



Análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo mediante el uso de imágenes satelitales en el municipio de Manizales, Caldas

Laura Lucia Castro Ocampo

Diana Lorena Vélez Ramírez

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

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

Asesores de recursos académicos: Luz Andrea Sepúlveda Escobar (asesora bibliográfica)

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

2025

Cita	(Castro Ocampo & Vélez Ramírez, 2025)
Referencia	Castro Ocampo & Vélez Ramírez (2025). <i>Análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo mediante el uso de imágenes satelitales en el municipio de Manizales, Caldas</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXX

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

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

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

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

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

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

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

Dedicatoria

Dedicamos este logro a todas aquellas personas que han hecho esto posible, tanto en nuestro crecimiento personal como profesional, especialmente a nuestras familias, por su apoyo, paciencia y amor incondicional.

Agradecimientos

A nuestra familia, por ser nuestro apoyo constante, brindarnos su amor y ser el pilar fundamental en cada etapa de este camino.

A nuestros compañeros por compartir este trayecto académico con entusiasmo, alegría, aprendizaje y compañerismo haciendo de esta etapa una experiencia enriquecedora.

A nuestros docentes por su compromiso, generosidad y compartir todo el conocimiento necesario para alcanzar nuestra meta.

Y de manera especial, a nuestra asesora, Ana María Giraldo por su apoyo, su paciencia y su orientación oportuna.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema	12
1.1 Descripción del área problemática	12
1.2 Formulación del problema	14
1.3 Justificación.....	15
2. Objetivos	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. Antecedentes	19
4. Referente normativo y legal	22
5. Referente teórico	25
5.1 Dinámica de los movimientos en masa, erosión y cárcavas	25
5.2 Riesgo, vulnerabilidad y gestión del territorio.....	26
5.3 Teledetección y análisis multitemporal.....	26
5.4 Técnicas de clasificación de imágenes, interpolación y modelado de variables físicas.....	27
5.5 SIG como integradores de información geoespacial.....	28
6. Metodología	29
6.1 Enfoque metodológico	29
6.2 Tipo de estudio	29
6.3 Procedimiento.....	30
6.3.1 Recopilación de información	30

6.3.2 Clasificación supervisada y análisis multitemporal	32
6.3.3 Evaluación del impacto de cambios de cobertura y factores detonantes	38
7. Resultados	46
7.1 Recopilación de información de Factores Detonantes	46
7.1.1. Generalidades - Localización.....	46
7.1.2 Factores geológicos.....	47
7.1.3 Factores climáticos.....	51
7.1.4 Factores hidrológicos	52
7.1.5. Factores ambientales	53
7.1.6 Factores antrópicos	54
7.1.7 Procesos erosivos	55
7.1.8 Infraestructuras expuestas	56
7.2 Clasificación supervisada y análisis multitemporal	58
7.3 Evaluación de impactos de cambio de cobertura y factores detonantes.....	71
7.3.1 Pendiente.....	71
7.3.2 Precipitación	72
7.3.3 Cobertura Vegetal (NDVI)	73
7.3.4 Relación entre cambio de cobertura y factores detonantes.....	79
8. Conclusiones	82
9. Recomendaciones.....	83
10. Referencias	84

Lista de tablas

Tabla 1 Fuentes de información para respectivas temáticas	30
Tabla 2 Valores de matriz de transición 2016 - 2020.....	35
Tabla 3 Valores de matriz de transición 2020 - 2024.....	36
Tabla 4 Clasificación rango de pendiente	40
Tabla 5 Precipitación mensual acumulada	43
Tabla 6 Clasificación NDVI (Jensen, 2007)	44
Tabla 7 Reclasificación clases NDVI.....	45
Tabla 8 Imágenes PlanetScope (Color natural - Falso color).....	59
Tabla 9 Cambio de cobertura (2016 - 2024)	64
Tabla 10 Matriz de transición de coberturas del suelo 2016 – 2020 (Ha).....	67
Tabla 11 Matriz de transición de coberturas del suelo 2020 – 2024 (Ha).....	68
Tabla 12 Distribución de área por clase de NDVI	78

Lista de figuras

Figura 1 Selección imágenes en plataforma de PlanetScope	31
Figura 2 Creación de muestras para clasificación	33
Figura 3 Creación de firmas	33
Figura 4 Clasificación supervisada	34
Figura 5 Recorte área de estudio y conversión a de ráster a vectorial	34
Figura 6 Tablas de atributos con respectivos valores de clase	36
Figura 7 Tabla de atributos de análisis año 2016 - 2020.....	38
Figura 8 Recorte de DEM	39
Figura 9 Clasificación en grados mapa de pendiente	40
Figura 10 Mapa de pendientes reclasificado	41
Figura 11 Mapa pendiente, polígono resultante	41
Figura 12 Polígonos de Thiessen para precipitación.....	42
Figura 13 Cálculo de NDVI	44
Figura 14 Mapa de localización	46
Figura 15 Mapa de fallas de Manizales.....	47
Figura 16 Mapa geología local.....	49
Figura 17 Mapa geología local.....	51
Figura 18 Infraestructura expuesta.....	56
Figura 19 Obras de contención deterioradas	58
Figura 20 Mapa de coberturas 2016.....	61
Figura 21 Mapa de coberturas 2020.....	62
Figura 22 Mapa de coberturas 2024.....	63

Figura 23 Evolución del área por tipo de cobertura (2016 - 2024).....	65
Figura 24 Cambio porcentual en coberturas del suelo (2016 - 2024).....	66
Figura 25 Cambio neto por tipo de cobertura (2016 - 2020 y 2020 - 2024).....	70
Figura 26 Mapa de pendientes	72
Figura 27 Precipitación Mensual Acumulada (2017 - 2022).....	73
Figura 28 Mapa de NDVI - 2016.....	75
Figura 29 Mapa de NDVI - 2020.....	76
Figura 30 Mapa de NDVI - 2024.....	77
Figura 31 Evolución del NDVI por clase (2016 - 2024).....	78

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los cambios en las coberturas del suelo en relación con los movimientos en masa a través de un enfoque multitemporal. Para llevar a cabo este análisis se implementaron técnicas de teledetección como el uso de imágenes satelitales o Modelos de Elevación Digital del Terreno tomados de los portales PlanetScope y ALOS PALSAR, que, combinado con el uso de herramientas SIG, ArcGIS Pro, permiten hacer una clasificación supervisada, el cálculo del NDVI, cálculo de pendientes, entre otros, y de esta manera identificar patrones en los cambios de uso de suelo y su relación con los factores detonantes.

A través de imágenes satelitales obtenidas para los años 2016, 2020 y 2024, y mediante el uso de matrices de transición fue posible evidenciar flujos entre clases de coberturas del suelo y como algunas se mantienen más estables, mientras otras experimentan cambios significativos. Para los periodos de tiempo, 2016-2020 y 2020-2024, la conservación de la cobertura original se mantuvo en 72.56% y 74% respectivamente. Las zonas urbanizadas presentaron un crecimiento de 6.54 ha y después una caída de -0.19 ha. Los bosques presentan una dinámica variable para ambos periodos, del 2016 al 2020 tuvo una pérdida de -11.5 ha y un crecimiento de 26.35 ha en el siguiente periodo. La vegetación herbácea presentó reducciones continuas en ambos periodos teniendo una pérdida neta de -28.58 ha, que sugiere la consolidación de la pérdida progresiva de áreas de transición. Finalmente, las áreas abiertas en términos netos experimentaron un crecimiento de 7.41 ha que afianza el planteamiento de la fragmentación de las coberturas.

Este análisis, sumado al análisis de los factores detonantes de deslizamientos en masa, como las altas precipitaciones y pendientes, ocupación desorganizada del territorio, la composición geológica de los suelos y las presiones en los mismos, permiten una lectura integral del territorio y su susceptibilidad ante estos eventos.

Palabras clave: análisis multitemporal, cárcava, imágenes satelitales, deslizamientos, riesgo

Abstract

The objective of this study is to analyze land cover changes in relation to mass movements through a multitemporal approach. To conduct this analysis, remote sensing techniques were implemented, such as the use of satellite imagery and Digital Elevation Models (DEMs) obtained from the PlanetScope and ALOS PALSAR platforms. These, combined with GIS tools like ArcGIS Pro, allow for supervised classification, NDVI calculation, slope analysis, among others, and thus help identify patterns in land use changes and their relationship with triggering factors.

Using satellite images from the years 2016, 2020, and 2024, and using transition matrices, it was possible to identify flows between land cover classes, showing how some remain more stable while others undergo significant changes. For the time periods 2016–2020 and 2020–2024, the conservation of the original land cover remained at 72.56% and 74%, respectively. Urbanized areas showed an increase of 6.54 hectares, followed by a slight decrease of -0.19 hectares. Forests showed variable dynamics in both periods: from 2016 to 2020 there was a loss of -11.5 hectares, followed by a gain of 26.35 hectares in the next period. Herbaceous vegetation experienced continuous reductions in both periods, with a net loss of -28.58 hectares, suggesting a progressive loss of transitional areas. Finally, open areas experienced a net increase of 7.41 hectares, reinforcing the idea of land cover fragmentation.

This analysis, together with the examination of triggering factors of mass movements—such as high rainfall and steep slopes, unplanned land occupation, soil geological composition, and pressure on the terrain—allows for a comprehensive understanding of the territory and its susceptibility to these events.

Keywords: multitemporal analysis, gully, satellite images, landslides, risk

Introducción

La cárcava del Alto Tablazo, ubicada en el municipio de Manizales (Caldas), representa una de las manifestaciones más evidentes de erosión acelerada y transformación del paisaje en la región andina colombiana. Su progresiva expansión, agravada por factores naturales como la pendiente pronunciada, las precipitaciones intensas, la inestabilidad geológica y la pérdida de cobertura vegetal, ha generado serias implicaciones sobre la infraestructura local y la seguridad de las comunidades asentadas en sus alrededores. Además, la intervención antrópica sin una adecuada planificación ha contribuido a intensificar su dinámica erosiva, consolidándola como una amenaza geodinámica latente.

En este contexto, el presente estudio tiene como propósito analizar los cambios multitemporales en la cobertura del suelo entre los años 2016 y 2024, y su relación con los factores detonantes de movimientos en masa en el área de influencia de la cárcava del Alto Tablazo. A través del uso de imágenes satelitales de alta resolución (PlanetScope) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realiza una clasificación supervisada de coberturas, el cálculo de índices como el NDVI, así como el análisis de pendientes y variables climáticas relevantes. La integración de estos insumos permite una caracterización detallada de los procesos de degradación del suelo y su impacto sobre la estabilidad del territorio.

El enfoque metodológico adoptado se enmarca en un diseño cuantitativo de tipo descriptivo-correlacional, el cual permite no solo evidenciar las transformaciones espaciales de las coberturas, sino también establecer relaciones con variables físicas y antrópicas asociadas a la evolución de la cárcava. La investigación busca aportar al conocimiento del riesgo, en consonancia con la Ley 1523 de 2012, fortaleciendo los procesos de planificación territorial y la formulación de estrategias de mitigación basadas en evidencia geoespacial.

Así, este trabajo constituye una contribución relevante para la gestión integral del riesgo de desastres en contextos rurales vulnerables, al tiempo que evidencia el valor del análisis multitemporal y la teledetección como herramientas clave para la toma de decisiones y la construcción de territorios más resilientes.

1. Planteamiento del problema

La expansión de una cárcava el Alto Tablazo suscita preocupaciones significativas en la comunidad. Este fenómeno geológico, caracterizado por la erosión del suelo y el colapso de estructuras, no solo amenaza la integridad del terreno, sino que también pone en riesgo la seguridad de los habitantes y sus propiedades. La dinámica de la cárcava ha mostrado un crecimiento notable, lo que plantea interrogantes sobre los factores que han contribuido a su expansión y los cambios en las coberturas del suelo que pueden estar influyendo en este proceso (Muñoz Rodríguez, 2015a)

En consecuencia, el presente trabajo se enmarca principalmente en el “conocimiento y entendimiento del riesgo”, que representan uno de los tres pilares fundamentales de la gestión del riesgo de desastres según la Ley 1523 de 2012 (Ley 1523 de 2012). Este proceso busca, no solo identificar y caracterizar los factores de amenaza, sino también comprender dinámicas de transformación territorial y que aportes se pueden hacer para el desarrollo de estrategias efectivas para su reducción, mitigación y comunicación en la comunidad afectada.

En este contexto, se aborda el análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo ubicada en el municipio de Manizales departamento de Caldas. Se trata de un fenómeno geomorfológico que ha ido creciendo con el tiempo y representa una amenaza considerable para las infraestructuras cercanas como lo son las vías, escuelas, viviendas, comercio, entre otras, así como para la seguridad de la comunidad local. A través del uso de imágenes satelitales y técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se pretende caracterizar la evolución de esta cárcava, identificar los factores que contribuyen a su expansión y evaluar las consecuencias de su avance en el entorno.

1.1 Descripción del área problemática

En Colombia, las cárcavas constituyen una manifestación común de degradación del suelo, especialmente en regiones con pendientes pronunciadas, suelos erosionables y alta presión antrópica. Estos fenómenos han sido documentados en diferentes zonas del país como consecuencia de procesos de erosión acelerada, uso inadecuado del suelo y eventos climáticos extremos, particularmente en áreas andinas afectadas por sistemas de fallas geológicas como la

Romeral (Muñoz Rodríguez, 2015a); la cual se extiende de norte a sur por el occidente de la cordillera central.

Un caso similar se presenta en el sector El Brillante ubicado sobre la vía que conduce al municipio de Pácora hacia el corregimiento de San Bartolomé en el departamento de Caldas, siendo un punto crítico que afecta directamente a la comunidad de San Bartolomé y zonas circundantes. En este sector, la zona se ve afectada por la falla geológica Silvia-Pijao, que a su vez hace parte del sistema de fallas de Romeral, allí se presenta fuerte tasa de erosión, alta pendiente y pérdida constante de la banca. El tramo de afectación abarca 1.5km y se estima que en los últimos 10 años se han removido aproximadamente 70 hectáreas de capa vegetal (Gobernación de Caldas, 2024)

En ese mismo sentido, Manizales, capital del departamento de Caldas, se localiza en la cordillera Central de los Andes colombianos a un promedio altitudinal de 2.150 msnm. Presenta una topografía compleja con altos niveles de riesgo geológico, principalmente por amenazas naturales. En este contexto, la cárcava del Alto Tablazo representa una de las amenazas más visibles y documentadas en el municipio, con procesos activos de erosión y remoción en masa que se han intensificado en los últimos 40 años según (Parra Arias et al., 2020).

De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales 2017–2031, la vereda Alto Tablazo pertenece al corregimiento Agroturístico y se encuentra en una zona de amenaza por deslizamiento. Esto se debe a factores topográficos como su morfología ondulada con pendientes pronunciadas; geológicos, como la alta influencia del sistema de fallas Romeral y composición de materiales meteorizados con procesos erosivos severos; climáticas, como los periodos bimodales de lluvias y sequias, con influencia de fenómenos como el Niño y la Niña.

Esta cárcava es una de las más extensas en esta región del país con un área aproximada de 30 hectáreas, que aporta al desprendimiento de las laderas afectando las veredas El Alto Tablazo, Guacas y el Aventino, y el barrio Gutiérrez de la ciudad de Manizales (Muñoz Rodríguez, 2015a). El área de estudio cuenta con una superficie de 313.78 ha y para su delimitación se tiene en cuenta un radio de 1 km alrededor del centroide de la cárcava, justificada en lo señalado por (Morgan, 2005), las cárcavas tienden a expandirse radialmente afectado su entorno inmediato, son relativamente permanentes y asociadas a la inestabilidad del paisaje, y su formación depende de factores locales como la geología y la cobertura vegetal. Así mismo, (Valentin et al., 2005) resalta que las coberturas adyacentes y pendientes asociadas en áreas cercanas permiten

comprender sus dinámicas. Por tanto, establecer un radio de un 1 km alrededor del centroide permite capturar condiciones ambientales, geológicas y antrópicas representativas para el análisis.

Cabe señalar que la comunidad del Alto Tablazo se ubica a tan solo 4.5 kilómetros de la cabecera municipal de Manizales y está conformada por aproximadamente 1.524 habitantes, distribuidos en una estructura lineal a ambos lados de la vía principal, haciendo la uno de los centros poblados más grandes de Manizales. El sector presenta limitaciones en servicios como gas natural y presenta una infraestructura construida predominantemente en bahareque y mampostería de uno y dos pisos como expone la (Alcaldía de Manizales, 2014).

No obstante, el proceso de ocupación del territorio ha sido desorganizado y carente de planificación, lo cual ha implicado construcciones ilegales y antitécnicas en laderas, uso inadecuado del suelo, ausencia de obras adecuadas para la captación y conducción de aguas lluvias, y daños en redes internas de alcantarillado. Todo esto, probablemente, ha contribuido a la ampliación de la cárcava (Arango Gartner, 2006).

Por otra parte, desde una perspectiva social, (Parra Arias et al., 2020) identificaron aspectos clave como una percepción generalizada de inseguridad frente a los eventos geodinámicos, escepticismo respecto a la efectividad de las obras de mitigación implementadas y una alta dependencia de la intervención gubernamental. La comunidad ha señalado, además, una falta de procesos educativos continuos en torno a la gestión del riesgo y una limitada capacidad de respuesta ante la amenaza, lo cual aumenta su vulnerabilidad.

Por tanto, el problema específico que se busca estudiar con este trabajo es la relación entre los cambios en las coberturas del suelo y los factores detonantes de movimientos en masa con la evolución de la cárcava del Alto Tablazo, en un contexto de vulnerabilidad socioambiental.

1.2 Formulación del problema

A nivel global, entre los años 2000 y 2019, más de 1,5 millones de personas han muerto y 4.000 millones han sido afectadas por desastres a nivel mundial, según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2019). La expansión urbana en territorios de alta pendiente, la falta de planificación del suelo y las condiciones climáticas extremas han

incrementado la exposición y la vulnerabilidad ante eventos como los deslizamientos, agravando el riesgo de desastres con consecuencias humanas, sociales y económicas significativas.

En este contexto, Manizales, no ha sido ajeno a estas dinámicas. El crecimiento desorganizado en sectores como el Alto Tablazo ha coincidido con la expansión de fenómenos erosivos severos como la cárcava, una forma de erosión hídrica que, desde hace más de 40 años, representa una amenaza activa para la población e infraestructura del sur del municipio. A pesar de obras de mitigación e intervenciones puntuales, persiste una limitada comprensión del comportamiento de la cárcava a lo largo del tiempo, así como de los factores que han detonado su crecimiento.

En este sentido, el análisis multitemporal mediante imágenes satelitales ofrece una oportunidad para caracterizar cómo han cambiado las coberturas del suelo entre los años 2016 y 2024, así como para identificar patrones territoriales relacionados con la evolución de la cárcava y los factores detonantes de remoción en masa. Este enfoque puede ser clave para la gestión integral del riesgo, permitiendo que se diseñen estrategias de mitigación basadas en evidencia.

Por tanto, la pregunta que orienta esta investigación es:

¿Cómo han cambiado las coberturas del suelo entre los años 2016 y 2024 en el área de influencia de la cárcava del Alto Tablazo en Manizales, y qué relación tienen estos cambios con los factores detonantes de movimientos en masa y la exposición de la población e infraestructura cercana?

La respuesta a esta pregunta permitirá identificar los vacíos de conocimiento que existen en torno a la dinámica territorial de la cárcava, aportando insumos clave para mejorar los procesos de prevención, planificación y gestión del riesgo de desastres en el área rural del municipio.

1.3 Justificación

La decisión de realizar este trabajo surge del interés por entender cómo las variables físicas y socioambientales interactúan en la formación y expansión de fenómenos geológicos complejos como las cárcavas, particularmente en territorios donde las comunidades están directamente expuestas. La cárcava del Alto Tablazo representa un caso de estudio importante en la ciudad de

Manizales, no solo por su larga historia de actividad erosiva, sino también por el impacto que ha tenido sobre la población, la infraestructura y el entorno ambiental.

Desde el enfoque interdisciplinario que integra la Administración Ambiental y la Geología, se identificó la necesidad de abordar esta problemática con una mirada holística, que integre herramientas técnicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con una perspectiva de gestión del riesgo. Esta integración se sustenta en enfoques metodológicos que promueven el uso de tecnologías geoespaciales para la comprensión de los procesos de remoción en masa, tal como lo han demostrado estudios de Ayalew & Yamagishi, (2005) y Van Westen et al., (2008), quienes destacan la capacidad de los SIG para analizar la interacción entre variables como pendiente, geología, precipitación y cobertura vegetal.

La combinación de imágenes satelitales, análisis multitemporal y variables físicas permite construir una visión integral del territorio y entender cómo su transformación está relacionada con procesos de erosión acelerada y movimientos en masa. En este sentido la teledetección multiespectral y el análisis de series temporales de cobertura vegetal resultan fundamentales para identificar áreas críticas y proponer medidas preventivas, como señala Conforti et al., (2014) y Valentin et al., (2005) en estudios sobre cárcavas y degradación de suelos.

Esta investigación responde, además, a una falta de estudios recientes que integren análisis espacial, multitemporal y social sobre la evolución de cárcavas en áreas rurales de alta vulnerabilidad. Para la Universidad de Manizales, el estudio ofrece una aplicación práctica del enfoque SIG en escenarios reales de riesgo y puede aportar insumos útiles para fortalecer los procesos de planificación territorial y resiliencia comunitaria en la región.

