson.

Promedio de vegetación

$$\bar{x} = \frac{199,21 + 137,21}{2}$$

$$\bar{x} = \frac{336,42}{2} = 168,21$$

Promedio de ocupación

$$\bar{y} = \frac{1,44 + 3,25}{2}$$

$$\bar{y} = \frac{4,69}{2} = 2,345$$

Resta de los promedios a cada valor

<i>Año</i>	x	$x-\bar{x}$	y	$y-\bar{y}$
2020	199,21	$199,21-168,21=31$	1,44	$1,44-2,345=-0,905$
2024	137,21	$137,21-168,21=-31$	3,25	$3,25-2,345=0,905$

Multiplicar las diferencias

<i>Año</i>	$(x-\bar{x})$	$(y-\bar{y})$	<i>Producto</i>
2020	31,00	-0,95	-28,055
2024	-31,00	0,95	-28,055

Suma de productos

$$\sum (xi - \bar{x})(yi - \bar{y}) = -28,055 + (-28,055) = -56,11$$

Calcular los cuadraos de las diferencias

<i>Año</i>	$(x-\bar{x})$	$(x-\bar{x})^2$
2020	31,00	961
2024	-31,00	961

$$\sum (xi - \bar{x})^2 = 961 + 961 = 1922$$

<i>Año</i>	$(y-\bar{y})$	$(y-\bar{y})^2$
2020	-0,95	0,819
2024	0,95	0,819

$$\sum (yi - \bar{y})^2 = 0,819 + 0,819 = 1,638$$

Sustituir la fórmula

$$\bar{r} = \frac{-56,11}{\sqrt{1922} * \sqrt{1,638}} = 56,11 = -1,00$$

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre la cobertura de vegetación muy densa y la ocupación irregular para los años 2020 y 2024, con el fin de identificar la relación entre ambas variables en el tiempo.

Los resultados evidencian una correlación negativa perfecta ($r = -1,0$), lo que indica una relación inversa entre las variables: a medida que disminuye la cobertura vegetal, aumenta la ocupación irregular. Este comportamiento confirma la tendencia espacial observada en los análisis multitemporales, donde las áreas con pérdida de vegetación coinciden con sectores que presentan expansión de asentamientos.

Este resultado cuantitativo respalda la interpretación espacial obtenida a partir del NDVI y de la clasificación supervisada, evidenciando que la transformación de la cobertura vegetal está asociada a procesos de ocupación en zonas ambientalmente restringidas.

10. Discusión

Los resultados obtenidos permiten interpretar la dinámica de la cobertura vegetal en la zona de estudio a partir de los tres objetivos planteados, integrando el análisis multitemporal, la modelación hidrológica y la identificación de asentamientos en zonas de restricción severa.

En relación con el objetivo específico 1, orientado a evaluar la variación de la cobertura vegetal, los resultados evidencian una reducción progresiva de áreas con vegetación en los sectores donde se presentan asentamientos en zonas de restricción severa. Este comportamiento es consistente con los patrones identificados a escala global y regional por Janampa Torres y Ponce Cristóbal (2022), Luna Condori et al. (2018) y Jiménez Gómez y Moreno Rojas (2025), quienes demuestran que la transformación acelerada de la cobertura vegetal está asociada a procesos de ocupación no planificada, especialmente en territorios con alta fragilidad ecológica. En este sentido, la dinámica observada en Manizales refleja procesos similares a los reportados en otras ciudades andinas, donde la presión urbana sobre áreas de ladera ha generado transformaciones sostenidas del paisaje.

En cuanto al objetivo específico 2, enfocado en la dinámica de escorrentía superficial, el análisis de dirección y acumulación de flujo permitió identificar que las mayores concentraciones de escorrentía coinciden espacialmente con las zonas donde se ha reducido la cobertura vegetal y se han establecido asentamientos en áreas de restricción severa. Estos resultados sugieren una relación espacial entre la pérdida de vegetación y el comportamiento hidrológico superficial del terreno. Sin embargo, es importante precisar que el estudio se basó en modelos digitales de elevación y análisis de flujo potencial, por lo que no se midieron variables hidrológicas reales como caudales, infiltración o eventos de inundación.

Desde una perspectiva ecológica, la disminución de la cobertura vegetal en estas zonas podría afectar potencialmente la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con la regulación hídrica, el control de la erosión y la estabilidad de laderas, tal como lo señalan Revilla (2016) y Álvarez del Castillo (2013) para ecosistemas andinos. No obstante, en el presente estudio estos efectos no fueron medidos directamente, por lo que los resultados deben interpretarse como una

aproximación espacial a condiciones que podrían incrementar la susceptibilidad ambiental, y no como una verificación de impactos físicos específicos.

Respecto al objetivo específico 3, orientado a relacionar la pérdida de cobertura vegetal con la presencia de asentamientos en zonas de restricción severa, la clasificación supervisada permitió identificar áreas urbanizadas que se superponen con fajas forestales protectoras y zonas de amenaza alta y media. Esta situación coincide con lo reportado por Murillo Malaver (2022), quien relaciona la conversión de coberturas naturales hacia usos residenciales con factores socioeconómicos, debilidades institucionales y limitaciones en el acceso a vivienda formal. Esto indica que la problemática identificada no responde únicamente a procesos ambientales, sino a dinámicas sociales, económicas y de planificación territorial.

La interpretación de los resultados también encuentra respaldo en fuentes locales. La nota periodística del diario La Patria, titulada “Invaden otra vez la antigua vía al Alto del Guamo”, documenta la reocupación de terrenos en este sector, evidenciando la persistencia de asentamientos en áreas ambientalmente frágiles y reconocidas como zonas de riesgo. Este reporte coincide temporal y espacialmente con la expansión de áreas construidas identificadas mediante el análisis SIG, lo que refuerza la interpretación de los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de técnicas de teledetección y análisis multitemporal resultó fundamental para la identificación de tendencias espaciales y temporales de cambio, lo cual reafirma lo propuesto por Palacios Bermúdez (2015) sobre la utilidad de estos métodos para el monitoreo del paisaje. La integración de imágenes satelitales de diferentes fechas permitió cuantificar la variación de la cobertura vegetal y localizar espacialmente las zonas urbanizadas dentro de áreas de restricción severa.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados:

- El análisis de cobertura vegetal se basó en imágenes satelitales de dos fechas específicas (2020 y 2024), por lo que no se evaluaron cambios interanuales o estacionales.

- El índice NDVI y la clasificación supervisada permiten identificar variaciones de vegetación, pero no determinan directamente procesos de degradación del suelo, erosión o pérdida de biodiversidad.
- El análisis hidrológico se fundamentó en modelos digitales de elevación, sin mediciones de campo de caudales, infiltración o eventos de deslizamiento.
- La clasificación de zonas urbanizadas depende de la resolución espacial de las imágenes Sentinel-2 (10 m), lo que puede limitar la detección de construcciones pequeñas o dispersas.

11. Conclusiones

El análisis multitemporal del índice NDVI permitió identificar variaciones en la cobertura vegetal del sector El Guamo entre los años evaluados, evidenciando una reducción progresiva de áreas con valores altos de vegetación. Estos cambios se concentraron principalmente en zonas cercanas a la quebrada y en áreas que actualmente presentan ocupación antrópica, lo que indica un proceso de transformación del suelo asociado a dinámicas de ocupación.

La modelación de acumulación de flujo permitió reconocer las principales rutas de escorrentía superficial dentro del área de estudio, destacando concentraciones de flujo en sectores coincidentes con las zonas ocupadas. Este resultado confirma que parte de los asentamientos se localizan en áreas donde se concentra la escorrentía, lo que implica condiciones físicas desfavorables para la ocupación y una mayor exposición a procesos asociados al agua superficial.

La integración espacial de los resultados del NDVI y del análisis hidrológico permitió establecer que la pérdida de cobertura vegetal y la presencia de asentamientos se superponen con zonas de concentración de flujo. Esta relación espacial evidencia que la ocupación se ha desarrollado en áreas con restricciones severas desde el punto de vista ambiental, lo cual coincide con las condiciones de riesgo identificadas en los instrumentos de ordenamiento territorial.

Los resultados obtenidos constituyen insumos técnicos que permiten reconocer patrones de transformación del suelo y su relación con la ocupación en zonas ambientalmente restringidas. Esta información puede apoyar procesos de planificación territorial, gestión del riesgo y toma de decisiones orientadas a la protección de áreas estratégicas y a la regulación del uso del suelo.

12. Recomendaciones

- Implementar un sistema integral de monitoreo ambiental basado en SIG y sensores remotos.