Según lo establecido en la Ley 1523 de 2012 (República de Colombia, 2012), que adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres, la gestión del riesgo implica la generación de conocimiento, la prevención de futuros escenarios de riesgo, la reducción de los riesgos existentes y la gestión de emergencias y desastres.

Este trabajo se enfoca en el primer objetivo mencionado: la generación de conocimiento. A través del análisis multitemporal se pueden identificar los cambios en las coberturas que se han degradado y han podido ser detonantes en la expansión de la cárcava del Alto Tablazo, amplificando las condiciones de amenaza para la población y la infraestructura expuesta.

Este importante insumo puede beneficiar con mayor eficiencia otras etapas de la gestión del riesgo que, en grandes términos, buscan salvaguardar la integridad física, social, económica y ambiental de una población y territorio. El objetivo principal de este estudio busca evitar pérdidas humanas, beneficiando directamente a los habitantes del sector del área de influencia de la cárcava del Alto Tablazo.

En la actualidad, se cuenta con una amplia gama de herramientas disponibles, entre las cuales se incluyen los Sistemas de Información Geográfica, como ArcGis Pro, QGIS, ENVI, plataformas para la obtención de información georreferenciada, así como imágenes satelitales multibanda. Utilizar estas herramientas es fundamental en los procesos de planificación territorial, que juegan un papel crucial en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del riesgo de desastres (Van Westen et al., 2008; Morgan, 2005).

El uso de imágenes satelitales captadas por sensores ópticos multiespectrales permite una evaluación detallada y objetiva de los cambios en el terreno en el tiempo, fundamental para diseñar estrategias de mitigación y comunicación del riesgo adaptadas a la realidad local. Tener en cuenta este enfoque permite concebir la vulnerabilidad no solo como una condición física, sino como una construcción social determinada por factores estructurales y de acceso (Wisner et al., 2004; Cutter et al., 2003)

De esta manera, el estudio aporta información relevante a los responsables de toma de decisiones para la formulación de políticas y planes de manejo del territorio, contribuyendo así a la reducción del riesgo de desastres y al bienestar de la comunidad afectada.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar los cambios en la cobertura y los factores detonantes de movimientos en masa mediante el uso de imágenes satelitales, aplicando un análisis multitemporal del periodo comprendido entre 2016 y 2024, en la cárcava ubicada en la vereda El Alto Tablazo, municipio de Manizales.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información secundaria para caracterizar los factores detonantes de movimientos en masa y los elementos e infraestructuras expuestas.
- Caracterizar los cambios en las coberturas del suelo mediante una clasificación supervisada para imágenes de satélite de la constelación PlanetScope para el periodo comprendido entre los años 2016 y 2024
- Evaluar la relación entre el cambio de coberturas del suelo y factores detonantes de los movimientos en masa de la Cárcava del Alto Tablazo.

3. Antecedentes

El análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo en Manizales, Caldas, es fundamental debido a los profundos efectos de la erosión en esta área durante las últimas décadas. Esta cárcava, activa por más de 50 años, ha generado importantes cambios en la cobertura del suelo y ha desencadenado deslizamientos que impactan tanto a la comunidad local como a la infraestructura, afectando, entre otras, la vía que conecta la vereda Guacas y el Alto Tablazo con el centro de la ciudad. La presencia del sistema de fallas Romeral es uno de los principales factores geológicos que contribuye a esta inestabilidad, además en épocas de fuertes lluvias, la erosión se intensifica, causando la pérdida de estabilidad en las laderas y provocando colapsos que agravan los problemas en la zona. Estos fenómenos resaltan la urgencia de realizar estudios que permitan entender sus causas y prever sus consecuencias (Parra Arias et al., 2020).

Desde hace cinco décadas, la cárcava de esta zona ha presentado una intensa actividad erosiva, con un progresivo deterioro del terreno que ha afectado severamente a las veredas Alto Tablazo, Guacas, El Aventino y al barrio Gutiérrez de la ciudad de Manizales. A lo largo de estos años, se han registrado varios eventos críticos que han marcado a la comunidad local (Muñoz Rodríguez, 2015). Uno de los primeros incidentes documentados ocurrió en el año 2000, cuando un deslizamiento de magnitud considerable dañó múltiples viviendas y fincas cafeteras, generando pérdidas económicas significativas para los habitantes del sector. Sin embargo, la tragedia más recordada sucedió en 2018, cuando un desprendimiento de tierra durante una salida académica de la Universidad de Caldas cobró la vida de un docente, poniendo en evidencia el alto riesgo geológico de la zona (Ríos, 2021).

De igual manera, en noviembre de 2023, otro movimiento en masa obligó a la evacuación de una familia y provocó la ruptura de la red de alcantarillado, lo que dejó sin servicio de agua a la vereda por varios días. Estos eventos, sumados a los constantes pequeños deslizamientos que ocurren con frecuencia, pero no siempre son reportados, demuestran que la cárcava sigue siendo una amenaza latente para la población (Muñoz Rodríguez, 2015).

Para abordar esta problemática, Corpocaldas ha invertido aproximadamente 4 mil millones de pesos en obras de estabilización del terreno (Corpocaldas, 2022). En la primera fase, se implementaron diques en la parte baja del área para mejorar su estabilidad. Posteriormente, se

desarrolló una segunda fase, que consistió en obras adicionales en la parte superior del terreno, con el propósito de mitigar los daños provocados por las fuertes lluvias en eventos anteriores. Sin embargo, a pesar de estas intervenciones, la zona sigue registrando tragedias tras la implementación de estas obras.

Además, estudios previos han documentado la pérdida de vegetación densa y poco densa en la microcuenca del Alto Tablazo, así como el aumento de reservorios de agua debido a cambios en el uso del suelo. Estos estudios han mostrado que la expansión agrícola ha contribuido a la erosión y a los deslizamientos, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible (Parra Arias et al., 2020).

Por consiguiente, el análisis multitemporal es una herramienta esencial para comprender los cambios en la cobertura del suelo y su relación con fenómenos geológicos como la cárcava del Alto Tablazo en Manizales, Caldas. Este enfoque permite evaluar cómo las transformaciones en el uso del suelo pueden influir en la estabilidad de las laderas y, por ende, en la dinámica de la cárcava. Este análisis, implica la comparación de imágenes satelitales tomadas en diferentes momentos, lo que permite identificar y cuantificar cambios en la cobertura del suelo en diferentes periodos. Este método es particularmente útil para detectar pérdidas o ganancias de vegetación, así como cambios en el uso del suelo, que son factores críticos en la evaluación de la estabilidad geológica de áreas propensas a deslizamientos (Fonseca & Gómez, 2013)

En el norte de Venezuela se han presentado dos grandes desastres naturales por flujos de escombros, Según JICA (2005), el primero en el año de 1987 que afectó la cuenca del río Limón en Maracay, estado Aragua, el segundo en el año de 1999 afectando la cuenca de San Julián ubicado en el Distrito Federal al noreste de Caracas, en ambos fenómenos se han realizado estudios detallados haciendo uso de imágenes satelitales y levantamiento de información geológica de la zona en donde se han realizado las zonificaciones adecuadas de riesgo, se ha sensibilizado a la comunidad de la amenaza presente mediante campañas, se ha tenido un mayor monitoreo meteorológico y construcciones de obras aunque muchas de estas han quedado inconclusas.

En el archipiélago de Indonesia al sudeste de Asia se encuentra ubicada la isla de Java la cual ha presentado una serie de antecedentes provocado por las lluvias intensas, erosión severa y sus pendientes abruptas, generando cárcavas profundas con movimientos en masa asociados (deslizamientos de tierra), con el fin de mitigar las afectaciones se ha llevado a cabo el oportuno

monitoreo geotécnico, reforestación en la zona, y canales de desviación y terrazas según (holichin et al., (2024).

En el valle central ubicado en Costa Rica abarcando las provincias de San José, Cartago, Alajuela y Heredia se presenta procesos de erosión, formación de cárcavas y movimientos en masa ocasionados por lluvias intensas, topografía pronunciada, composición del terreno (material volcánico) y presencia de fallas geológicas locales facilitando zonas de debilidad en el terreno. Se han llevado a cabo una serie de soluciones con el fin de reducir el impacto a las comunidades circundantes en el área de afectación como es el monitoreo geotécnico y geológico, y a su vez campañas para la recuperación adecuada de la vegetación y estabilidad del terreno.

Otros casos similares a lo que acontece en la cárcava del alto tablazo en la ciudad de Manizales, es el caso de Burkina Faso en África en el cual hicieron uso de imágenes satelitales y utilizaron datos LiDAR para mapear y cuantificar la expansión de las cárcavas (Gelete et al., 2024), también se realizó correlaciones entre la densidad de estos y se determinaron las pendientes y la precipitación; otro caso se presentó en China en la región de Loess Plateau en el cual realizaron un análisis multitemporal utilizando modelos de elevación digital (DEM) e índice de vegetación (NDVI) (Tian et al., 2013) realizando el modelo de la cárcava y adicional con ayuda del software ArcGIS, ENVI se pudo identificar los cambios de las coberturas a medida que se expande la cárcava.

Estos casos, al igual que el de la cárcava del alto tablazo, son similares en cuanto a sus características geográficas y climáticas, como la presencia de pendientes pronunciadas y lluvias intensas, en particular el caso presentado en Loess Plateau en China se relaciona mucho con la de cárcava del alto tablazo ya que en ambos se empleó la combinación de imágenes satelitales y análisis de modelos de elevación digital (DEM) determinando la extensión y evolución de las cárcavas.

4. Referente normativo y legal

Para el análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo en Manizales utilizando sistemas de información geográfica (SIG), es fundamental establecer un marco normativo y legal que guíe el proceso, especialmente en relación con la gestión del riesgo y la gestión ambiental. A continuación, se presentan las normativas más relevantes:

La ley marco para la Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia es la Ley 1523 de 2012 en la que se adoptó la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD); constituye el principal referente legal. Esta norma establece que la gestión del riesgo debe entenderse como un proceso social continuo, orientado al conocimiento del riesgo, su reducción y el manejo de desastres. En el contexto del presente estudio, esta ley justifica el uso de análisis multitemporales y herramientas geoespaciales como base para generar conocimiento sobre amenazas de origen natural, entre ellas los movimientos en masa.

Así mismo, la Constitución Política de Colombia de 1991 se convierte en la base legal y normativa del país, que en términos de gestión del riesgo, resalta el Artículo 51, en el que se establece el derecho a la vivienda digna (sin condiciones de riesgo) y el Artículo 215, en el que se indica la posibilidad del presidente de declarar el estado de emergencia cuando haya perturbaciones graves en el orden económico, social y ecológico del país. La Ley 99 de 1993, que crea el Ministerio de Ambiente y el Sistema Nacional Ambiental – SINA- tiene entre sus funciones la de hacer evaluación, seguimiento y control a los factores de riesgo, lo que también aplica a las autoridades ambientales regionales como las Corporaciones Autónomas.

A la par que en Colombia se estaba formando toda una normativa alrededor del ambiente y la gestión del riesgo, en el ámbito internacional se realizaba la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en mayo de 1992, donde se reconocen los efectos adversos del cambio climático y el impacto que tienen en hoy el aumento del riesgo de desastres, la convención fue incorporada a la legislación colombiana mediante la Ley 164 de 1994.

En relación con el ordenamiento del territorio, la Ley 388 de 1997 es clave ya que especifica que la prevención de amenazas y riesgos de desastre hacen parte del Nivel 1 de las determinantes a la hora de ordenar el territorio. Esta ley exige la identificación, localización y representación

cartográfica de zonas de riesgo en los planes de ordenamiento territorial (POT), elemento directamente relacionado con el uso de SIG y cartografía temática.

En Decreto 3600 de 2007 complementa la ley anterior, caracterizando los usos del suelo rural como en áreas de conservación y protección ambiental, áreas de producción, áreas de patrimonio cultural, áreas del sistema de servicios públicos domiciliarios y finalmente áreas de amenaza y riesgo, estas últimas no pueden ser de expansión y si ya están ocupadas deben adoptarse medidas de mitigación o reubicación de ser el caso. Esta disposición refuerza la importancia de identificar y monitorear zonas como la cárcava del Alto Tablazo para establecer acciones correctivas.

Adicionalmente, entre el 2011 y el 2012 se promulga la legislación que da la estructura que actualmente conocemos para la gestión del riesgo en Colombia, comenzando por el Decreto 4147 de 2011 por el que se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -UNGRD- como una entidad adscrita a la presidencia de la república, seguida por la Ley 1523 de 2012 que adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, “la gestión del riesgo, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidas de vida de las personas y al desarrollo sostenible” (Ley 1523 de 2012).

Esta última ley es la que conforma el referente teórico y legal para la gestión del riesgo en Colombia. Establece medidas directas para conocimiento, prevención y mitigación del riesgo, así como para la atención de los desastres. También asignan responsabilidad es a entidades de diferentes escalas territoriales en la formulación de planes y programas de gestión del riesgo, además de la corresponsabilidad de los sectores privados y de la comunidad.

En cuanto al Decreto 2157 de 2017 las entidades públicas y privadas que prestan servicios públicos y estos pueden llegar a significar un riesgo de desastres para la sociedad, deben realizar un análisis específico de riesgo que considere los posibles efectos de los fenómenos naturales sobre la infraestructura expuesta, con el fin de garantizar la protección de las personas y sus bienes que se encuentran en el área de influencia afectada por la entidad.

En el ámbito internacional, en el 2015 se adopta el Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015 – 2030, como resultado de negociaciones intergubernamentales buscando la resiliencia de las naciones y de las comunidades ante los desastres. Es sucesor del marco de Hyogo, y busca establecer lineamientos para la reducción de los riesgos, evaluación de las experiencias y estrategias de instituciones y naciones y modalidades de cooperación internacional, además de promueve la comprensión del riesgo de desastres como base para una gobernanza más eficaz. Este instrumento enfatiza la necesidad de utilizar tecnologías de la información, monitoreo espacial, datos multitemporales y análisis de cobertura del suelo para reducir vulnerabilidades, anticipar amenazas y fortalecer la resiliencia territorial.

En el contexto local, es importante mencionar dos instrumentos creados para la gestión del riesgo en el municipio de Manizales. Primero se encuentra el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) cuya vigencia va desde el 2016 hasta el 2028 y define objetivos, estrategias y procedimientos para la gestión del riesgo en el municipio, además establece metas claras para su reducción.

Por último, se tiene la Estrategia Municipal para la Respuesta Emergencias, que detalla los procedimientos operativos y los roles y responsabilidades para responder ante cualquier eventualidad que se pueda presentar por lo fenómenos de remoción en masa.

En síntesis, este marco legal respalda la implementación de un análisis multitemporal con enfoque SIG para identificar dinámicas de degradación del suelo y transformación del paisaje asociadas al avance de la cárcava. Así, se proporciona un insumo técnico y normativo relevante para apoyar la toma de decisiones y fomentar una gestión más proactiva del riesgo en Manizales.

5. Referente teórico

5.1 Dinámica de los movimientos en masa, erosión y cárcavas

Los movimientos en masa y los procesos de erosión acelerada son fenómenos de gran impacto en regiones montañosas y urbanizadas, como es el caso de Colombia. Debido a su compleja geografía, y el alta pendiente de muchas de sus regiones, la presencia de suelos volcánicos poco consolidados y el incremento de precipitaciones por efecto del cambio climático, el país es particularmente vulnerable a estos procesos. En este sentido, es ampliamente reconocido que la conservación de coberturas vegetales en zonas de alta pendiente es crucial para la estabilidad de los suelos, y numerosos estudios han demostrado que la pérdida de vegetación en zonas con características similares a las de la cárcava del Alto Tablazo puede acelerar o detonar procesos erosivos y deslizamientos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016b).

Dentro de este contexto se destacan las cárcavas, formas avanzadas de erosión hídrica lineal caracterizadas por surcos profundos que se desarrollan rápidamente cuando el escurrimiento superficial concentra su flujo en canales mal protegidos, socavando el suelo y removiendo grandes volúmenes de material (Poesen et al., 2003). En regiones como los Andes colombianos, donde la topografía abrupta se combina con precipitaciones intensas, el desarrollo de cárcavas está íntimamente relacionado con procesos de movimientos en masa.

Los deslizamientos, por su parte, consisten en el desplazamiento de masas de suelo, roca o material no consolidado pendiente abajo debido a la gravedad (Cruden & Varnes, 1996). Entre los factores detonantes más comunes de estos procesos se encuentran la precipitación extrema, los cambios de uso del suelo, la deforestación, las fallas geológicas activas y las actividades humanas como la urbanización sin planificación. Estos factores pueden actuar individualmente o de forma combinada, alterando el equilibrio de las laderas y favoreciendo la inestabilidad del terreno (Glade et al., 2005). Son los fenómenos geo ambientales más comunes del mundo, responsables de la muerte de cientos de personas y pérdida de millones de dólares (Ozioko & Igwe, 2020).

Un caso representativo de todo esto es la zona de estudio en donde la combinación de suelos volcánicos, las pendientes abruptas y las lluvias intensas han generado un proceso erosivo severo.

5.2 Riesgo, vulnerabilidad y gestión del territorio.

El riesgo se define como la probabilidad de que ocurran daños o pérdidas en el futuro, mientras que el desastre es la concreción del riesgo (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central, 2003). El riesgo se deriva de la relación dinámica entre las amenazas físicas y las vulnerabilidades de una sociedad.

Los factores de amenaza responden a las dinámicas ambientales de los fenómenos, como la mencionada pendiente, la precipitación, la composición del suelo, el estado de la cobertura, entre otros. Mientras que los factores de vulnerabilidad se componen de la exposición de las poblaciones, las edificaciones antitécnicas o sus medios de vida. En la ausencia de alguna de las dos variables no se concreta el riesgo, ya que, aunque exista la amenaza, si no hay poblaciones o infraestructura expuesta, no presenta un daño futuro.

El riesgo en Manizales se manifiesta en asentamientos ubicados en áreas inestables, infraestructura expuesta y falta de cobertura vegetal, aumentando así la susceptibilidad a desastres. La gestión integral del riesgo requiere información detallada sobre los factores físicos y sociales del territorio, lo que impulsa el uso de herramientas tecnológicas para su monitoreo.

5.3 Teledetección y análisis multitemporal

La teledetección, es una herramienta poderosa para el monitoreo sistemático del territorio. Mediante sensores remotos a bordo de satélites o plataformas aéreas, es posible recolectar información sobre grandes extensiones con una frecuencia y resolución adecuadas para el análisis ambiental. Satélites como Landsat, Sentinel y PlanetScope han sido ampliamente utilizados en investigaciones científicas para la detección de cambios en la cobertura vegetal, humedad del suelo y procesos geomorfológicos (Zhu et al., 2012), pues el almacenamiento de datos históricos y la captura de información actual permiten realizar análisis multitemporales, que comparan imágenes tomadas en distintas fechas para identificar esas transformaciones.

El análisis multitemporal, además de monitorear cambios físicos en la superficie, también permite identificar patrones de transformación que puedan anticipar escenarios de riesgo. Esta

técnica resulta particularmente útil en zonas como el Alto Tablazo, donde el crecimiento urbano y la intervención humana han modificado la dinámica natural del terreno.

5.4 Técnicas de clasificación de imágenes, interpolación y modelado de variables físicas

Para identificar y cuantificar los cambios en la cobertura del suelo, se aplican métodos como la clasificación supervisada de imágenes satelitales, donde se entrenan algoritmos para identificar distintos tipos de cobertura según firmas espectrales previamente definidas. Uno de los más precisos es el Maximum Likelihood Classification (MLC), que asigna a cada píxel la clase más probable según la distribución estadística de las firmas espectrales previamente entrenadas. Esta técnica ha sido ampliamente validada en estudios ambientales y es especialmente útil cuando se cuenta con datos de entrenamiento representativos.

El uso de MLC permite diferenciar con alta precisión entre categorías como vegetación densa, áreas urbanizadas, suelos desnudos o cuerpos de agua, aportando una base sólida para el análisis del cambio de cobertura a lo largo del tiempo. En zonas como el Alto Tablazo, donde el cambio de uso del suelo es frecuente debido al crecimiento urbano, este tipo de análisis puede detectar transformaciones críticas que contribuyen a procesos de inestabilidad.

Además de la teledetección, la interpolación espacial de variables es una técnica clave para llenar vacíos de datos y estimar valores continuos de parámetros ambientales, como la precipitación o la pendiente, a partir de puntos de medición. Métodos como el Kriging, la Interpolación Inversa Ponderada (IDW) o el spline se han aplicado en numerosos estudios para modelar la distribución espacial de factores condicionantes de deslizamientos y erosión (Goovaerts, 2000; Chen & Liu, 2012)

En este mismo marco, los polígonos de Thiessen son utilizados para definir zonas de influencia alrededor de estaciones meteorológicas o puntos de muestreo, asignando a cada área el valor del punto más cercano. Esta técnica es útil para delimitar unidades espaciales homogéneas en el análisis hidrológico y de precipitación, especialmente en regiones con escasa densidad de estaciones de monitoreo.

5.5 SIG como integradores de información geoespacial

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), integran y procesan múltiples capas de datos georreferenciados. Herramientas como QGIS o ArcGIS permiten la visualización y análisis espacial de variables físicas y sociales, facilitando la evaluación del riesgo a nivel local. Varios autores han demostrado que la integración de datos satelitales con SIG mejora la capacidad predictiva y la comprensión de los procesos ambientales en regiones de montaña (Van Westen et al., 2008; Guzzetti et al., 2012). Los SIG, constituyen herramientas fundamentales para el análisis espacial y la toma de decisiones. En estudios de erosión y riesgo por deslizamientos, permiten integrar múltiples capas de información como mapas de cobertura, pendientes, geología, NDVI, precipitaciones, y más.