Es recomendable consolidar un programa de monitoreo que integre imágenes satélite multitemporales con el fin de identificar de manera temprana procesos de deforestación, pérdida de vegetación y dinámicas erosivas. La adopción de metodologías automatizadas de detección de cambios contribuirá a una gestión preventiva y al fortalecimiento de la vigilancia ambiental.

- Fortalecer los procesos de control sobre ocupaciones ilegales.

Es fundamental intensificar visitas técnicas, procesos sancionatorios y acciones preventivas para impedir la expansión de construcciones sin licencia, especialmente en áreas con riesgo de erosión o funciones ecosistémicas estratégicas.

- Promover la restauración ecológica en zonas degradadas.

Dado el impacto sobre la vegetación natural, se recomienda diseñar e implementar planes de restauración basados en especies locales, priorizando áreas con erosión supervicial, socavamiento de orillas y pérdida de cobertura vegetal.

13. Referencias

Adminbeersmacon. (20 de noviembre de 2019). *estado de índices espectrales para Sentinel y Landsat*. Obtenido de Gis&Beers: <http://www.gisandbeers.com/listado-indices-espectrales-sentinel-landsat/>

Alma, M. M. (27 de Febrero de 2025). *Manizales Refuerza Control sobre Ocupaciones ilegales en las Laderas de la Comuna San José*. Obtenido de Alcaldía de Manizales: <https://mimanizalesdelalma.com/alcaldia-de-manizales/manizales-refuerza-control-sobre-ocupaciones-ilegales-en-las-laderas-de-la-comuna-san-jose/>

Alonso, D. (08 de 02 de 2019). *MappingGIS*. Obtenido de Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel: <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>

Álvarez del Castillo, J. (2013). *PÉRDIDA DE LA COBERTURA VEGETAL Y DE OXÍGENO EN LA MEDIA MONTAÑA DEL TRÓPICO ANDINO, CASO CUENCA URBANA SAN LUIS (MANIZALES)*. Obtenido de Scielo.

Ambiente. (2023). *Plan Integral de Contención a la deforestación 2023 - 2026*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Anzaldo, C. (2019). Expansión urbana y sustentabilidad de las ciudades. *Centrogeo*.

Arenas Villegas, D. (23 de Octubre de 2024). *Expansión urbana amenaza ecosistemas del río Blanco y la vereda Gallinazo en Caldas*. Obtenido de Sociedad de Mejoras Públicas Manizales: <http://www.somepumanizales.org/2025/05/expansion-urbana-amenaza-ecosistemas.html>

- Aristizabal Tamayo, J. M. (7 de Noviembre de 2024). *Análisis - Cambios en la cobertura de espacios verdes en Manizales entre 1986 y 2023*. Obtenido de Universidad de Manizales: <https://umanizales.edu.co/umedia/analisis-cambios-en-la-cobertura-de-espacios-verdes-en-manizales-entre-1986-y-2023-juan>
- Becerra, A. M. (17 de Octubre de 2024). *Colombia pierde anualmente entre 200.00 y 300.000 hectáreas de cobertura arbórea por actividades ilegales*. Obtenido de Diario El País: <https://www.elpais.com.co/economia/colombia-pierde-anualmente-entre-20000-y-300000-hectareas-de-cobertura-arborea-por-actividades-ilegales-1741.html>
- Cabrera Hurtado, D. F., Vivas Días, N. A., García Rojas, D. M., Nuncira Chaves, A. N., & Quintero Chamorro, J. A. (2025). *Análisis del riesgo por incendios forestales en el Parque Nacional Natural Tinigua*. Obtenido de Universidad de Manizales.
- Clasificación de Máxima Verosimilitud (Spatial Analyst)*. (s.f). Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/maximum-likelihood-classification.htm>
- Conde, D. R. (3 de noviembre de 2023). *CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE IMÁGENES DE SATÉLITE*. Obtenido de https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/11_clasificacion/clasificacion_supervisada.html
- Condori, L., Loza , M., Mamani, F., & Solíz, H. (2022). *nálisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014 Multitemporal analysis of forest cover using spatial remote sensing. Journal of the Selva Andina.*
- Del Castillo, J., Adolfo, & A, C. G. (s.f). *Pérdida de la cobertura vegetal y de oxígeno en la media montaña del trópico Andino, caso Cuenca Urbana de San Luis (Manizales).*

Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200004

Duque Escobar, G., & Torres Arango, C. (2025). *Invasiones y pasivos ambientales en Manizales*. Obtenido de Godues:
<https://godues.wordpress.com/2025/04/26/invasiones-y-pasivos-ambientales-en-manizales/>

EarthData, N. (14 de marzo de 2025). *Digital Elevation/Terrain Model (DEM)*. Obtenido de <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/digital-elevation-terrain-model-dem>

EarthData, N. (30 de julio de 2025). *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Obtenido de <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi>

Felícísimo, A. M. (s.f). *El modelo digital de elevaciones*. Obtenido de Universidad de Oviedo.