La capacidad integradora de los SIG con datos satelitales y variables interpoladas, potencia la propia capacidad de diagnóstico del territorio, y facilita el diseño de estrategias de prevención y mitigación.

Lamentablemente la falta de información actualizada y detallada en áreas como la cárcava del Alto Tablazo dificulta la creación de estrategias de mitigación de riesgos a nivel local. Además, aunque la teledetección ha demostrado su eficacia en otras áreas del mundo, existen brechas en la aplicación sistemática de estas metodologías en Colombia para la prevención de deslizamientos en zonas urbanas vulnerables según Osorio et al., (2020) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2017).

En síntesis, el presente trabajo se inscribe dentro de un enfoque metodológico que combina la teledetección multitemporal, la interpolación espacial de variables, el análisis SIG y la revisión de literatura sobre factores detonantes de deslizamientos. Al abordar la problemática desde distintas dimensiones, se busca no solo caracterizar el comportamiento físico de la cárcava del Alto Tablazo, sino también aportar insumos útiles para la planificación del territorio y la gestión del riesgo. Estudios similares en otros países han demostrado que este tipo de aproximación puede facilitar la toma de decisiones por parte de autoridades locales y fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a amenazas geodinámicas.

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

El presente documento presenta un enfoque metodológico mixto que combina herramientas de análisis cuantitativas y cualitativas, permitiendo un análisis exhaustivo y objetivo de los cambios en la cobertura del suelo y los factores que influyen en los movimientos en masa en la cárcava del Alto Tablazo. Este enfoque metodológico no solo busca documentar los cambios observados, sino también proporcionar un marco para entender cómo estos afectan a la dinámica geológica y ambiental del área. Al integrar tanto datos cuantitativos como cualitativos, se espera ofrecer una visión holística que facilite la formulación de estrategias efectivas para mitigar los riesgos asociados con los movimientos en masa y promover la sostenibilidad ambiental en la región.

6.2 Tipo de estudio

El estudio propuesto se enmarca en un enfoque descriptivo-correlacional, mediante un método cuantitativo, sustentado en el análisis multitemporal de imágenes satelitales y su procesamiento mediante herramientas SIG. Desde la perspectiva descriptiva, se busca caracterizar y documentar el estado actual de la cárcava, mediante el uso de imágenes satelitales, proporcionando un análisis que se realizara a partir de series de imágenes ópticas (Planet Scope), complementadas con insumos cartográficos como modelos digitales de elevación (DEM), mapas de pendientes, registros de precipitación entre otros.

Por otro lado, el componente correlacional del estudio se centra en establecer relaciones entre los cambios observados en la cobertura del suelo y los factores físicos que pueden haber contribuido a estos cambios, especialmente la ampliación de la cárcava. Esta relación es crucial para entender cómo las variaciones en la cobertura del suelo pueden afectar la estabilidad geológica de la región y, a su vez, cómo los movimientos en masa pueden ser desencadenados por estas transformaciones.

6.3 Procedimiento

Para llevar a cabo el análisis multitemporal de la cárcava del Alto Tablazo mediante el uso de imágenes satelitales, se realizaron una serie de actividades en función del cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto:

6.3.1 Recopilación de información

a. Revisión de bibliografía y compilación de datos secundarios: esta fase se centró en la obtención de información relacionada con los distintos contextos que rodean la cárcava, incluyendo aspectos como la topografía, geología, registros históricos de precipitaciones y movimientos en masa, entre otros. La revisión bibliográfica se apoyó en fuentes académicas y científicas además del análisis de fotografías aéreas y satelitales, lo que permitió detallar y caracterizar la zona de estudio en términos geológicos, morfológicos y ambientales. Asimismo, se recopiló información proveniente de trabajos previos realizados en el área, así como informes técnicos, con el objetivo de comprender de manera integral los fenómenos presentes en la zona. Esta recopilación y análisis de datos permitió establecer una base para identificar patrones, problemáticas y posibles soluciones en el área de interés.

Tabla 1

Fuentes de información para respectivas temáticas

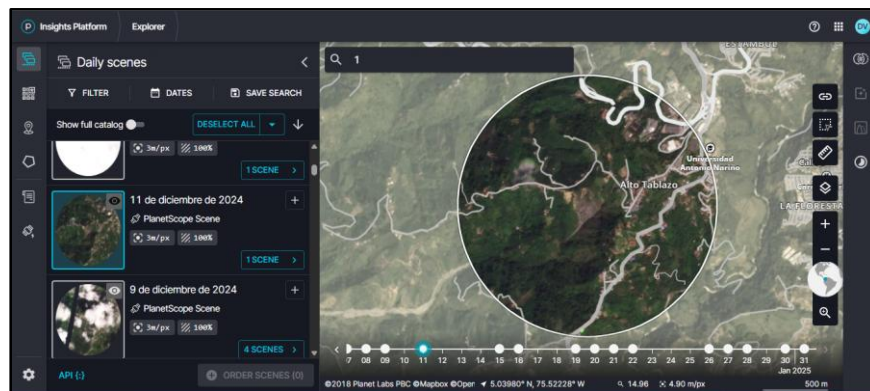
Temática	Fuente	Información adicional
Topografía y relieve	DEM 12.5 m – NASA Earthdata	Modelo digital de elevación ALOS PALSAR. Base para cálculo de pendientes y delimitación de cárcava.
Imágenes satelitales	PlanetScope (2016, 2020, 2024)	Resolución de 3 m, 4 bandas espectrales (RGB y NIR). Sistema de coordenadas WGS 84. Soporte para clasificación supervisada, cálculo NDVI y análisis multitemporal.
Factores geológicos	Muñoz Rodríguez (2015); Duque Bernal (2006); Mapa Geológico Nacional; POT Manizales	Presencia del sistema de fallas Romeral; descripción de formaciones geológicas presentes (Casabianca, Quebradagrande). Alta susceptibilidad a remoción en masa en la zona de la cárcava del Alto Tablazo.
Factores climáticos	IDEAM – DHIME; Duque Bernal (2006); POT Manizales; Muñoz Rodríguez (2015).	Datos históricos de precipitación. Identificación de periodos de lluvia intensa. Influencia de fenómenos climáticos sobre laderas en Alto Tablazo.
Factores hidrológicos	Duque Bernal (2006); Corpocaldas (2022); POT Manizales	Información sobre microcuenca El Salado, alteraciones del drenaje, erosión hídrica, obras hidráulicas y escorrentía superficial.

Factores ambientales	POT Manizales; Diagnóstico Corregimientos; Muñoz Rodríguez (2015)	Coberturas vegetales, zonas de recarga, áreas de conservación, funciones de conectividad y servicios ecosistémicos en la vereda, ecosistemas frágiles en riesgo por intervención humana.
Factores antrópicos	POT Manizales; Diagnóstico Corregimientos; Carta de Corpocaldas (2022)	Urbanización sin planificación, uso no técnico del suelo, obras civiles inadecuadas, afectaciones por actividades agropecuarias. Actividades predominantes: ganadería intensiva, caña panelera, baja diversificación económica. Impacto en el uso del suelo y deforestación
Infraestructuras expuestas	POT Manizales; Diagnóstico Corregimientos; Corpocaldas (2022)	Red vial rural, acueducto y alcantarillado, equipamientos educativos y comunitarios, zonas habitadas dentro de áreas de amenaza.
Antecedentes	Muñoz Rodríguez (2015); Corpocaldas (2022); Duque Bernal (2006)	Historial de deslizamientos y expansión de la cárcava. Eventos críticos registrados (2000, 2018, 2023). Obras de mitigación implementadas.

b. Selección de imágenes satelitales: recopilación de imágenes satelitales de PlanetScope con resolución de 3 m por píxel. Estas imágenes permiten determinar los cambios en las coberturas en la zona de estudio a lo largo de las tres temporalidades elegidas. Las imágenes abarcan 8 años: 18 de diciembre del 2016, 22 de noviembre del 2020 y 11 de diciembre del 2024. Para su elección se procuró que coincidieran con la misma época del año, sin embargo, por la alta nubosidad de la zona para el 2020 se eligió la imagen del mes de noviembre que presenta mejores condiciones de nubosidad.

Figura 1

Selección imágenes en plataforma de PlanetScope



c. Análisis preliminar de datos: a partir de la recopilación de datos primarios y secundarios, la consulta bibliográfica, el análisis de fotografías aéreas y satelitales, así como la revisión de mapas temáticos (citados en la tabla 1), se avanzó en la caracterización inicial de la zona de estudio. Esta etapa permitió identificar criterios geológicos, geomorfológicos y

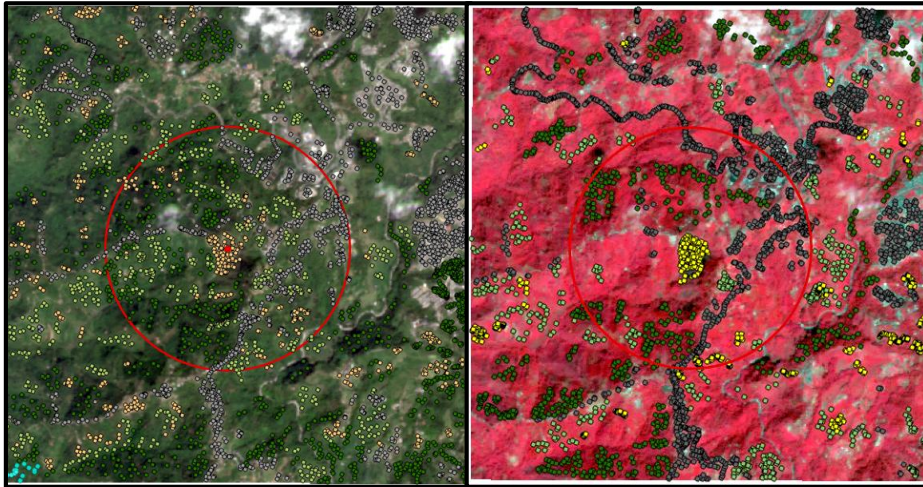
ambientales relevantes, que sirvieron como base para comprender preliminarmente los procesos erosivos, la cobertura vegetal, la composición del suelo y las dinámicas hidrológicas presentes. Si bien este análisis no pretende ser específico, facilitó una primera aproximación a las interacciones entre factores naturales y antrópicos, brindando elementos clave para orientar el análisis más detallado que se desarrolla en los objetivos posteriores, y que contribuirá a la toma de decisiones y formulación de estrategias para la conservación del territorio.

6.3.2 Clasificación supervisada y análisis multitemporal

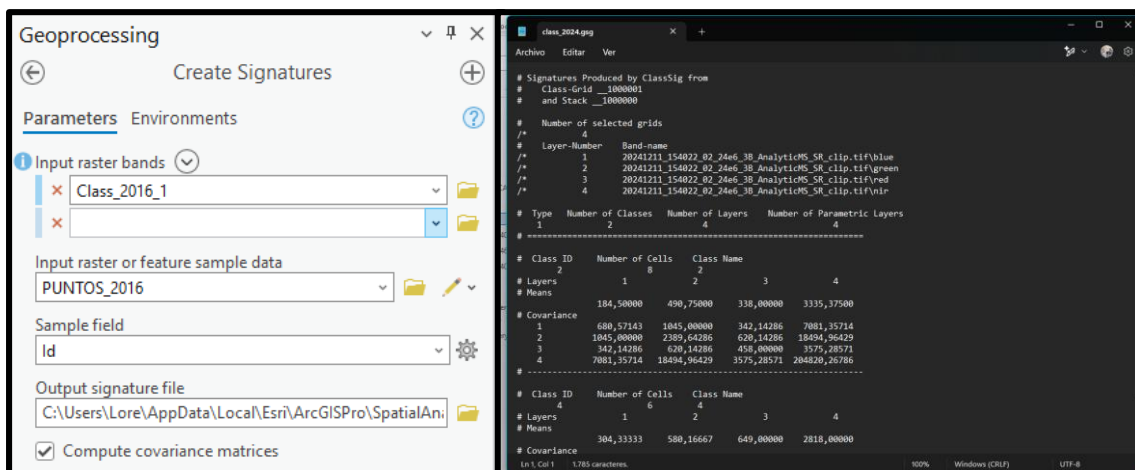
Para la clasificación de la cobertura del suelo se usó el método de la Clasificación supervisada, en donde utilizan muestras etiquetadas de las categorías a clasificar para entrenar el modelo que luego clasifica nuevos datos, esta se apoya en las combinaciones de bandas espectrales para identificación y clasificación de las diferentes coberturas. En un primer momento entonces se deben elegir las clases de coberturas de suelo que servirán para este proceso teniendo en cuenta la metodología Corine Land Cover (2010) La metodología indica que, según las características del sensor, es recomendable usar un nivel mayor o menor de detalle, para la delimitación clara de las unidades. En este caso, las imágenes PlanetScope de 3 metros de resolución espacial, permiten una definición hasta el nivel 2 de detalle. Por lo que se reconocen para efectos de este trabajo las siguientes coberturas:

1. Zonas urbanizadas (ZU)
2. Bosque (BO)
3. Áreas con vegetación herbácea y /o arbustiva (VB)
4. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación (SD)

Una vez se cuenta con las categorías y teniendo las imágenes se realiza en ArcGIS Pro la creación de las muestras que serán usadas para entrenar el modelo. Para esto se crea una capa de puntos a los que se le asigna el código manualmente de la categoría a la que pertenece. Se cuenta con imágenes de PlanetScope que abarcan más del área estudio por lo que se usan también coberturas fuera de la misma para que sea más representativo. Para la asignación más clara de la categoría se hace la combinación de bandas de color natural y falso color con el fin de diferenciar más claramente las coberturas.

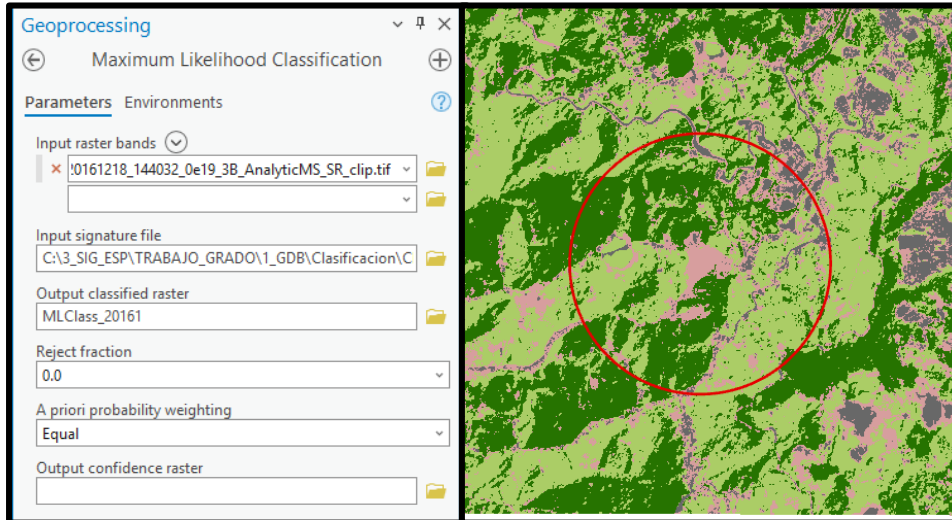
Figura 2*Creación de muestras para clasificación*

Después de tener la muestra representativa se crean las firmas con el uso de la herramienta Create Signature lo que da como resultado un archivo tipo texto (.GSG) con la información espectral de los puntos:

Figura 3*Creación de firmas*

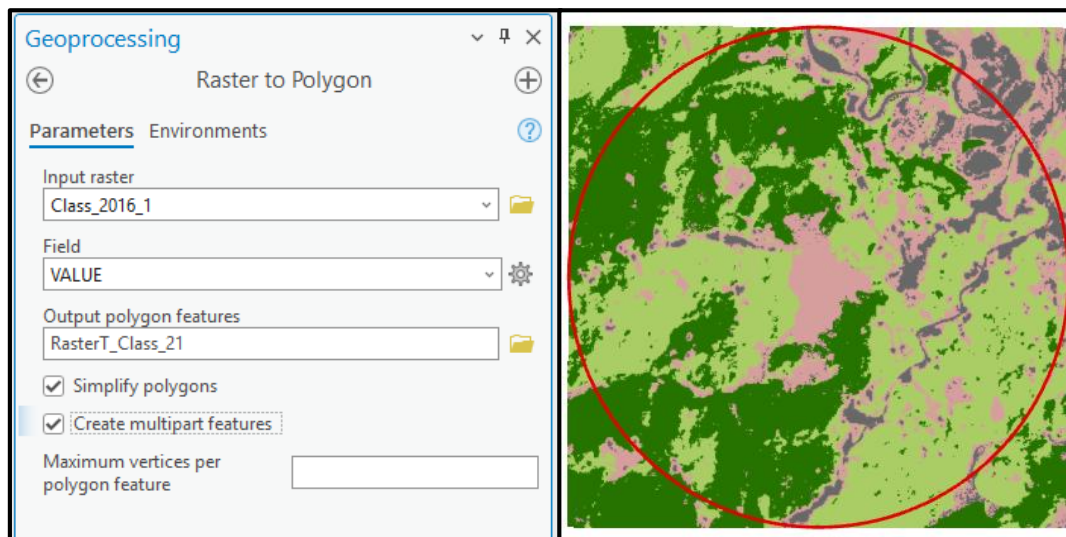
Al tener el este archivo, se puede hacer la clasificación supervisada, para la que se usa la imagen satelital, el archivo con la firma espectral y la herramienta Maximum Likelihood Classification lo que da como resultado:

Figura 4
Clasificación supervisada



Al tener ya el mapa de la clasificación generado, se hizo el recorte al área de estudio con *Clip Raster*, y se combirtio el archivo Raster a Vectorial con *Raster to Polygon*

Figura 5
Recorte área de estudio y conversión a de ráster a vectorial



Posterior al proceso de clasificación supervisada de las imágenes PlanetScope correspondientes a los años 2016, 2020 y 2024, se procedió con la elaboración de matrices de

transición para identificar y cuantificar los cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Para facilitar la interpretación de los flujos de cambio entre clases, se adoptó un sistema de codificación numérica basado en la metodología propuesta por Petit et al., (2001), referenciada en trabajos como el de Coppin et al., (2004), donde se utilizaron valores numéricos combinados para representar las transiciones entre dos fechas.

En este caso, se asignaron valores enteros a cada clase, en donde para el año más antiguo, según las imágenes a analizar, se asignaron valores en decenas, y para el año más reciente, valores en unidades. Por ejemplo, para el análisis del año 2016 al 2020, los valores de las clases en el 2016 se codificaron como (10) Zonas urbanizadas - ZU, (20) Bosque- BO, (30) Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva - VB, y (40) Áreas abiertas, sin o con poca vegetación - SD, y en 2020 como 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Este esquema permitió construir una matriz de transición donde las filas representan las clases del año 2016 y las columnas las del año 2020. Los valores en la diagonal principal de la matriz (11, 22, 33, 44) indican persistencia de la clase entre los dos años, es decir, áreas que no experimentaron cambio. En contraste, los valores fuera de la diagonal evidencian cambios; por ejemplo, el valor 24 representa zonas que eran bosque en 2016 (20) y que en 2020 se transformaron en áreas abiertas (4). Este tipo de análisis permitió no solo medir la magnitud del cambio, sino también entender la dirección de las transiciones entre clases específicas de cobertura según la tabla 2.

Tabla 2
Valores de matriz de transición 2016 - 2020

		AÑO 2020				
AÑO	Cobertura	Valor	ZU	BO	VB	SD
2016	Cobertura	Valor	1	2	3	4
	ZU	10	11	12	13	14
	BO	20	21	22	23	24
	VB	30	31	32	33	34
	SD	40	41	42	43	44

Para el segundo periodo estudiado, del año 2020 al 2024, la matriz debe repetirse siguiendo el mismo enfoque. En este caso, los códigos de las decenas corresponden al año más antiguo (2020), mientras que los de las unidades se asignan al año 2024 como se puede ver en la tabla 3.

Tabla 3*Valores de matriz de transición 2020 - 2024*

	AÑO	2024				
AÑO		Cobertura	ZU	BO	VB	SD
2020	Cobertura	Valor	1	2	3	4
	ZU	10	11	12	13	14
	BO	20	21	22	23	24
	VB	30	31	32	33	34
	SD	40	41	42	43	44

La metodología utilizada es coherente con enfoques previos aplicados en estudios de detección de cambios mediante análisis multitemporal, donde la codificación combinada facilita la generación de mapas de cambio y la cuantificación espacial de las transiciones, permitiendo una evaluación más intuitiva y automatizada en entornos SIG (Coppin et al., 2004).

Esos valores asignados según la matriz de transición se expresan en nuevos campos de la tabla de atributos de cada una de las capas teniendo en cuenta teniendo en cuenta que:

- MT_16_20: indica el valor que tiene esa clase en la Matriz de Transición para el estudio del año 2016 al 2020
- MT_20_24: indica el valor que tiene esa clase en la Matriz de Transición para el estudio del año 2020 al 2024
- Puesto que el año 2020 hace parte de ambos análisis es el que cuenta con ambos campos.

Figura 6*Tablas de atributos con respectivos valores de clase*

2016

2016_Class						
Field: Add Calculate Selection: Select By Attributes Zoom To						
FID	Shape *	Id	gridcode	Cobertura	MT_16_20	
1	0	Polygon	1	1	Zonas urbanizadas	10
2	1	Polygon	2	2	Bosque	20
3	2	Polygon	3	3	Areas con vegetacion...	30
4	3	Polygon	4	4	Areas abiertas, sin o c...	40

2020

2016_Class						
Field: Add Calculate Selection: Select By Attributes Zoom To						
FID	Shape *	Id	gridcode	Cobertura	MT_16_20_1	MT_20_24_1
1	3	Polygon	4	4	Areas abiertas, sin o c...	4
2	0	Polygon	1	1	Zonas urbanizadas	10
3	1	Polygon	2	2	Bosque	20
4	2	Polygon	3	3	Areas con vegetacion...	30

2024

2016_Class						
Field: Add Calculate Selection: Select By Attributes Zoom To						
FID	Shape *	Id	gridcode	Cobertura	MT_20_24	
1	0	Polygon	1	1	Zonas urbanizadas	1
2	1	Polygon	2	2	Bosque	2
3	2	Polygon	3	3	Areas con vegetacion...	3
4	3	Polygon	4	4	Areas abiertas, sin o c...	4

Al tener los valores en las tablas de atributos de las capas de cobertura para los tres años a analizar se aplicó la función *Intersect* para combinar las tablas de los años 2016-2020 y posteriormente de 2020-2024. El resultado se hace evidente en la tabla de atributos de las nuevas capas. Se creó el campo “Cambio” en el que se usa *Calculate Field* para sumar los valores y este campo contiene las posibles combinaciones de la matriz de transición. Finalmente se usó la calculadora de campos para calcular el área.

Figura 7*Tabla de atributos de análisis año 2016 - 2020*

FID	Shape *	FID_2016_C	Id	gridcode	Cobertura	MT_16_20	FID_2020_C	Id_1	gridcode_1	Cobetur_1	MT_16_20_2	MT_20_24	Cambio	AREA
1	Polygon	0	1	1	Zonas urbanizadas	10	0	1	1	Zonas urbanizadas	1	10	11	11.264211
2	Polygon	0	1	1	Zonas urbanizadas	10	1	2	2	Bosque	2	20	12	0.179834
3	Polygon	0	1	1	Zonas urbanizadas	10	2	3	3	Areas con vegetacion...	3	30	13	0.459821
4	Polygon	0	1	1	Zonas urbanizadas	10	3	4	4	Areas abiertas, sin o c...	4	4	14	3.36667
5	Polygon	1	2	2	Bosque	20	0	1	1	Zonas urbanizadas	1	10	21	0.512013
6	Polygon	1	2	2	Bosque	20	1	2	2	Bosque	2	20	22	88.590122
7	Polygon	1	2	2	Bosque	20	2	3	3	Areas con vegetacion...	3	30	23	15.932864
8	Polygon	1	2	2	Bosque	20	3	4	4	Areas abiertas, sin o c...	4	4	24	11.725967
9	Polygon	2	3	3	Areas con vegetacion...	30	0	1	1	Zonas urbanizadas	1	10	31	1.776732
10	Polygon	2	3	3	Areas con vegetacion...	30	1	2	2	Bosque	2	20	32	13.070695
11	Polygon	2	3	3	Areas con vegetacion...	30	2	3	3	Areas con vegetacion...	3	30	33	102.904341
12	Polygon	2	3	3	Areas con vegetacion...	30	3	4	4	Areas abiertas, sin o c...	4	4	34	16.567823
13	Polygon	3	4	4	Areas abiertas, sin o c...	40	0	1	1	Zonas urbanizadas	1	10	41	8.257961
14	Polygon	3	4	4	Areas abiertas, sin o c...	40	1	2	2	Bosque	2	20	42	3.419594

6.3.3 Evaluación del impacto de cambios de cobertura y factores detonantes

Para el desarrollo de este objetivo, se implementaron diversos análisis orientados a evaluar la influencia de los cambios en la cobertura del suelo y de los factores detonantes en la dinámica de los movimientos en masa y su relación con los elementos expuestos en el área de estudio. La metodología se estructuró en los siguientes componentes:

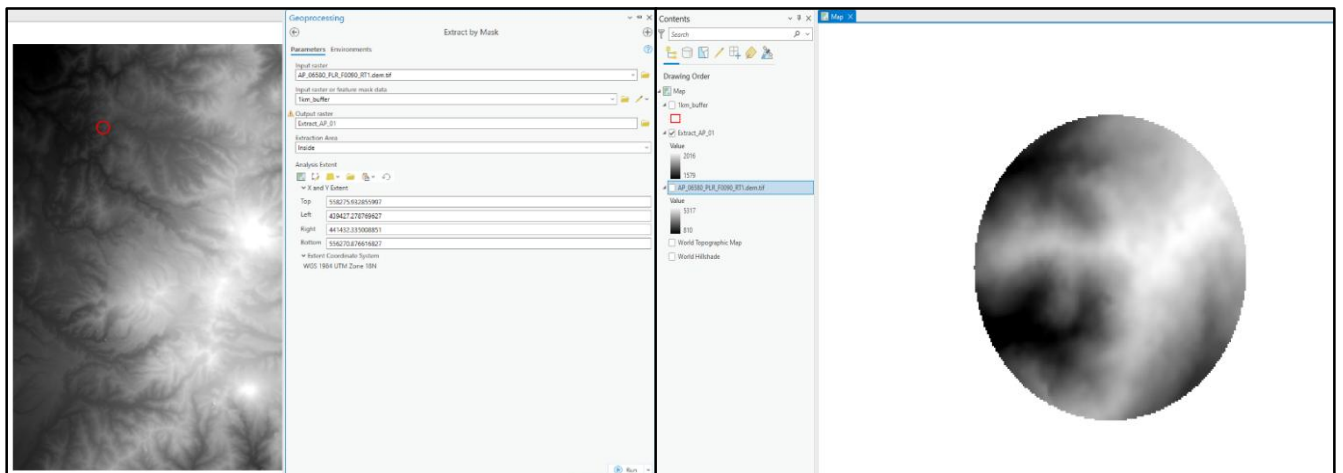
a. Análisis de factores detonantes: se realizó el análisis del modelo digital de elevación (DEM) para obtener el mapa de pendientes del terreno, elemento clave en la identificación de áreas susceptibles a deslizamientos y erosión. Adicionalmente, se analizó la información climatológica de precipitación histórica para determinar patrones de intensidad y recurrencia asociados a posibles desencadenantes de inestabilidad.

Pendiente: A partir del análisis de datos topográficos mediante un modelo digital de elevación (DEM), en este caso con una resolución de 12.5 m obtenido a partir de datos del sensor ALOS PALSAR, se llevó a cabo el procesamiento correspondiente. En esta etapa, se corrigieron errores y se eliminaron anomalías con el fin de garantizar la precisión del modelo. Una vez depurados los datos, se realizó la reclasificación del terreno con base en los rangos de pendiente establecidos, lo que permitió la generación del mapa de pendientes de la zona de estudio.

Para la elaboración de un mapa de pendientes, el insumo fundamental es contar con un modelo digital de elevación (DEM), ya que este permite representar con precisión la variación altitudinal del terreno y, a partir de ello, calcular los rangos de inclinación en la superficie.

Se descargó el modelo de elevación digital (DEM) de 12.5m a partir de datos del sensor ALOS PALSAR posterior a esto se cargó en ArcGIS pro, para determinar los lugares más planos y los más escarpados del área de estudio. (Figura 8), como los modelos de elevación digital se descargan a partir de un área grande se tiene que recortar a el área de estudio con la función *Extract by Mask*. (Figura 8).

Figura 8
Recorte de DEM



A partir de este insumo, se generará el mapa de pendientes utilizando la herramienta Slope. En este caso, se empleará la opción de clasificación en grados (Degree) (Figura 9), la cual permite expresar la inclinación del terreno en términos angulares. Posteriormente, se realizará una reclasificación del mapa en cinco categorías de pendiente ver tabla 4, definidas en rangos de grados, con el fin de facilitar su interpretación y análisis (Figura 10).

Tabla 4*Clasificación rango de pendiente*

	FID	Shape *	gridcode	RANGOS	pendiente
1	0	Polygon	1	0-5°	Plano
2	1	Polygon	2	5-15°	Pendiente suave
3	2	Polygon	3	15-25°	Pendiente moderada
4	3	Polygon	4	25-45°	Pendiente fuerte
5	4	Polygon	5	>45°	Pendiente muy fuerte

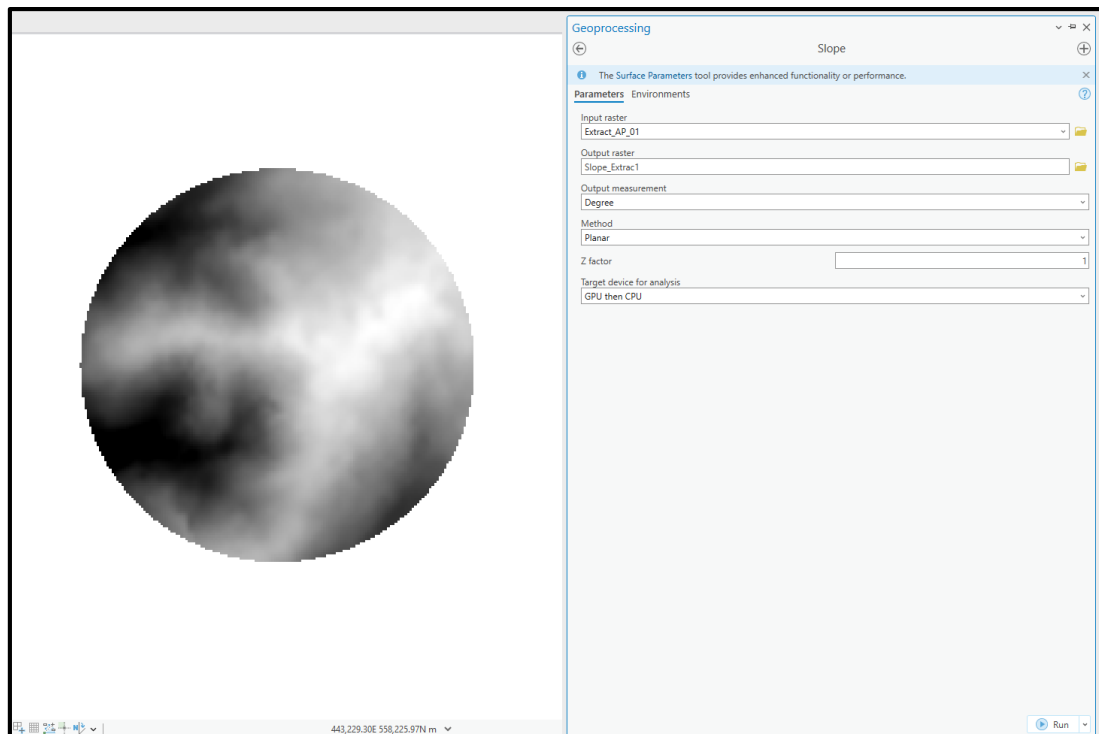
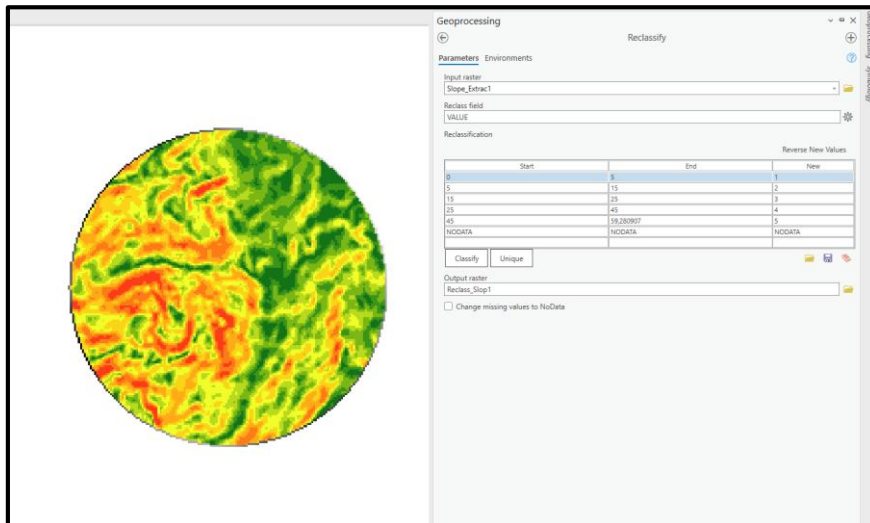
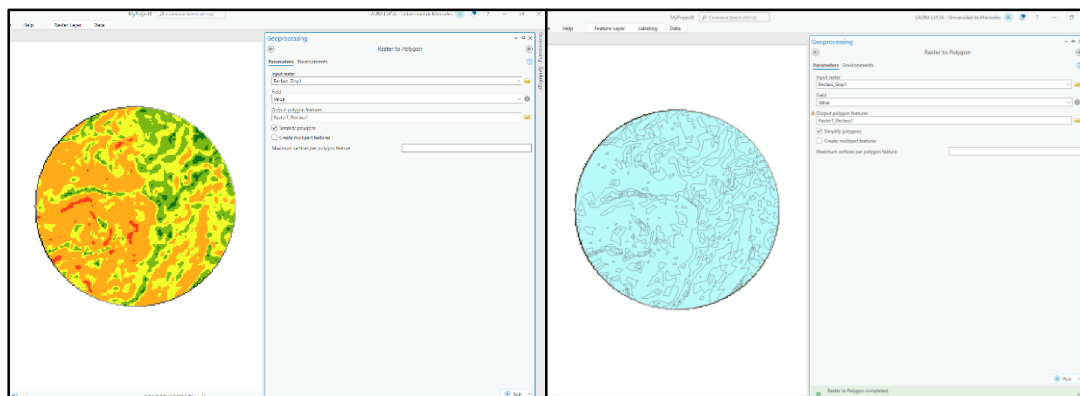
Figura 9*Clasificación en grados mapa de pendiente*

Figura 10
Mapa de pendientes reclasificado



Se convirtió el ráster a polígono con el fin de mejorar la interpretación y analizar de una mejor manera las áreas con diferentes grados de inclinación., para esto se utiliza la herramienta

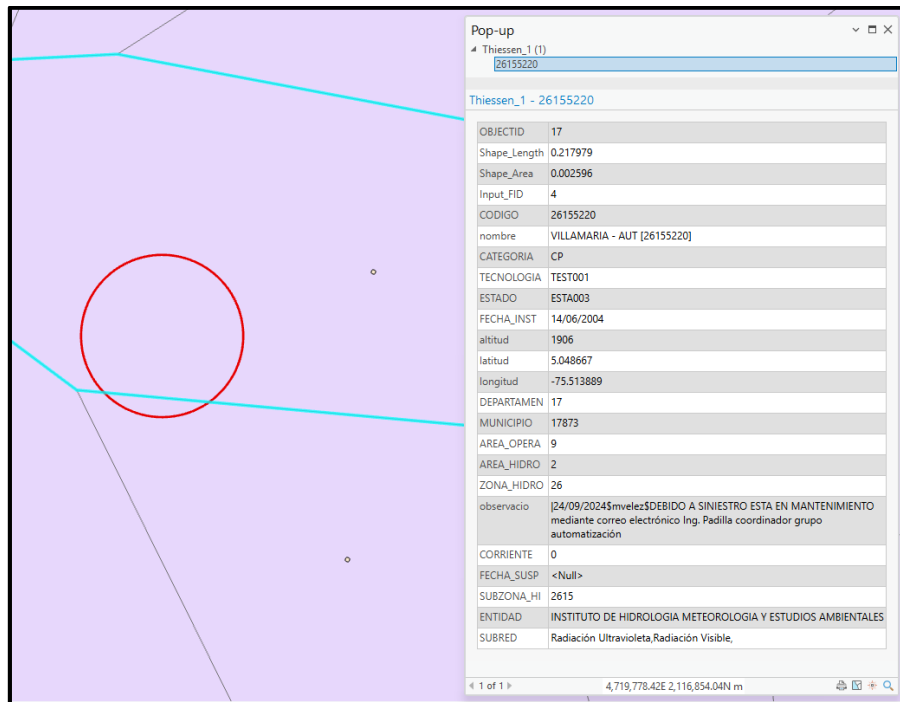
Figura 11
Mapa pendiente, polígono resultante



Precipitación: Con el fin de evaluar la influencia de las lluvias en la dinámica de los movimientos en masa en la cárcava del Alto Tablazo, se realizó un análisis de la precipitación mensual acumulada utilizando datos de la estación Villamaría - AUT (IDEAM), ubicada en el municipio de Villamaría, Caldas. Esta estación fue seleccionada por su proximidad al área de estudio, pues al aplicar los polígonos de Thiessen a las estaciones de la zona, se evidencio como

esta estación influye en aproximadamente el 90% del área de estudio, y la otra La estación de Palestina, no permitió la descarga de los datos.

Figura 12
Polígonos de Thiessen para precipitación



Los datos descargados desde el portal oficial DHIME – IDEAM en formato Excel, si bien se indicó un rango de tiempo mayor, desde el 2016 al 2024, para las variables seleccionando precipitación total diaria solo brinda información para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2017 y el 16 de septiembre de 2022. Se aplico una tabla dinámica para calcular la precipitación acumulada mensual para cada año del periodo de estudio.

Los resultados fueron visualizados mediante un gráfico de barras que permitió identificar periodos de mayor precipitación, asociados potencialmente a procesos de remoción en masa o expansión de la cárcava.

Durante este análisis se identificó un comportamiento anómalo en el registro de datos entre junio de 2020 y julio de 2021, periodo en el cual los valores fueron nulos o inusualmente bajos. Esta anomalía podría corresponder a un fallo temporal del sensor o a interrupciones en el sistema de medición, por lo cual este rango debe considerarse como una limitación en el análisis. A pesar

de ello, los demás años presentan registros claros y permiten identificar la estacionalidad y los eventos extremos de precipitación en el área de estudio.

Tabla 5
Precipitación mensual acumulada

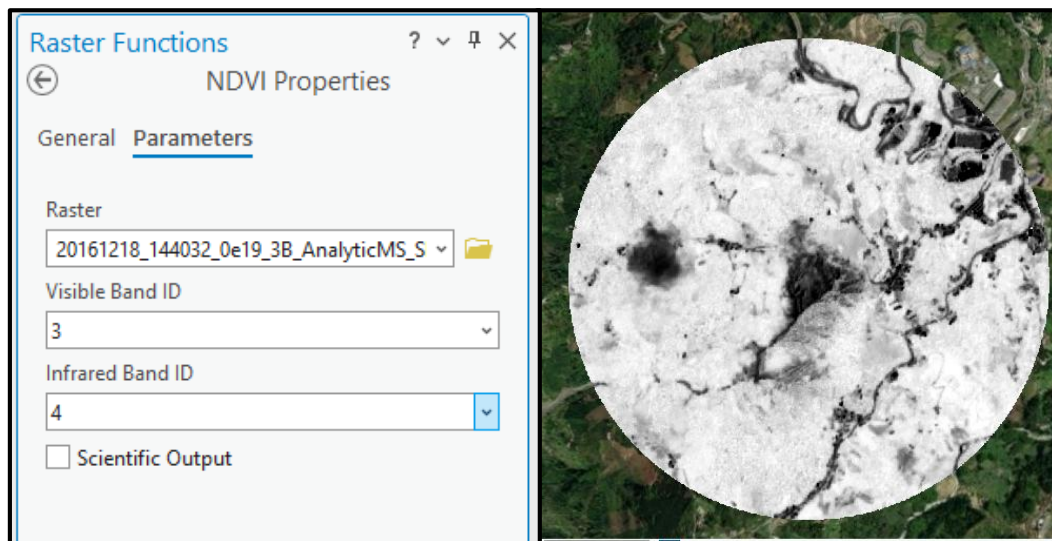
Etiquetas de fila	Suma de Precipitación (mm)	Etiquetas de fila	Suma de Precipitación (mm)
2017	1510.9	2020	502
1	123.7	1	62.2
2	110.9	2	83.8
3	241.2	3	126.6
4	228.5	4	210.4
5	272.7	5	19
6	127	6	0
7	45.4	7	0
8	105.5	8	0
9	110.7	9	0
10	7.6	10	0
11	0.3	11	0
12	137.4	12	0
2018	1318.6	2021	658.6
1	156	1	0
2	209.5	2	0
3	131	3	0
4	141.5	4	0
5	162.9	5	40.7
6	58	6	0
7	60.4	7	0
8	97.3	8	65.5
9	123.8	9	141.8
10	173.6	10	172
11	4.5	11	177.3
12	0.1	12	61.3
2019	1541.9	2022	905.3
1	4	1	55.4
2	44.1	2	42.7
3	227.1	3	16.3
4	239.1	4	216.9
5	278.5	5	102.1
6	90.1	6	261.6
7	23.5	7	171.9
8	5.6	8	30.9
9	76.9	9	7.5
10	176.8		
11	264.4		
12	111.8		

Evaluación de la cobertura vegetal: se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), para evaluar la densidad y vigor de la cobertura vegetal en diferentes momentos del tiempo, mediante la relación entre la reflectancia en el infrarrojo cercano (alta en vegetación sana) y en el rojo (alta en vegetación estresada o ausente).

El NDVI facilita la discriminación entre áreas con vegetación densa, escasa o nula, siendo una herramienta fundamental para interpretar cambios en la cobertura del suelo, permitiendo identificar zonas con procesos de pérdida o cambio significativo en la vegetación, lo cual puede aumentar la vulnerabilidad a procesos erosivos y movimientos en masa.