Ferreras, R. M. (22 de noviembre de 2021). *NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada*. Obtenido de <https://geoinnova.org/blog-territorio/ndvi-indice-vegetacion/>

Figueredo Fernández, L., Ramón Puebla, A. M., & Barrero Medel, H. (2020). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal en el área de manejo "Los Números" Guisa, Granma*. Obtenido de Scielo:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692020000100001

Finner, M. (22 de 06 de 2025). *Focos de Deforestación archivos - MAAP*. Obtenido de <https://www.maaprogram.org/es/special-analysis/focos-de-deforestacion/>

Food and Agriculture Organization. (2024). *Deforisk-AIM4Forests nueva solución para el mapeo del riesgo de deforestación*. Obtenido de <https://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1709124/>

Gobierno de España. (2014). *Guía metodológica para la identificación de los elementos de infraestructura verde de España*. Obtenido de Ministerio para la transformación ecológica.

Gonzaga Aguilar, C. (28 de 02 de 2015). *Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador*. Obtenido de CEDAMAZ.

Gourou. (s.f). *Compendio de Geografía General*. Obtenido de Papy Editorial RIALP.

Herrera Martinez, Y. (2005). *Diagnóstico y concertación del Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora El Malmo*. Obtenido de Corporación Autónoma Regional de Boyacá.

Hurtado Abril, J. L. (2019). *Generación de un índice espectrotemporal para la identificación de zonas afectadas por deforestación usando imágenes Landsat*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia.

ICDE. (2021). *Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales*. Obtenido de Gobierno de Colombia.

Infante, J. (6 de agosto de 2025). *En 2024, Colombia consolidó la segunda cifra de deforestación más baja de la historia*. Obtenido de Ministerio de Ambiente.

Janampa Torres, S., & Ponce Cristobal, J. J. (2022). *Análisis multitemporal de la deforestación por imágenes satelitales en el distrito de Pangoa, Junín desde el año 2000 al 2020*. Obtenido de Universidad Continental.

Jenson, S. K. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. 2.

Jhonson, D. L., Ambrose, S. H., Bassett, & Bowen, M. L. (1999). Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality*. 581-589.

Jiménez Gomez, W., & Moreno Rojas, A. (Diciembre de 2025). *Análisis y Proyección de Deforestación en el Bosque Jamanxim Usando Segmentación Satelital y Modelo Logístico con Euler Mejorado*. Obtenido de Revista Erevna.

Liang, S., Cheng, J., & Wei Zhang, J. (24 de 04 de 2021). *Clasificación de máxima verosimilitud de imágenes de teledetección del suelo basada en aprendizaje profundo*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-61902020000300357

López Plazas, M. A. (17 de Abril de 2024). *La mancha urbana en Colombia sigue expandiéndose*. Obtenido de Universidad del Rosario: <https://urosario.edu.co/periodico-nova-et-vetera/investigacion/la-mancha-urbana-en-colombia-sigue-expandiendose>

Loza del Carpio, A., & Taype, I. (24 de 11 de 2020). *Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú*.

Lücke. (1999). *Ordenamiento territorial*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/in-action/territorios-inteligentes/componentes/ordenamiento-territorial/contexto-general/es/>

Luna Condori, I. J., Loza Murguía, M. G., Mamani Pati, F., & Solíz Valdivia, H. (Febrero de 2018). *Análisis multitemporal de la cobertura boscosa empleando la metodología de*

teledetección espacial y SIG en la sub-cuenca del río Coroico - provincia Caranavi en los años 1989 – 2014. Obtenido de Journal of the Selva Andina Research Society.

Martinez, L., & Ruiz Orjuela, L. M. (2016). *ANALISIS DE LA PÉRDIDA EN LA COBERTURA VEGETAL A PARTIR DE UN ESTUDIO MULTITEMPORAL 2007 - 2013 PARQUE NACIONAL NATURAL ALTO FRAGUA INDI WASI.* Obtenido de Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Ms. Graciela Pusiner, R. P. (2005). *USO DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN.* 4.