Para esto se utilizó la banda roja e infrarrojo cercano (NIR) que corresponden a la 3 y 4 de PlanetScope. El NDVI se deriva a partir de la expresión matemática $(NIR - Red) / (NIR + Red)$, propuesta por Rouse et al. (1974), mediante la relación entre la reflectancia en el infrarrojo cercano (alta en vegetación sana) y en el rojo (alta en vegetación estresada o ausente). Su cálculo en ArcGIS pro es sencillo, se va a la venta *Imagery – Raster Functions - NDVI*.

Figura 13
Cálculo de NDVI



Para la interpretación del NDVI se suele referenciar la clasificación de Jensen (2007):

Tabla 6
Clasificación NDVI (Jensen, 2007)

Clase de coberturas	Rango NDVI
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 – 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 – 0.2

Vegetación mediana (VM)	0.2 – 0.4
Vegetación alta (VA)	>0.4

Nota. Tomado de Jensen (2007)

Para este caso de estudio se usa una reclasificación adaptada a los valores obtenidos.

Tabla 7
Reclasificación clases NDVI

Clase de coberturas	Rango NDVI
1. Baja - (Suelo desnudo, Urbano)	< 0.2
2. Media - Vegetación mediana	0.2 – 0.4
3. Alta - Vegetación alta	>0.4

Nota. Adaptado de Jensen (2007)

b. Análisis espacial y estadístico: a partir los datos y mapas obtenidos se generaron estadísticas descriptivas que permiten analizar espacial y temporalmente los cambios en las condiciones del terreno.

c. Presentación de resultados: los hallazgos fueron integrados mediante la elaboración de mapas temáticos, gráficos y tablas, que sintetizan los principales cambios detectados y su relación con los factores detonantes y la evolución de la cárcava. Esta síntesis permite una visión clara del riesgo actual y fundamenta la formulación de recomendaciones orientadas a la gestión del riesgo y la protección del territorio.

7. Resultados

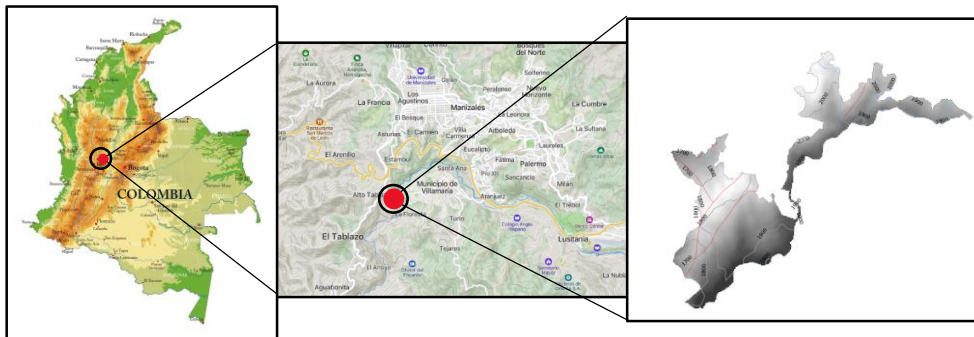
7.1 Recopilación de información de Factores Detonantes

7.1.1. Generalidades - Localización

La ciudad de Manizales se localiza en la región sur del departamento de Caldas, sobre la vertiente occidental de la cordillera Central de los Andes colombianos. Se sitúa en las coordenadas geográficas $5^{\circ} 04' 15.3''$ latitud norte y $75^{\circ} 30' 52''$ longitud oeste, y presenta una extensión urbana de 458.11 hectáreas y rural de 49.89 hectáreas. Dentro de su territorio rural, se encuentra la vereda Alto Tablazo, perteneciente al corregimiento agroturístico, donde se localiza la cárcava objeto de estudio.

La cárcava del Alto Tablazo se extiende entre las coordenadas $5^{\circ} 02' 20''$ y $5^{\circ} 03'$ de latitud norte, y $75^{\circ} 32' 10''$ y $75^{\circ} 32' 40''$ de longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 36,3 hectáreas y está delimitada por la cuenca de la quebrada El Salado y sus afluentes. Esta zona presenta pendientes que oscilan entre 15° y 50° , lo cual, sumado a la presencia del sistema de fallas geológicas de Romeral que atraviesa el área, genera condiciones de alta inestabilidad del terreno. La combinación de factores topográficos, geológicos y climáticos ha favorecido la expansión progresiva de la cárcava a lo largo de más de cinco décadas, afectando sectores rurales como Alto Tablazo, Guacas y El Aventino, así como la infraestructura vial y de servicios básicos de la zona.

Figura 14
Mapa de localización

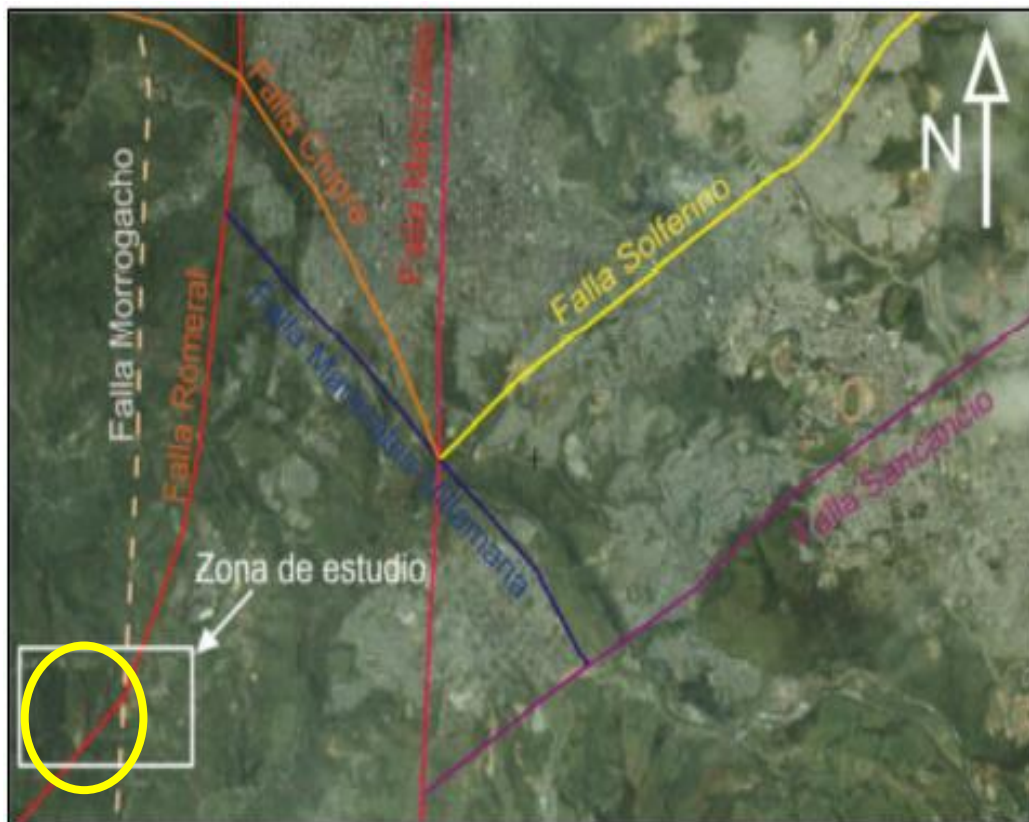


7.1.2 Factores geológicos

Regional: El municipio de Manizales se localiza en la vertiente occidental de la cordillera Central de los Andes colombianos, en una zona de alta complejidad estructural y geodinámica. La región está atravesada por un sistema denso de fallas geológicas, entre las cuales se destacan el sistema de fallas Romeral, de dirección NNE–SSO, y la falla de San Jerónimo, que delimita la región estructuralmente desde el oriente. Estas fallas no solo han condicionado la evolución geomorfológica del territorio, con la formación de valles profundos y laderas de fuerte inclinación, sino que también han generado zonas de debilidad estructural propensas a fenómenos de remoción en masa (Alcaldía de Manizales, 2014).

Figura 15

Mapa de fallas de Manizales



Nota. Tomado de Muñoz Rodríguez, 2015

La geodinámica regional también está influenciada por la cercanía de Manizales a importantes centros volcánicos del Complejo Volcánico Ruiz–Tolima, como el Nevado del Ruiz y el Cerro Bravo, cuyas actividades eruptivas históricas han depositado grandes volúmenes de material volcánico y piroclástico sobre la zona. Estos aportes volcánicos han contribuido a una composición litológica heterogénea, caracterizada por depósitos volcanogénicos poco consolidados, de alta porosidad y baja cohesión, factores que aumentan la susceptibilidad a la erosión y al colapso de laderas (Muñoz Rodríguez, 2015b).

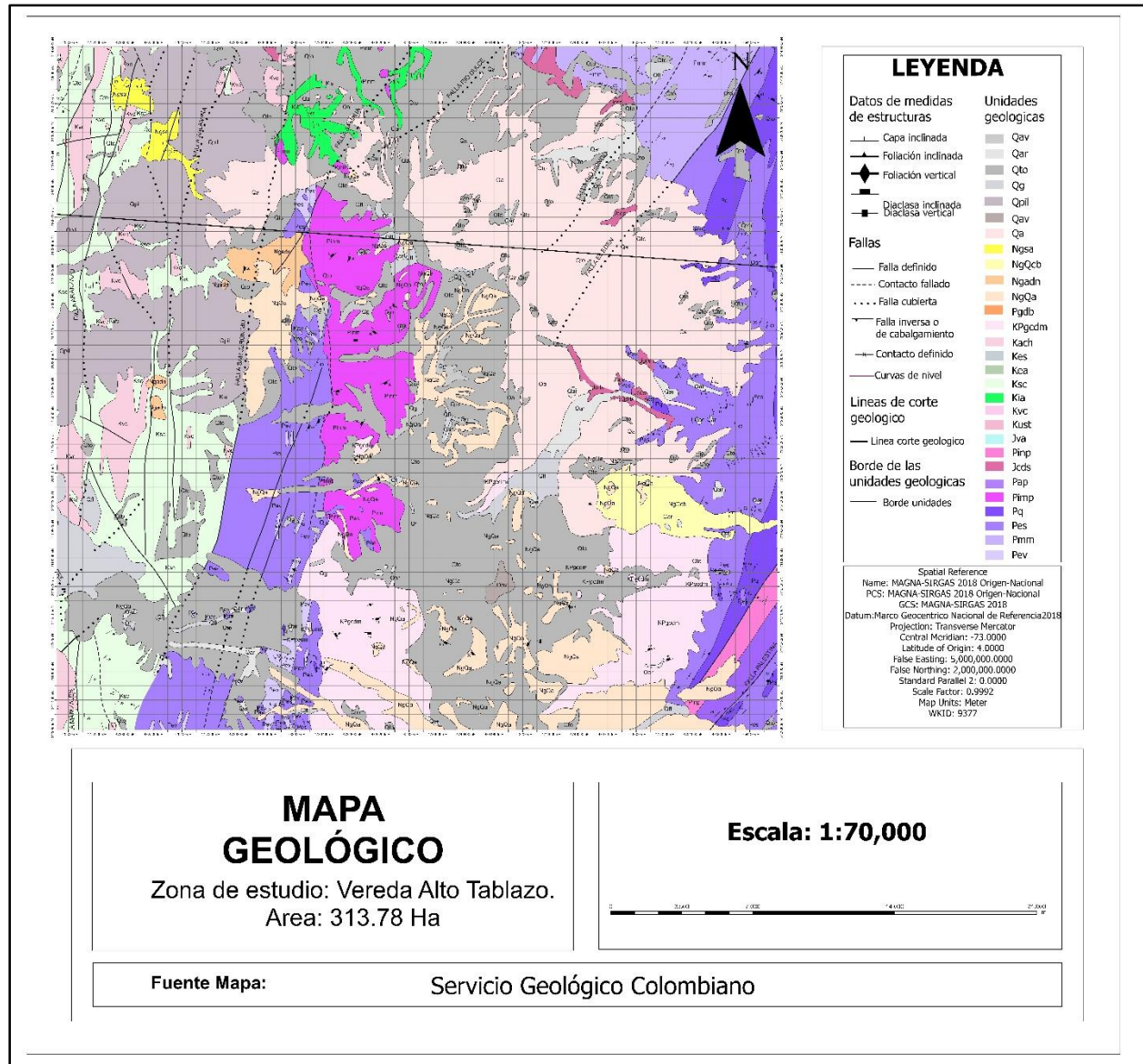
Dentro de este contexto regional se reconocen tres unidades geológicas principales que afloran en el municipio:

Complejo Quebradagrande: El complejo Quebradagrande está constituido por una serie de bloques estructurales alineados norte sur cuya característica común es poseer una asociación de sedimentitas marinas y un basamento oceánico de edad Cretácica Temprana. Este conjunto litológico está empotrado entre dos bloques con basamento metamórfico: el Complejo Arquía al Occidente y el Complejo Cajamarca al Oriente (Moreno-Sánchez et al., 2008).

Formación Manizales: Superpuesta al Complejo Quebradagrande y subyacente a la Formación Casabianca, esta formación fue descrita como una acumulación volcanodetrítica de piedemonte, y más adelante por Naranjo & Ríos (1989) como un conjunto de rocas sedimentarias volcanogénicas con edad entre 8 y 4 Ma (Mioceno Medio – Plioceno Temprano). Su litología es predominantemente conglomerática, con una matriz de arcilla, limo, arena y grava, y fragmentos polimícticos de esquistos, anfíbolitas y grauvacas, pero con ausencia total de material volcánico en la matriz, lo que implica baja cohesión y gran vulnerabilidad estructural (Naranjo & Ríos, 1989).

Formación Casabianca: Esta unidad es la más joven, con una edad que va del Plioceno tardío al Pleistoceno temprano (3.5–1.5 Ma). Fue redefinida por Borrero y Naranjo (1990). Está compuesta por sedimentos volcanogénicos de grano grueso, ignimbritas, tobas y otros materiales piroclásticos depositados por la actividad del Nevado del Ruiz y el Cerro Bravo. Estos materiales presentan una intensa alteración química, lo cual disminuye su resistencia estructural, convirtiéndolos en un factor clave en los procesos de erosión y remoción en masa (Alcaldía de Manizales, 2014).

Figura 16
Mapa geología local



Nota. Tomado de Servicio Geológico Colombiano

Local: El área del Alto Tablazo, ubicada al suroccidente de Manizales, refleja a escala local las complejas condiciones estructurales y litológicas descritas en el contexto regional. La cárcava del Alto Tablazo, con una extensión de aproximadamente 36.3 hectáreas, se encuentra dentro de

un corredor tectónicamente activo, donde las condiciones geológicas locales agravan la susceptibilidad a la erosión y a los movimientos en masa.

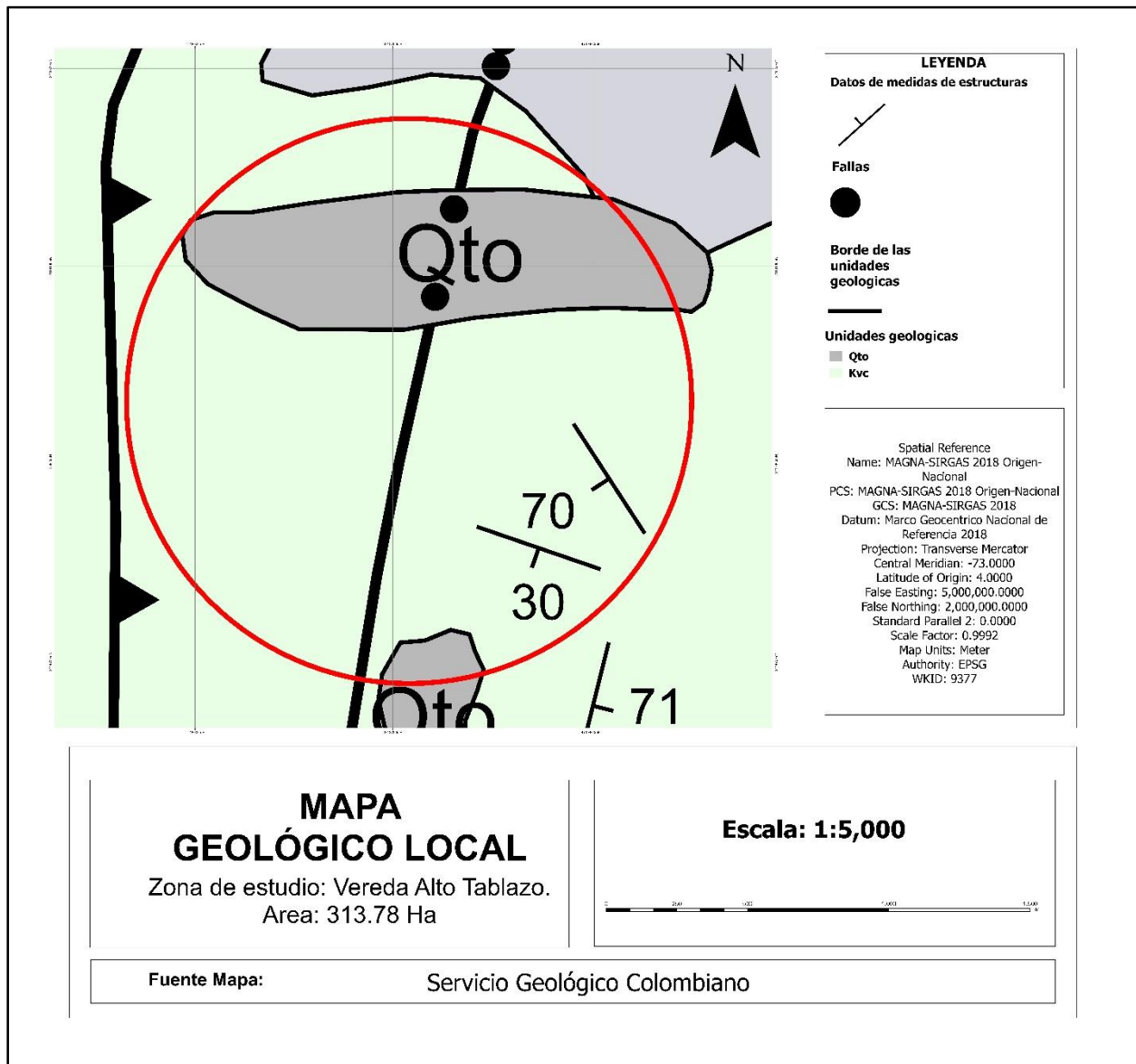
En esta zona se identifican afloramientos principalmente del Complejo Quebradagrande (miembro sedimentario), acompañado en menor medida por depósitos retrabajados de la Formación Casabianca. De acuerdo con Muñoz Rodríguez, (2015), la cárcava se encuentra sobre un sustrato de filitas silíceas y lodolitas grafitosas estratificadas, de tonalidad grisácea, que descansan sobre una capa inferior de cenizas volcánicas no consolidadas. Más profundamente, aflora un miembro ígneo plutónico basáltico-masivo, con textura afanítica y tonalidades verdosas, altamente afectado por meteorización.

La estructura interna de estas rocas se ve comprometida por la presencia de sistemas de diaclasas activas, con tendencias predominantes de fractura como N27W/37NE, N5W/85SW, N53E/40NW y N80E/80SE, lo que genera una red de debilidad que favorece la infiltración de agua y acelera la descomposición del material. En la base de la cárcava, luego del tercer dique de sedimentación, se identifica una zona de falla, caracterizada por cataclasitas, resultado de la trituración tectónica de las rocas (Muñoz Rodríguez, 2015b).

Por su parte, los depósitos de la Formación Casabianca se manifiestan en la cárcava como materiales volcanogénicos retrabajados, compuestos por sedimentos de grano grueso, ignimbritas y tobas, depositados por flujos provenientes de los volcanes Ruiz y Cerro Bravo. Estos materiales, originalmente dispuestos en ambientes fluviales, muestran una alta alteración química, lo que reduce su resistencia a la erosión, sobre todo en pendientes como las del Alto Tablazo (Naranjo & Ríos, 1989).

En términos litológicos, uno de los elementos más críticos en la evolución de la cárcava es la presencia de esquistos grafitosos altamente meteorizados, con bajo contenido de oxígeno, que conforman el sustrato del complejo metasedimentario. Estas rocas exhiben un comportamiento frágil, baja cohesión y gran facilidad de desintegración, lo cual contribuye directamente a la inestabilidad del terreno. Como lo afirma Muñoz Rodríguez (2015b), “la cárcava como tal no tiene suelo”, ya que el material superficial ha sido completamente removido por la acción erosiva, exponiendo directamente las unidades geológicas más débiles y propensas al colapso.

Figura 17
Mapa geología local



7.1.3 Factores climáticos

El comportamiento climático del sector del Alto Tablazo, en Manizales, tiene una influencia determinante sobre los procesos de erosión y remoción en masa que caracterizan la evolución de la cárcava. El régimen de precipitaciones en esta zona es elevado, con valores máximos que oscilan entre los 260 mm y 270 mm mensuales, según lo registrado en los estudios del corredor Manizales–

Chinchiná (Duque Bernal, 2006a). Estos volúmenes de lluvia coinciden con sectores considerados de alta criticidad geodinámica, como la Cárcava del Tablazo y el sector de La Uribe.

Estos valores de precipitación se sitúan dentro de los rangos de alerta establecidos por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), la cual clasifica como alerta naranja un acumulado de 200 mm mensuales y como alerta roja cuando se supera la barrera de 300 mm (Duque Bernal, 2006a). En consecuencia, el Alto Tablazo se encuentra frecuentemente en condiciones cercanas al umbral de riesgo hidrometeorológico, especialmente durante las temporadas de lluvias asociadas a los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña.

No obstante, se ha demostrado que la cantidad de precipitación por sí sola no basta para explicar completamente los eventos de inestabilidad del terreno. Áreas con registros pluviométricos mayores no necesariamente presentan niveles de afectación comparables al Alto Tablazo, lo cual indica que es necesario considerar la interacción con factores como la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal (Duque Bernal, 2006a).

Finalmente, se destaca que la presencia de vegetación densa reduce la vulnerabilidad frente a movimientos en masa, gracias a la función de estabilización que cumplen las raíces sobre el suelo, así como la capacidad de disminuir la velocidad del escurrimiento superficial. En este sentido, la pérdida de cobertura vegetal en la cárcava ha amplificado la acción de la lluvia sobre el sustrato, favoreciendo el avance del fenómeno erosivo (Duque Bernal, 2006).

7.1.4 Factores hidrológicos

La cárcava del Alto Tablazo se localiza dentro de la microcuenca de la quebrada El Salado, un sistema hídrico que ha sido significativamente alterado por condiciones morfohidrológicas, tanto naturales como antrópicas. El área presenta una alta densidad de drenaje, con un valor de 1.29 km/km², lo que significa que por cada kilómetro cuadrado de terreno existen 1.29 kilómetros de cauces fluviales. Este valor, considerado elevado, sugiere una red activa de escorrentía superficial con una baja capacidad de infiltración (Duque Bernal, 2006a). Aunque el estudio de Duque Bernal (2006a) indica que no siempre existe una correlación directa entre la densidad de drenaje y la vulnerabilidad, en zonas como el Tablazo se observa que esta red hidrográfica favorece la erosión. En particular, el régimen torrencial de la quebrada El Salado y sus afluentes, combinado

con pendientes pronunciadas, facilita el transporte de sedimentos y la socavación progresiva de laderas.

La acción hídrica se ve agravada por la intervención antrópica, que ha modificado la capacidad de infiltración del suelo. La remoción de la cobertura vegetal, el uso agropecuario intensivo y la urbanización sin planificación han generado condiciones favorables para el aumento del escurrimiento superficial, provocando procesos como el truncamiento de perfiles de suelo, coluviamiento de cauces menores y degradación estructural del (Duque Bernal, 2006a)

Además, a nivel regional, el comportamiento hídrico ha sido influido por infraestructuras como la bocatoma de Montevideo y las plantas hidroeléctricas de la CHEC, que alteran los caudales medios del río Chinchiná y modifican su régimen natural, con implicaciones sobre los procesos de erosión en zonas intermedias como el Alto Tablazo (Duque Bernal, 2006a)

7.1.5. Factores ambientales

La vereda Alto Tablazo, ubicada en el Corregimiento Agroturístico de Manizales, presenta una notable degradación ambiental resultado de décadas de intervención antrópica no planificada. De acuerdo con el *Diagnóstico por Corregimientos del POT Manizales 2017–2031*, esta vereda se localiza dentro de un sector de alto valor ambiental por la presencia de coberturas naturales fragmentadas, relictos de bosques secundarios y relictos de guaduales, que cumplen una función crítica en la regulación hídrica y la estabilidad de las pendientes (Villada Marín, 2013).

Sin embargo, la transformación del paisaje producto del avance de actividades agropecuarias —en especial la ganadería extensiva y el cultivo de caña panelera— ha generado una pérdida progresiva de cobertura vegetal, disminuyendo la capacidad del ecosistema para retener humedad y absorber el impacto de las lluvias intensas. Este deterioro ha sido particularmente evidente en zonas como la cárcava del Alto Tablazo, donde el uso intensivo del suelo y la deforestación han eliminado completamente los horizontes edáficos superiores, dejando al descubierto materiales meteorizados y poco cohesionados (Muñoz Rodríguez, 2015b).

Desde un enfoque morfoambiental, el estudio de Duque Bernal (2006a) identifica que las zonas más críticas de erosión y remoción en masa coinciden con sectores donde se ha perdido la cobertura vegetal protectora, en contraste con áreas donde se han realizado procesos de reforestación multiestrato, que han mostrado mejoras en la estabilidad del terreno. En el caso del

Alto Tablazo, esta relación es evidente, pues la pérdida de cobertura ha incrementado el escurrimiento superficial y la erosión lateral, acelerando la evolución de la cárcava.

A nivel municipal, el *POT Manizales 2017–2031* señala que el Corregimiento Agroturístico forma parte de la estructura ecológica principal rural, en la cual se identifican zonas de conectividad ecológica estratégicas para la conservación de especies y regulación hídrica. La pérdida de estas áreas debido a la expansión urbana irregular, la ocupación de zonas de amenaza y la ausencia de planificación ambiental está afectando la resiliencia ecológica del territorio.

En conjunto, los factores ambientales en el Alto Tablazo muestran una sinergia negativa entre pérdida de vegetación, presión antrópica y vulnerabilidad natural. Esto ha creado un escenario de alto riesgo geomorfológico, donde los ecosistemas locales no pueden cumplir sus funciones de protección, aumentando la susceptibilidad del terreno ante las lluvias y exacerbando los procesos de remoción en masa (Duque Bernal, 2006; Alcaldía de Manizales, 2014; Muñoz Rodríguez, 2015).

7.1.6 Factores antrópicos

La evolución de la cárcava del Alto Tablazo no puede entenderse sin considerar el impacto de las actividades humanas sobre el territorio. La vereda forma parte del Corregimiento Agroturístico de Manizales, caracterizado por un patrón de ocupación rural no planificado, con presencia significativa de viviendas dispersas, infraestructura básica deficiente y un modelo productivo centrado en la ganadería extensiva y la transformación artesanal de productos como la caña panelera (Villada Marín, 2013).

En la parte superior de la cárcava, uno de los sectores más críticos del proceso erosivo, se desarrolla pastoreo sin control y uso del suelo con fines agropecuarios en áreas de alta pendiente y fragilidad geológica. No existen obras de manejo de aguas de escorrentía, ni cobertura vegetal con especies arbóreas de raíces profundas que puedan estabilizar el terreno. Esta situación ha sido señalada de forma categórica en estudios técnicos: “No son buenos los usos que se le dan al suelo en la parte superior de la cárcava donde se presenta pastoreo y no hay ningún control de las aguas de escorrentía, ni tampoco se dispone de especies arbóreas con raíces que sirvan de refuerzo para el suelo” (Duque Bernal, 2006, pág. 64)

Además, la urbanización informal y antitécnica en el sector ha dado lugar a la construcción de viviendas en zonas de amenaza alta por deslizamiento, sin obras adecuadas de captación y

conducción de aguas lluvias ni redes de alcantarillado funcionales (Muñoz Rodríguez, 2015b) Esta ocupación desordenada ha incrementado la carga hidráulica sobre las laderas, acentuando el proceso de remoción en masa.

El *POT Manizales 2017–2031* identifica que gran parte del Alto Tablazo ha sido transformado por actividades que no se ajustan a la aptitud del suelo ni a las determinantes ambientales. De hecho, muchas áreas del corregimiento presentan uso no conforme con la zonificación del ordenamiento territorial, ocupando franjas de conservación ecológica, rondas hídricas y zonas de amenaza por fenómenos de remoción (Alcaldía de Manizales, 2014b).

En conjunto, la combinación de pastoreo intensivo, deforestación, urbanización no planificada y ausencia de manejo hídrico configura un escenario en el que los factores antrópicos actúan como detonantes directos del avance de la cárcava, interfiriendo con los procesos naturales de estabilización del terreno y generando un entorno de alto riesgo para las comunidades rurales e infraestructura cercana.

7.1.7 Procesos erosivos

La cárcava del Alto Tablazo constituye un ejemplo avanzado de erosión hídrica severa, resultado de la interacción entre condiciones geológicas, climáticas, topográficas y antrópicas. El proceso erosivo ha estado activo por más de cinco décadas y ha generado la pérdida progresiva del suelo superficial, afectando tanto ecosistemas locales como infraestructuras y asentamientos rurales (Muñoz Rodríguez, 2015b). Este fenómeno se desarrolla dentro de un contexto morfodinámico caracterizado por pendientes entre 15° y 50°, una alta pluviosidad y una litología frágil y fácilmente desintegrable.

Desde el punto de vista geomorfológico, la cárcava constituye una forma de erosión lineal profunda, que ha evolucionado por concentración del escurrimiento superficial en cauces mal protegidos, los cuales han socavado el terreno removiendo grandes volúmenes de material. La litología local, presenta una alta meteorización y baja cohesión, facilitando la remoción y transporte del material. En muchas zonas de la cárcava, el material fino ha sido completamente arrastrado, dejando expuestas capas más profundas de roca alterada. Además, el área se encuentra afectada por una red de diaclasas y fracturas que incrementan la infiltración del agua y debilitan aún más el

sustrato, contribuyendo a la generación de procesos de socavación lateral y colapso de laderas internas.

7.1.8 Infraestructuras expuestas

La evolución progresiva de la cárcava del Alto Tablazo ha tenido un impacto directo y sostenido sobre la infraestructura física del territorio, afectando viviendas, vías rurales, establecimientos comerciales y áreas productivas. Según el análisis de *Muñoz Rodríguez, (2015)*, la pérdida de infraestructura en el área afecta principalmente a:

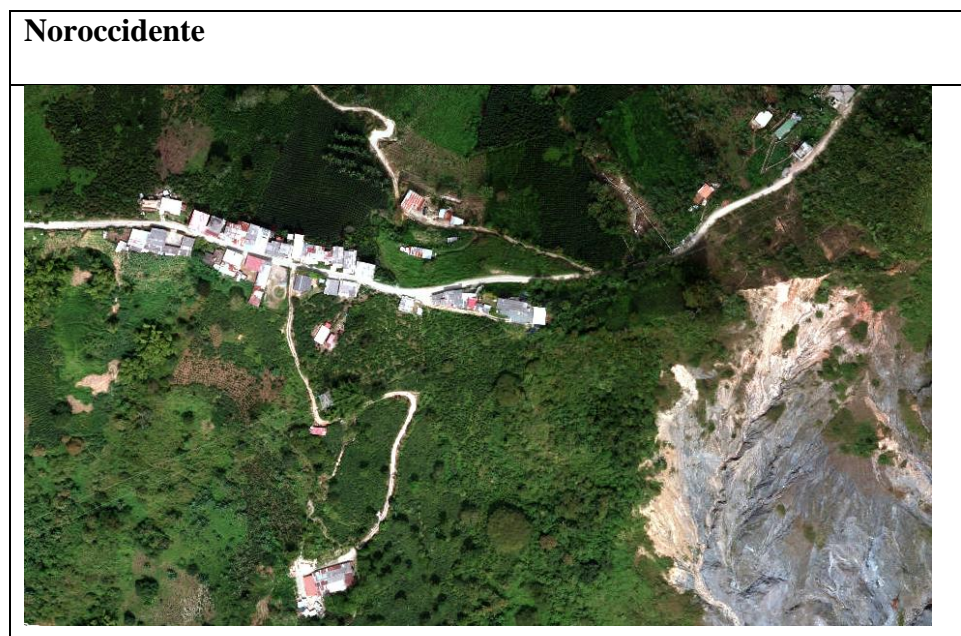
La red vial rural, destacando la desaparición de parte de la vía que conecta las veredas Alto Tablazo y Guacas, una ruta fundamental para la movilidad local.

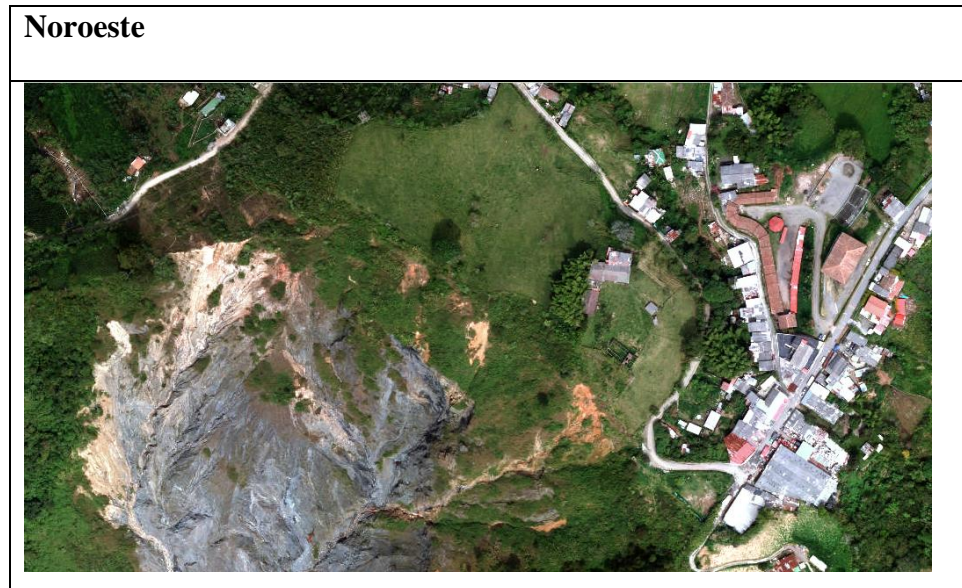
Aproximadamente 7 hectáreas de cultivos de café en la vereda Guacas, afectando directamente la economía agropecuaria de las familias rurales.

Cinco viviendas en Guacas y seis edificaciones en la vereda Alto Tablazo, de las cuales dos corresponden a establecimientos comerciales y una a una vivienda comercial (tienda).

Una vivienda adicional en el barrio Gutiérrez, evidencia de que el efecto de la cárcava trasciende los límites estrictamente rurales.

Figura 18
Infraestructura expuesta





Nota. Tomado de Alcaldía de Manizales (2022)

Además de estas pérdidas materiales, se han desarrollado diferentes tipos de obras de ingeniería civil para contener la progresión de la cárcava, con resultados limitados. Entre 2006 y 2007 se implementaron dientes de sedimentación en concreto con vertederos hidrodinámicos, estructuras de aproximadamente 20 metros de altura, como parte de una estrategia de control hidráulico. Posteriormente, en 2011, se complementaron estas obras con pantallas pasivas y pernos de anclaje (Muñoz Rodríguez, 2015b)

No obstante, el diagnóstico actual de estas intervenciones evidencia que la mayoría se encuentra deteriorada o fuera de funcionamiento. Los pernos presentan daños estructurales, fracturas e incluso ausencia en sus puntos de anclaje originales. Asimismo, las aguas de escorrentía no están siendo correctamente desviadas ni canalizadas, lo que ha llevado al colapso parcial de varias obras y la reactivación de procesos de remoción en masa, intensificando el retroceso y ensanchamiento de la cárcava.

El caso del Alto Tablazo pone de manifiesto los altos costos de mantenimiento y baja efectividad de las soluciones de ingeniería convencional, particularmente en terrenos con condiciones geológicas y climáticas tan adversas. La ausencia de alternativas basadas en infraestructura verde o soluciones bioingenieriles, más adaptables y sostenibles, ha limitado la capacidad institucional para mitigar los efectos de esta amenaza geodinámica.

Figura 19*Obras de contención deterioradas*

Nota. Tomado de Muñoz Rodríguez (2015)

7.2 Clasificación supervisada y análisis multitemporal


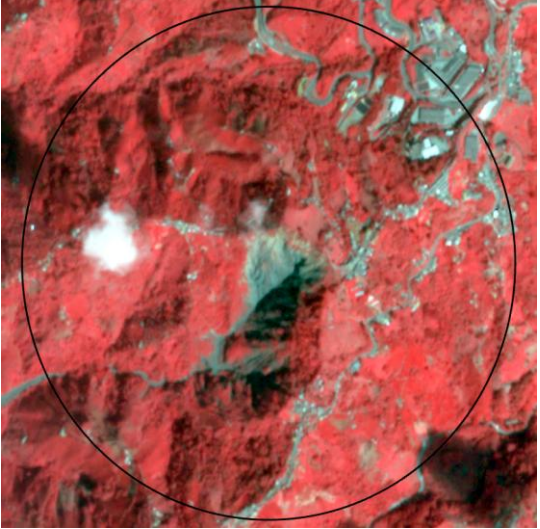
El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir del análisis multitemporal de las coberturas del suelo en la zona de influencia de la cárcava del Alto Tablazo, para los años 2016, 2020 y 2024. A través del procesamiento de imágenes satelitales PlanetScope y el uso de técnicas de clasificación supervisada en entorno SIG, fue posible identificar, cuantificar y comparar los cambios espaciales y temporales en cuatro clases de cobertura: Zonas Urbanizadas (ZU), Bosque (BO), Vegetación baja (VB) y Suelo Desnudo (SD).

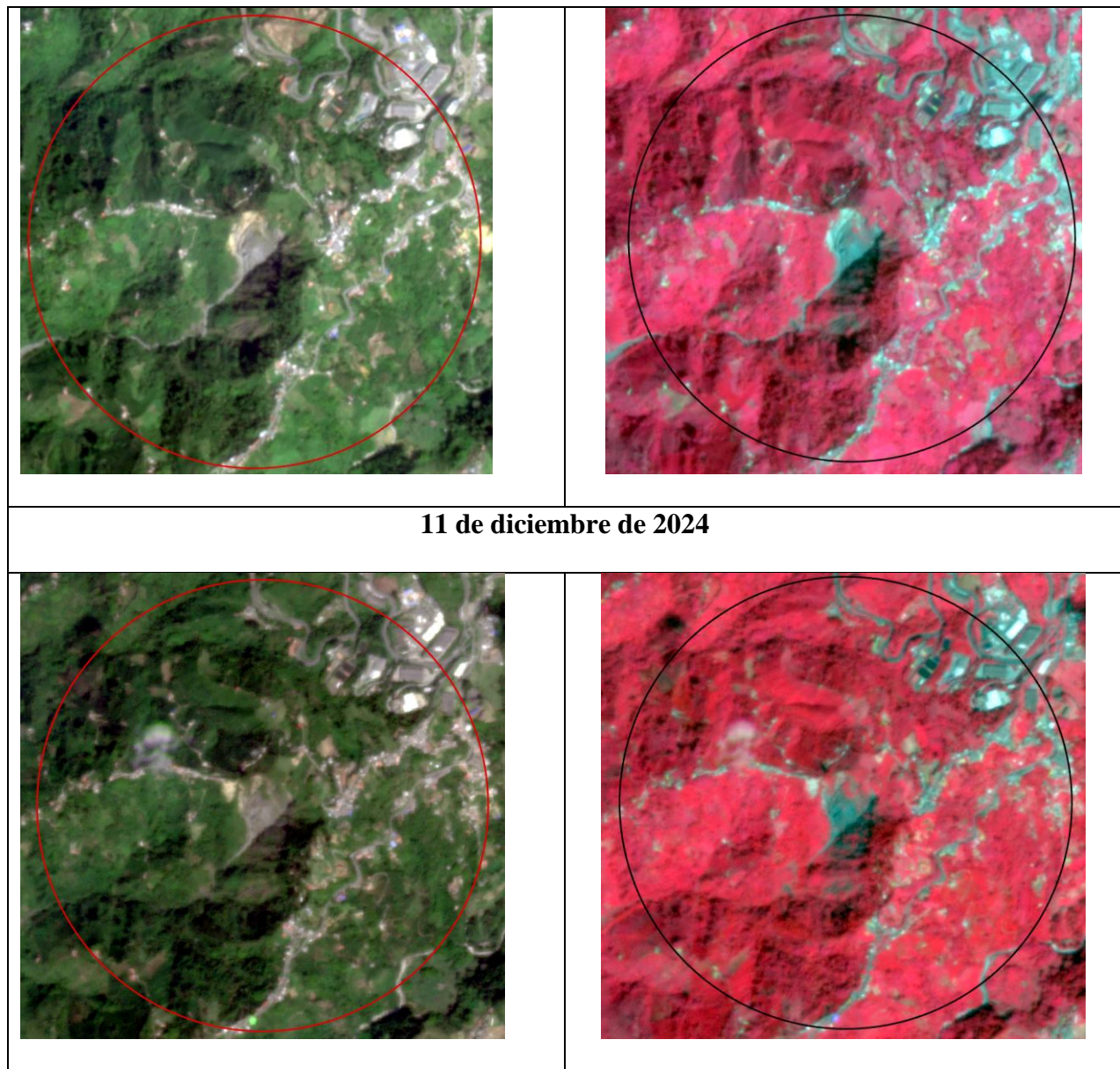
Este análisis permitió establecer patrones de transformación territorial, evidenciar procesos de pérdida de cobertura vegetal y expansión de áreas erosionadas, así como cuantificar la magnitud y dirección de los cambios mediante matrices de transición. La integración de estos resultados con la caracterización geológica, climática e hidrológica de la zona ofrece una comprensión más completa de los factores que inciden en la evolución geomorfológica de la cárcava, y constituye una base sólida para el diseño de estrategias de mitigación y gestión del riesgo.

A continuación, se presentan las imágenes satelitales PlanetScope correspondientes a los años 2016, 2020 Y 2024, tomadas en época seca para facilitar la interpretación visual. Estas imágenes en crudo permiten observar los patrones generales de cobertura y constituyen la base para los procesos de clasificación supervisada desarrollados en esta investigación.