Muñoz, J. M. (1 de octubre de 2016). *Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz ed Confusión.* En J. M. Muñoz.

Mur Días, L. T., & Vargas, C. N. (2021). *Asentamientos Informales, una problemática socioespacial: Caso de estudio municipio de Apulo Cundinamarca.* Girardot: Universidad Piloto de Colombia.

Murillo Malaver, C. A. (Mayo de 2022). *ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CAMBIO DEL USO DEL SUELO Y LA DEFORESTACIÓN EN LA RESERVA NACIONAL NATURAL NUKAK PRODUCTO DE LA FIRMA DE LOS ACUERDOS DE PAZ EN COLOMBI.* Obtenido de Universidad de los Andes.

Palacios Bermúdez, E. (2015). *ANÁLISIS MULTITEMPORAL EN LA COBERTURA BOSCOSA DE LA ZONA NORTE DEL DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ, 1990 - 2014.* Obtenido de Universidad de Manizales.

Parra Henao, G. (12 de 2010). *Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores.* Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-87052010000200007

Pezo Díaz, D. R. (2023). OCUPACIÓN ILEGAL DE TIERRAS Y PÉRDIDA DE COBERTURA VEGETAL URBANA, CASCO ESTACIÓN DE PAMPACHICA - IQUITOS 2023. UNAP.

Plan Nacional de Observación del Territorio. (s.f). *Plan Nacional de Teledetección*. Obtenido de Satélites Sentinel: <https://pnt.ign.es/satelites-sentinel>

Rasilla, D., & Conde, F. (03 de 11 de 2023). *CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE IMÁGENES DE SATÉLITE*. Obtenido de https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/11_clasificacion/clasificacion_supervisada.html

Revilla, A. R. (2016). *¿Qué son los servicios ecosistémicos?* Obtenido de CREAf: <https://www.creaf.cat/es/articulos/que-son-los-servicios-ecosistemicos>

Reynoso, L. (31 de julio de 2025). *La deforestación en Colombia aumentó un 43% entre 2023 y 2024*. Obtenido de El País América Colombia: <https://elpais.com/america-colombia/2025-07-31/la-deforestacion-en-colombia-aumento-un-43-entre-2023-y-2024.html>

Rivera Basto, A., & Pajoy Peña, S. (2023). *Predicción de la Deforestación en Caldas, Colombia: Un Enfoque Sociodemográfico mediante el Uso de Modelos Machine Learning*. Obtenido de Fundación Universitaria Los Libertadores.

Santillana, L. N. (2006). *Bloque 5. Geografía Económica*. Buenos Aires: La Enciclopedia del Estudiante. 8. Geografía General.

Secretaría de Planeación Municipal de Manizales. (2015). *El modelo de ocupación urbano-territorial de Manizales*. Obtenido de SMP.

Sierra, Y. (2024). *Planeta perdió 3.7 millones de hectáreas de bosques primarios en 2023: diez campos de fútbol por minuto*. Obtenido de

<https://es.mongabay.com/2024/04/planeta-perdio-millones-bosques-primarios-en-2023/>

Suarez, J. C. (2021). *Metodología y Cálculo de la Pérdida de Suelo por Medio de la Ecuación Universal USLE en la Cuenca Río Soacha*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.

TEEB. (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Obtenido de P.Kumar. London and Washington: Earthscan.

Teledetección, P. N. (s.f). *Firmas espectrales*. Obtenido de PNT: <https://pnt.ign.es/firmas-espectrales>

Therán-Nieto, K. P.-A.-E. (2022). *Asentamientos informales en la periferia urbana de áreas metropolitanas*. Obtenido de Revista Brasileira de Gestão Urbana: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e20210275>

UEB. (2024). *¿Qué es un Sistema de Información Geográfica?* Obtenido de Universidad El Bosque: <https://www.unbosque.edu.co/educacion-continua/blog-educacion-continua/sistema-de-informacion-geografica>

Vasconez, M., Mancheno, A., Albarez, C., Prehn, C., Ceballos, C., & Ortiz, L. (2019). *Cuencas hidrográficas*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana.

Zumaeta Lozano, D. L. (2019). *Análisis multitemporal y predictivo del cambio de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal*. Obtenido de <https://doi.org/10.25127/ucni.v2i3.607>