Tabla 8

Imágenes PlanetScope (Color natural - Falso color)

Color Natural	Falso Color
18 de diciembre de 2016	
	
22 de noviembre de 2020	



A partir del uso de estas imágenes se tomaron las muestras que permitieron realizar la clasificación supervisada para el área de estudio que dio como resultado:

Figura 20
Mapa de coberturas 2016

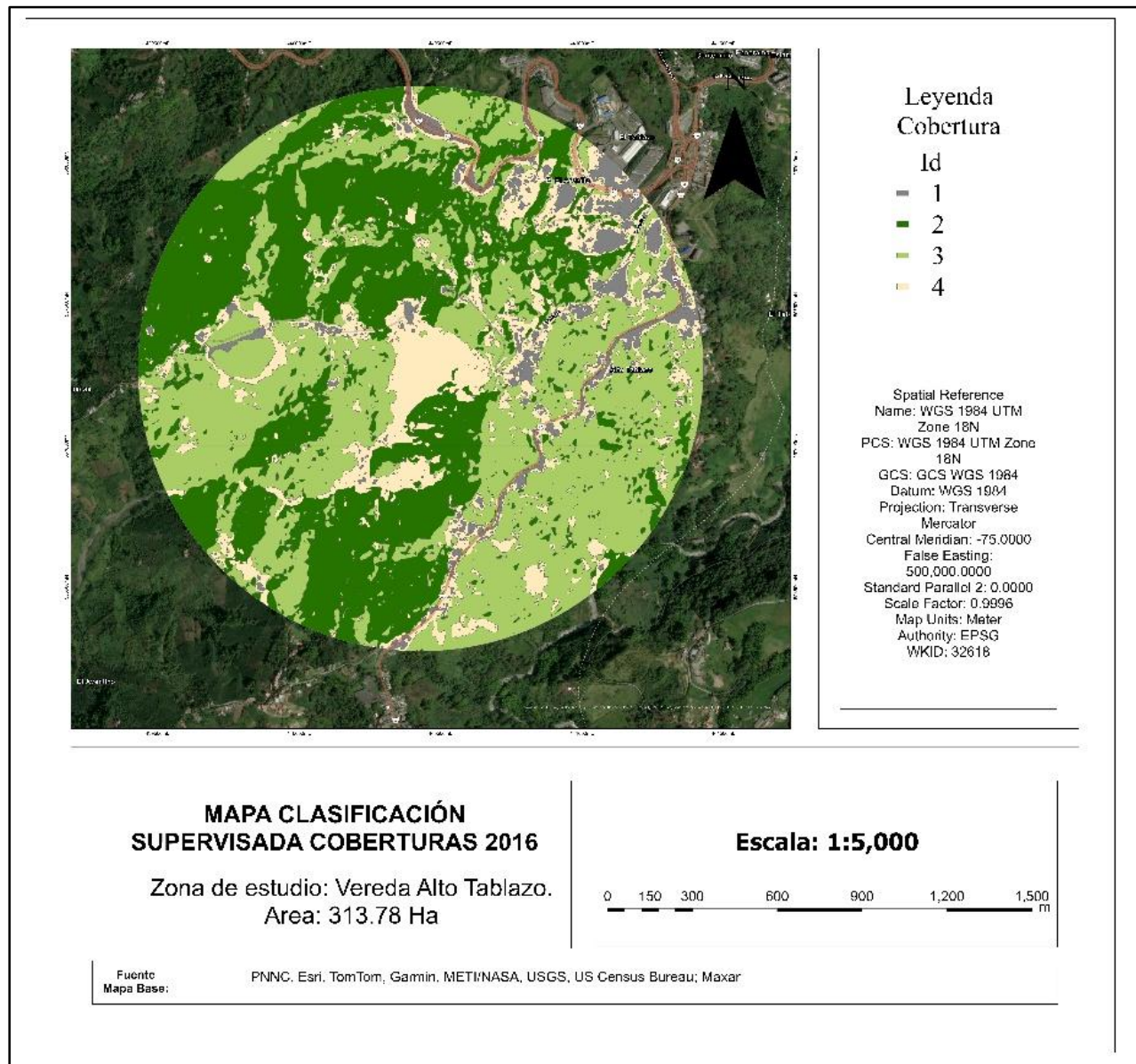


Figura 21
Mapa de coberturas 2020

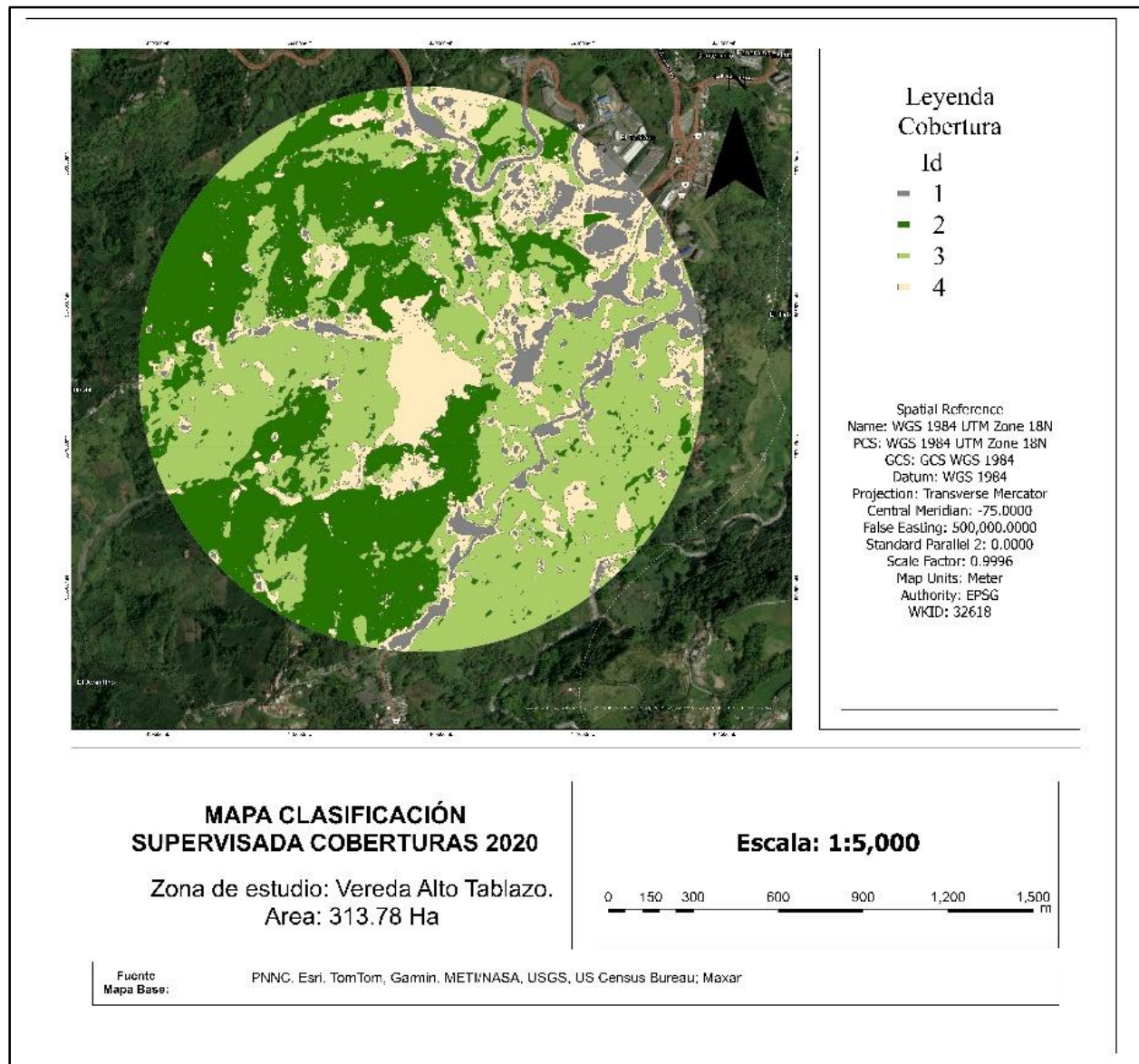
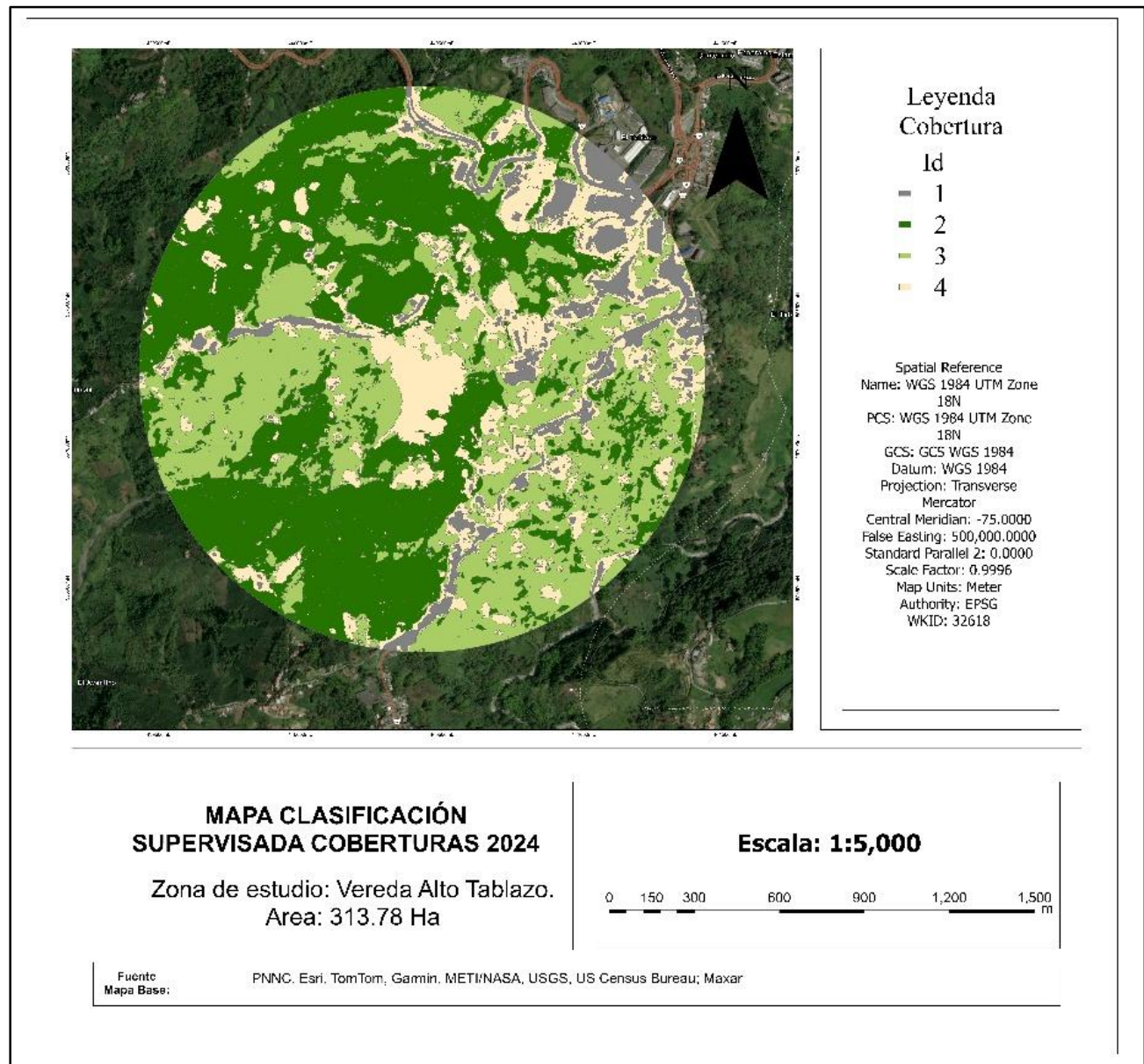


Figura 22
Mapa de coberturas 2024



La Tabla 9 presenta la evolución temporal de las coberturas del suelo en el área de estudio, correspondiente a la vereda Alto Tablazo, durante los años 2016, 2020 y 2024. Se muestra tanto el área absoluta en hectáreas como el porcentaje que representa cada clase frente al total de 313.78 ha del área de análisis, permitiendo observar las tendencias de transformación del territorio.

Tabla 9*Cambio de cobertura (2016 - 2024)*

Cobertura	Código	Área					
		2016	% - 2016	2020	% - 2020	2024	% - 2024
Zonas urbanizadas	1	15.27	4.87%	21.81	6.95%	21.62	6.89%
Bosque	2	116.76	37.21%	105.26	33.55%	131.61	41.94%
Áreas con vegetación herbácea y /o arbustiva	3	134.32	42.81%	130.13	41.47%	105.72	33.69%
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	4	47.43	15.12%	56.58	18.03%	54.84	17.48%
TOTAL		313.78	100.00%	313.78	100.00%	313.78	100.00%

Los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada muestran cambios significativos en la cobertura del suelo de la vereda Alto Tablazo durante el periodo de estudio. En 2016 predominaban las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (42.81%) y las zonas boscosas (37.21%), lo cual reflejaba una cobertura vegetal considerable en el área, pero fragmentada e intervenida.

Zonas urbanizadas (ZU): Se observa un crecimiento del 4.87% al 6.89% entre 2016 y 2024. Aunque la magnitud puede parecer moderada, representa una tendencia significativa en un territorio con alta fragilidad geológica y ambiental, donde la ocupación humana incrementa la vulnerabilidad al riesgo de deslizamientos y erosión.

Bosque (BO): Aunque en 2020 esta cobertura disminuyó (33.55%), en 2024 muestra una recuperación importante hasta el 41.94%, lo que podría reflejar procesos de revegetalización natural o cambios en la dinámica de uso del suelo. Esta recuperación es clave en la estabilización de laderas y en la mitigación de la expansión de la cárcava.

Vegetación herbácea y/o arbustiva (VB): Muestra una disminución constante, pasando de 42.81% en 2016 a 33.69% en 2024. Este descenso puede estar asociado a procesos de degradación progresiva del suelo o a la conversión de estas áreas en zonas abiertas sin vegetación.

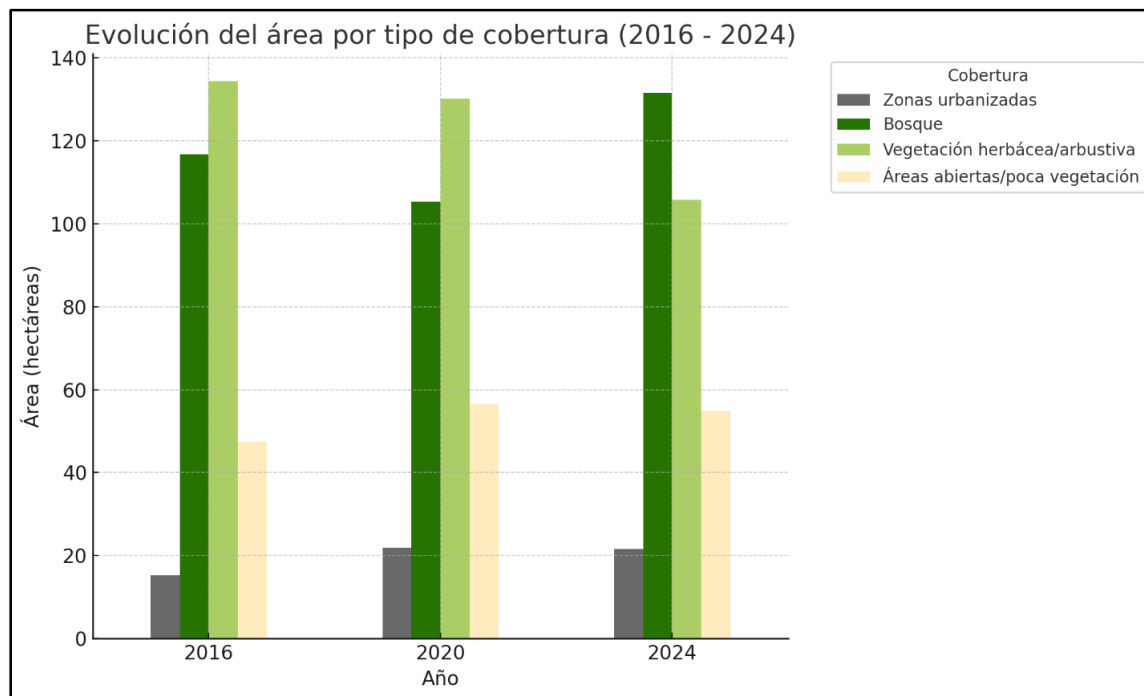
Áreas abiertas, sin o con poca vegetación (SD): Se incrementan de 15.12% en 2016 a 17.48% en 2024, lo cual confirma la tendencia de pérdida de cobertura vegetal y aumento de

superficies desnudas, especialmente en zonas cercanas a la cárcava, lo que agrava los procesos de erosión y desestabilización del terreno.

La Figura 23 muestra la evolución del área ocupada por cada tipo de cobertura del suelo en la vereda Alto Tablazo entre los años 2016, 2020 y 2024. A partir de los resultados de la clasificación supervisada, se evidencian variaciones significativas en la extensión de las distintas coberturas, destacándose el lento pero progresivo aumento de las zonas urbanizadas y las áreas abiertas con poca o nula vegetación. Además, como para los años 2016 – 2020 la vegetación herbácea era la cobertura con mayor representación en el área de estudio por encima del bosque, lo que indica gran fragmentación de la conectividad ecológica, pero para el año 2024, los bosques la superan lo que puede indicar procesos de reforestación.

Figura 23

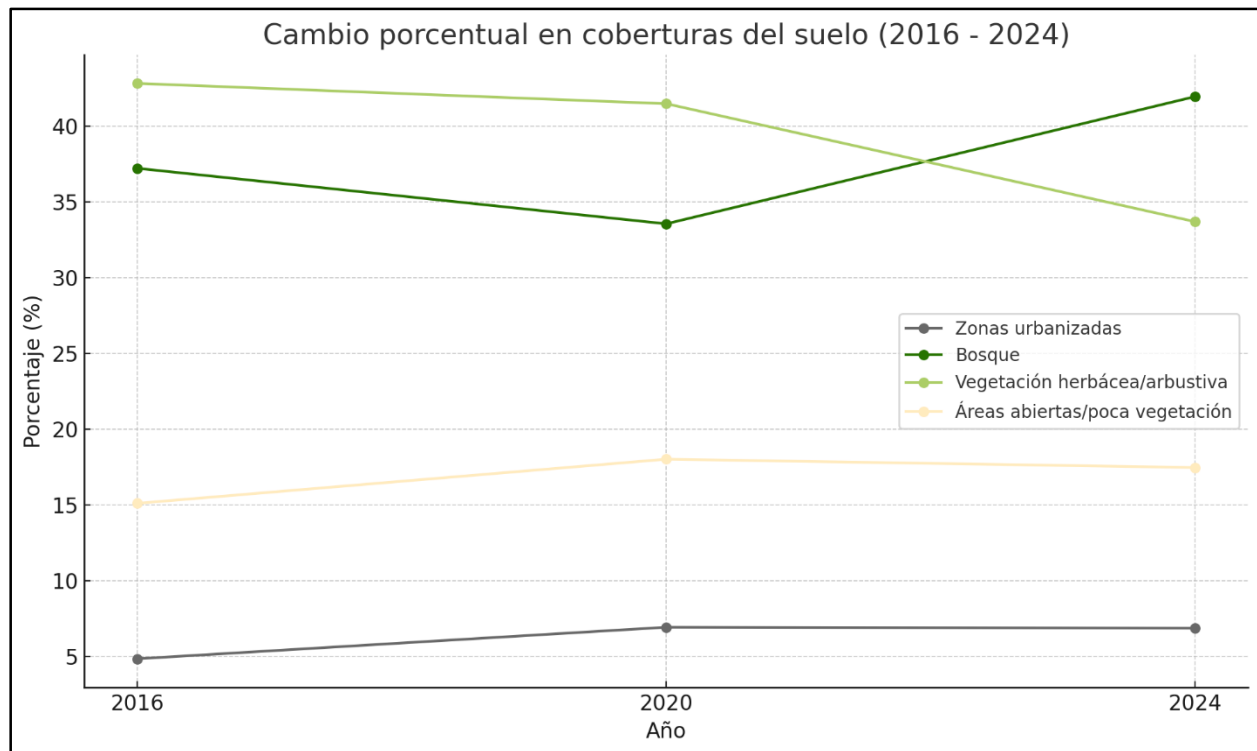
Evolución del área por tipo de cobertura (2016 - 2024)



La Figura 24 presenta el cambio porcentual en la cobertura del suelo en el área de estudio entre los años 2016 y 2024. Esto permite visualizar de forma sintética las variaciones relativas en cada una de las clases de cobertura. Se observa un crecimiento porcentual en las zonas urbanizadas y las áreas abiertas con poca vegetación, lo cual puede estar asociado a procesos de expansión

antrópica y degradación ambiental. En contraste, las coberturas de vegetación herbácea y arbustiva muestran una reducción considerable, en contraparte el bosque presenta una leve recuperación que coincide con la caída de la vegetación herbácea, posiblemente áreas que abandonadas o estabilizadas.

Figura 24
Cambio porcentual en coberturas del suelo (2016 - 2024)



La siguiente sección presenta las matrices de transición de cobertura del suelo para los periodos 2016–2020 y 2020–2024, las cuales permiten identificar y cuantificar los cambios ocurridos entre las diferentes clases de cobertura dentro del área de estudio. Estas matrices evidencian los flujos de transformación entre clases, diferenciando tanto las superficies que permanecen estables como aquellas que han experimentado cambios significativos. Esta herramienta es fundamental para entender la dinámica del paisaje y su relación con los procesos erosivos en curso en la cárcava del Alto Tablazo. Los valores diagonales indican persistencia, mientras que los valores fuera de diagonal reflejan transiciones entre categorías.

Tabla 10*Matriz de transición de coberturas del suelo 2016 – 2020 (Ha)*

AÑO		2020				
AÑO	Cobertura	Cobertura	ZU	BO	VB	SD
2016	Valor	Valor	1	2	3	4
	ZU	10	11.26	0.18	0.46	3.37
	BO	20	0.51	88.59	15.93	11.73
	VB	30	1.78	13.07	102.90	16.57
	SD	40	8.26	3.42	10.83	24.92

La evolución de las coberturas del suelo entre los años 2016 y 2020 evidencia tanto fenómenos de transformación como de estabilidad. Según la matriz de transición (Tabla 10), un total de 227.68 hectáreas conservaron su cobertura en ese periodo, lo que equivale a un 72.56 % de conservación, indicando una alta permanencia en varias clases de uso del suelo.

Las zonas urbanizadas (ZU) aumentaron su superficie de 15.27 ha en 2016 a 21.81 ha en 2020 (ver Tabla 9), un cambio coherente con los procesos de crecimiento urbano. Sin embargo, las transiciones inversas —de zonas urbanas a coberturas vegetales— muestran valores bajos: de ZU a bosque (12) 0.18 ha, a vegetación herbácea (13) 0.46 ha, y a áreas abiertas (14) 3.37 ha. Estos valores, si bien son reducidos, podrían explicarse más por limitaciones en la resolución del sensor (3 m) o por errores de clasificación espectral que por verdaderos procesos de desurbanización, poco frecuentes en contextos rurales. En particular, la cobertura con mayor intercambio con las zonas urbanas es la de áreas abiertas (SD), lo que sugiere que, por la cercanía espacial entre estas coberturas, las confusiones en la clasificación pueden incrementarse.

En cuanto al bosque (BO), su superficie disminuyó de 116.76 ha a 105.26 ha, con una pérdida neta de 11.5 ha. Esta transformación se explica principalmente por la conversión a vegetación herbácea (23) con 15.93 ha, y a áreas abiertas (24) con 11.73 ha, lo que sugiere un proceso de degradación vegetal progresivo. Aun así, se observa una estabilidad relevante, pues 88.59 ha permanecieron como bosque (22), lo que representa una porción importante del total original.

La vegetación herbácea y/o arbustiva (VB) se mantuvo relativamente constante: 134.32 ha en 2016 frente a 130.12 ha en 2020. Este comportamiento se debe al equilibrio entre pérdidas y ganancias: perdió 16.57 ha hacia áreas abiertas (34), pero ganó 13.07 ha provenientes de bosque

(32). Esta dinámica revela una complementariedad entre coberturas intermedias, que permite mantener cierta estabilidad en la cobertura vegetal media, reflejada también en los flujos 23 ↔ 32.

Las áreas abiertas (SD) incrementaron su superficie de 47.43 ha a 56.58 ha, y aunque esta clase muestra un cambio neto positivo, su dinámica interna es lo más relevante: 24.92 ha conservaron su cobertura (44), pero también recibió transformaciones desde vegetación herbácea (34) y bosque (24), lo cual sugiere procesos de erosión progresiva o pérdida de cobertura vegetal.

En conjunto para la transición entre 2016 y 2020, los datos reflejan que los cambios no son homogéneos, pero sí siguen patrones consistentes con las observaciones en campo. La alta permanencia en la diagonal de la matriz refuerza la existencia de estabilidad relativa, mientras que las transiciones más marcadas ocurren entre coberturas ecológicamente próximas, como de bosque a vegetación arbustiva o de esta a áreas abiertas. Esto indica que, más que reemplazos drásticos, se presentan transiciones graduales dentro del gradiente de cobertura del suelo.

Tabla 11

Matriz de transición de coberturas del suelo 2020 – 2024 (Ha)

		AÑO 2024				
AÑO	Cobertura	Valor	ZU	BO	VB	SD
2020	ZU	10	15.10	0.19	0.65	5.87
	BO	20	0.18	93.32	6.70	5.06
	VB	30	0.67	27.88	86.09	15.48
	SD	40	5.66	10.21	12.28	28.42

La dinámica de cambios de cobertura del suelo entre 2020 y 2024 refleja una combinación de procesos de transformación activa y estabilidad estructural en el área de estudio. De acuerdo con la matriz de transición (Tabla 11), un total de 232.08 ha conservaron su clase original, lo que equivale a un 74.0 % de permanencia, valor ligeramente superior al periodo anterior (2016–2020), lo cual puede interpretarse como una mayor consolidación de ciertos patrones de uso del suelo.

La cobertura de zonas urbanizadas (ZU) pasó de 21.81 ha en 2020 a 21.62 ha en 2024 (Tabla 8), mostrando una leve reducción. Sin embargo, al observar la matriz, se nota que 15.10 ha se mantuvieron como ZU (valor 11), lo que representa el 69.3 % de persistencia. Las pérdidas hacia otras clases son bajas, destacando 5.87 ha hacia áreas abiertas (14), que podrían corresponder a

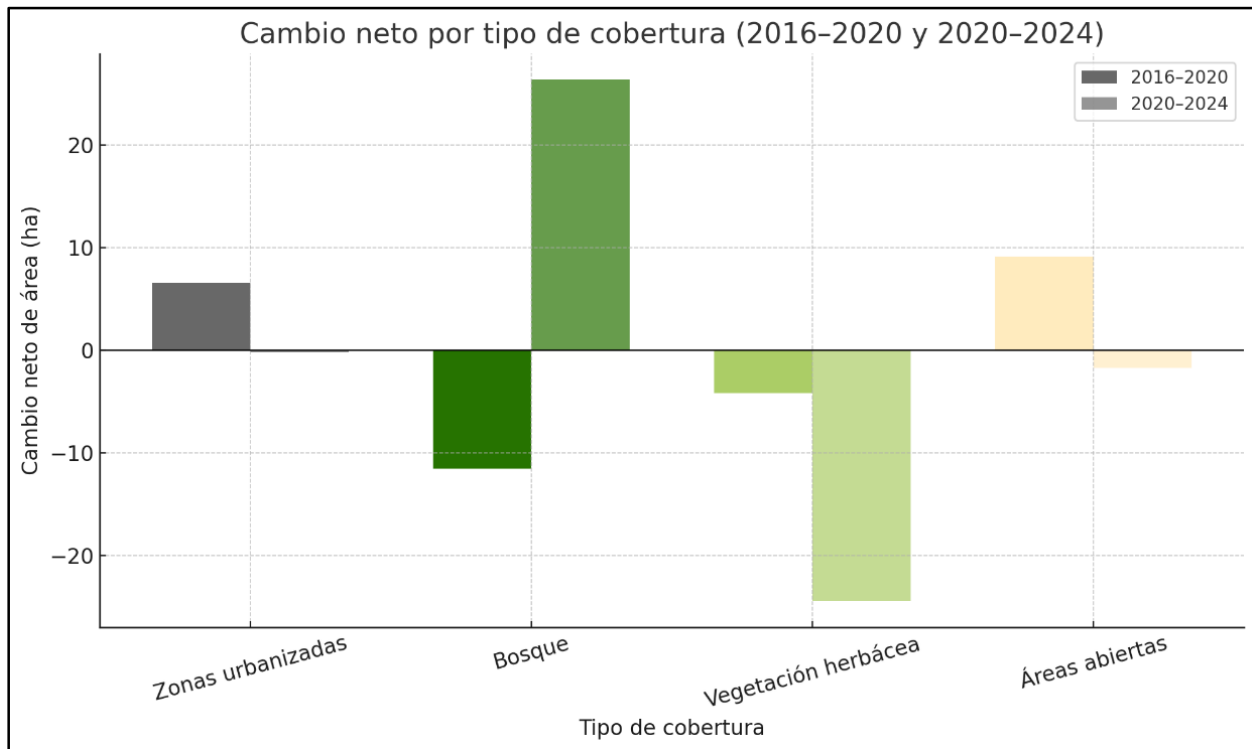
errores de clasificación o bordes de zonas urbanas no consolidadas, más que a una desurbanización real. Este comportamiento refuerza la hipótesis planteada en el análisis anterior sobre las limitaciones en la resolución del sensor (3 m), que puede generar confusiones en áreas con alta heterogeneidad espacial.

La clase bosque (BO) se recuperó parcialmente, aumentando de 105.26 ha a 131.61 ha. Este incremento se sustenta en la permanencia de 93.32 ha (22) y en los aportes de otras coberturas: recibió 27.88 ha desde vegetación herbácea (32) y 10.21 ha desde áreas abiertas (42). Estos flujos indican procesos de regeneración vegetal o revegetalización espontánea, probablemente asociados a periodos de menor intervención antrópica o a dinámicas de restauración ecológica.

La cobertura de vegetación herbácea y/o arbustiva (VB), en contraste, redujo su extensión de 130.13 ha a 105.72 ha, una pérdida de aproximadamente 24 ha. Si bien 86.09 ha permanecieron estables (33), la cobertura perdió superficie en dirección al bosque (32) y áreas abiertas (34), lo que puede indicar un proceso de fragmentación o transición hacia coberturas más degradadas.

Finalmente, las áreas abiertas (SD) también mostraron un ligero descenso en su superficie total (de 56.58 ha a 54.84 ha), pero sus flujos internos evidencian una alta movilidad: 28.42 ha permanecieron estables (44), mientras que recibió transformaciones desde vegetación herbácea (34) con 15.48 ha, y bosque (24) con 5.06 ha. Esto podría vincularse a episodios erosivos o pérdida de cobertura vegetal, especialmente en zonas con fuerte pendiente.

En síntesis, el periodo 2020–2024 muestra una tendencia a la regeneración del bosque y una disminución en coberturas intermedias, como la vegetación arbustiva, mientras las zonas abiertas mantienen una dinámica activa, con ganancias y pérdidas constantes. La diagonal dominante en la matriz de transición refleja nuevamente un grado importante de estabilidad, mientras que los flujos más relevantes se dan entre clases adyacentes en el gradiente de cobertura vegetal, lo que sugiere transiciones progresivas y coherentes con los patrones ecológicos del territorio.

Figura 25*Cambio neto por tipo de cobertura (2016 - 2020 y 2020 - 2024)*

El análisis comparativo de las coberturas del suelo entre los dos periodos permite observar dinámicas contrastantes que evidencian tanto procesos de transformación como de recuperación ambiental.

Zonas urbanizadas (ZU): Las áreas urbanas presentaron un crecimiento neto en ambos periodos, con un incremento de 6.54 ha entre 2016 y 2020, y una estabilización con una variación mínima de -0.19 ha entre 2020 y 2024. Esto refleja un proceso de urbanización activo hasta 2020, seguido por una fase de consolidación, lo que puede estar relacionado con límites naturales o normativos en la expansión urbana en la zona de estudio.

Bosque (BO): El bosque tuvo una pérdida considerable de 11.5 ha en el primer periodo, probablemente asociada a procesos de degradación, cambio de uso del suelo y presión antrópica. Sin embargo, entre 2020 y 2024 se registra una recuperación notable de 26.35 ha, lo cual podría estar relacionado con procesos de regeneración natural, abandono de usos agrícolas o medidas de conservación más eficaces.

Vegetación herbácea y/o arbustiva (VB): Esta cobertura mostró una reducción continua en ambos periodos: -4.20 ha entre 2016 y 2020, y -24.38 ha entre 2020 y 2024, lo que sugiere una pérdida progresiva de áreas de transición, posiblemente hacia áreas abiertas o zonas con mayor presión de uso y en el 2024 en la consolidación de proceso de regeneración, mencionados anteriormente.

Áreas abiertas sin o con poca vegetación (SD): Las áreas abiertas experimentaron un aumento neto de 9.15 ha en el primer periodo, lo que coincide con los efectos de procesos erosivos o deforestación. Posteriormente, registran una leve reducción de -1.74 ha, que, aunque no es significativa, podría indicar una cierta estabilización en la expansión de zonas degradadas.

7.3 Evaluación de impactos de cambio de cobertura y factores detonantes

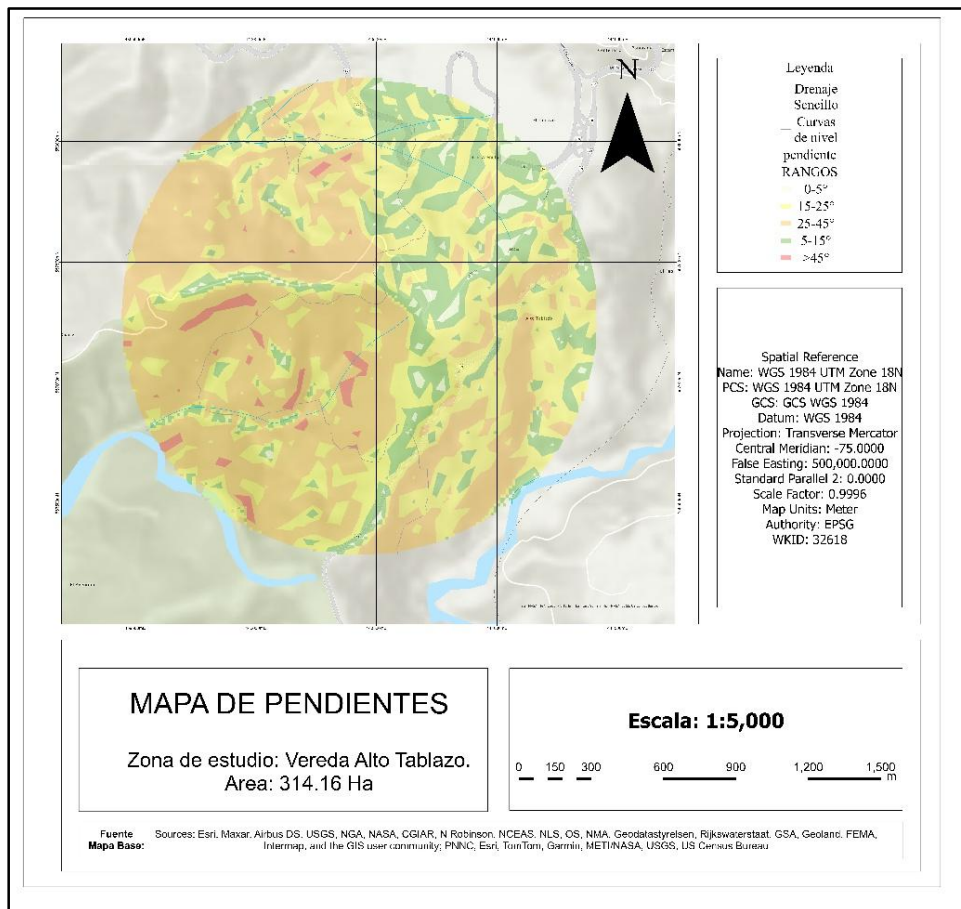
Los resultados presentados a continuación permiten establecer la relación entre los cambios en la cobertura del suelo y los factores detonantes de movimientos en masa en la cárcava del Alto Tablazo. Mediante el análisis combinado de pendientes, precipitación, cobertura vegetal (NDVI), cambios de cobertura (Objetivo 2), factores detonantes (Objetivo 1) y elementos expuestos, se busca comprender cómo estas variables influyen en la evolución del fenómeno erosivo y la amenaza que representa para la población y la infraestructura. A través de herramientas geoespaciales y técnicas estadísticas, se identifican comportamientos climáticos anómalos y patrones de pérdida o fragmentación de vegetación, que contribuyen al avance de la cárcava. Esta evaluación integral proporciona insumos clave para el diseño de medidas de mitigación y manejo del riesgo en la zona de estudio.

7.3.1 Pendiente

El mapa de pendiente realizado para la zona de estudio con un área total de 314.16 hectáreas (Figura 26), Evidencia la distribución de inclinaciones del terreno clasificadas en 5 rangos, cada uno representado por un color diferente. Se puede determinar que las zonas cercanas a cuerpos de agua presentan una pendiente plana a suave, mientras que en el centro del mapa se observa una concentración de mayor inclinación siendo más propensos a deslizamiento y a procesos erosivos.

La realización de este tipo de análisis es fundamental a la hora de realizar una adecuada planificación territorial, facilitando una toma de decisiones más eficiente y acertada.

Figura 26
Mapa de pendientes



7.3.2 Precipitación

La figura 27 de precipitación mensual acumulada permite identificar patrones de variabilidad climática interanual y estacional en el área de influencia de la cárcava del Alto Tablazo, con base en los datos registrados por la estación Villamaría - AUT del IDEAM.

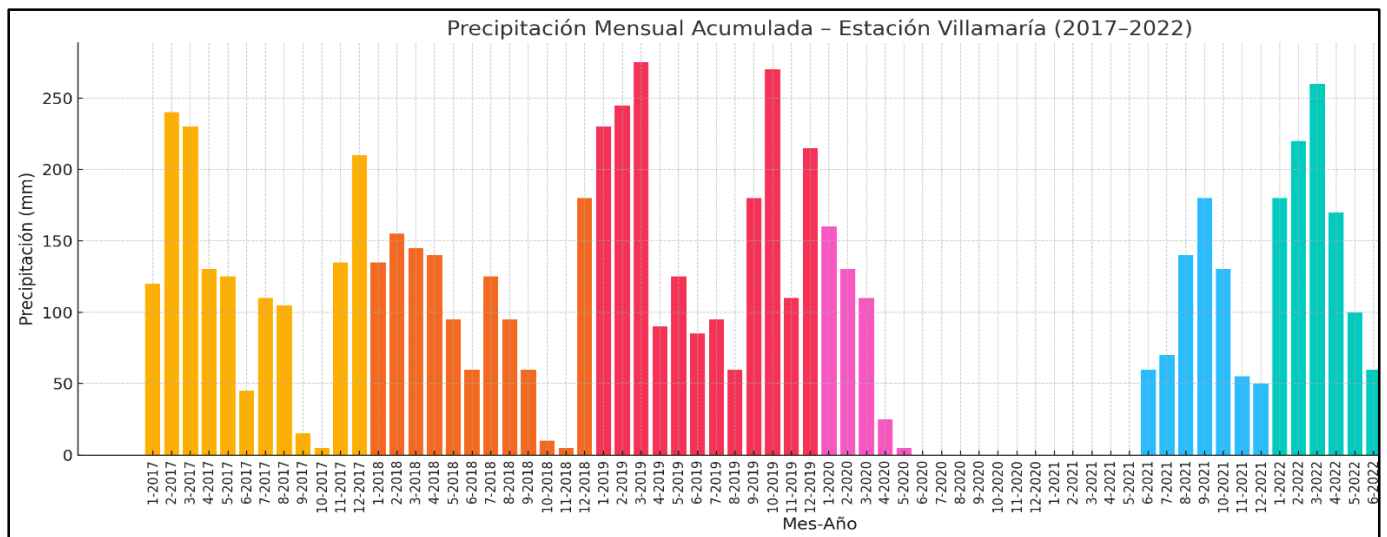
En general, se observa una estacionalidad marcada, con picos recurrentes de precipitación durante los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, coherentes con los dos periodos lluviosos característicos del clima bimodal de la región andina colombiana. Por ejemplo, años como 2017 y 2019 registraron acumulados mensuales superiores a los 250 mm en varios de estos meses, lo que

sugiere una alta probabilidad de saturación de suelos y, por tanto, un incremento en la susceptibilidad a movimientos en masa.

Un aspecto destacado es el comportamiento anómalo entre junio de 2020 y julio de 2021, periodo en el cual los registros de precipitación fueron nulos o significativamente bajos. Esta interrupción en la serie de datos probablemente obedece a fallas técnicas en la estación o interrupciones del sensor, más que a una disminución real de la lluvia, considerando los patrones históricos de la región. Este vacío representa una limitación importante en el análisis, pues impide la correlación directa entre precipitaciones y eventos de remoción en masa en ese intervalo.

Además, aunque el periodo de análisis de la cobertura del suelo va de 2016 a 2024, los registros climáticos disponibles solo abarcan desde enero de 2017 hasta septiembre de 2022, lo que restringe la capacidad de evaluar la influencia directa de eventos extremos ocurridos antes o después de dicho rango. Sin embargo, los datos disponibles son suficientes para identificar la incidencia de la precipitación en la zona de estudio y su influencia en los procesos erosivos que afectan la cárcava.

Figura 27
Precipitación Mensual Acumulada (2017 - 2022)



7.3.3 Cobertura Vegetal (NDVI)

Con el fin de evaluar el estado y la evolución de la cobertura vegetal en la zona de estudio, se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) a las imágenes satelitales

PlanetScope. Este índice, al utilizar la relación entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo, permite diferenciar áreas con vegetación densa, media o escasa, facilitando así la identificación de zonas susceptibles a degradación o erosión.

Los resultados fueron reclasificados en tres clases principales: baja vegetación ($NDVI < 0.2$), vegetación media ($0.2-0.4$) y alta vegetación ($NDVI > 0.4$), siguiendo una adaptación de la propuesta metodológica de Jensen (2007). Esta reclasificación permite una interpretación más precisa del vigor vegetal en el área de estudio, especialmente en sectores como la cárcava del Alto Tablazo, donde la cobertura vegetal juega un papel fundamental en la estabilidad del terreno a continuación se presentan los mapas correspondientes al cálculo de NDVI de los años estudiados.

Figura 28
Mapa de NDVI - 2016

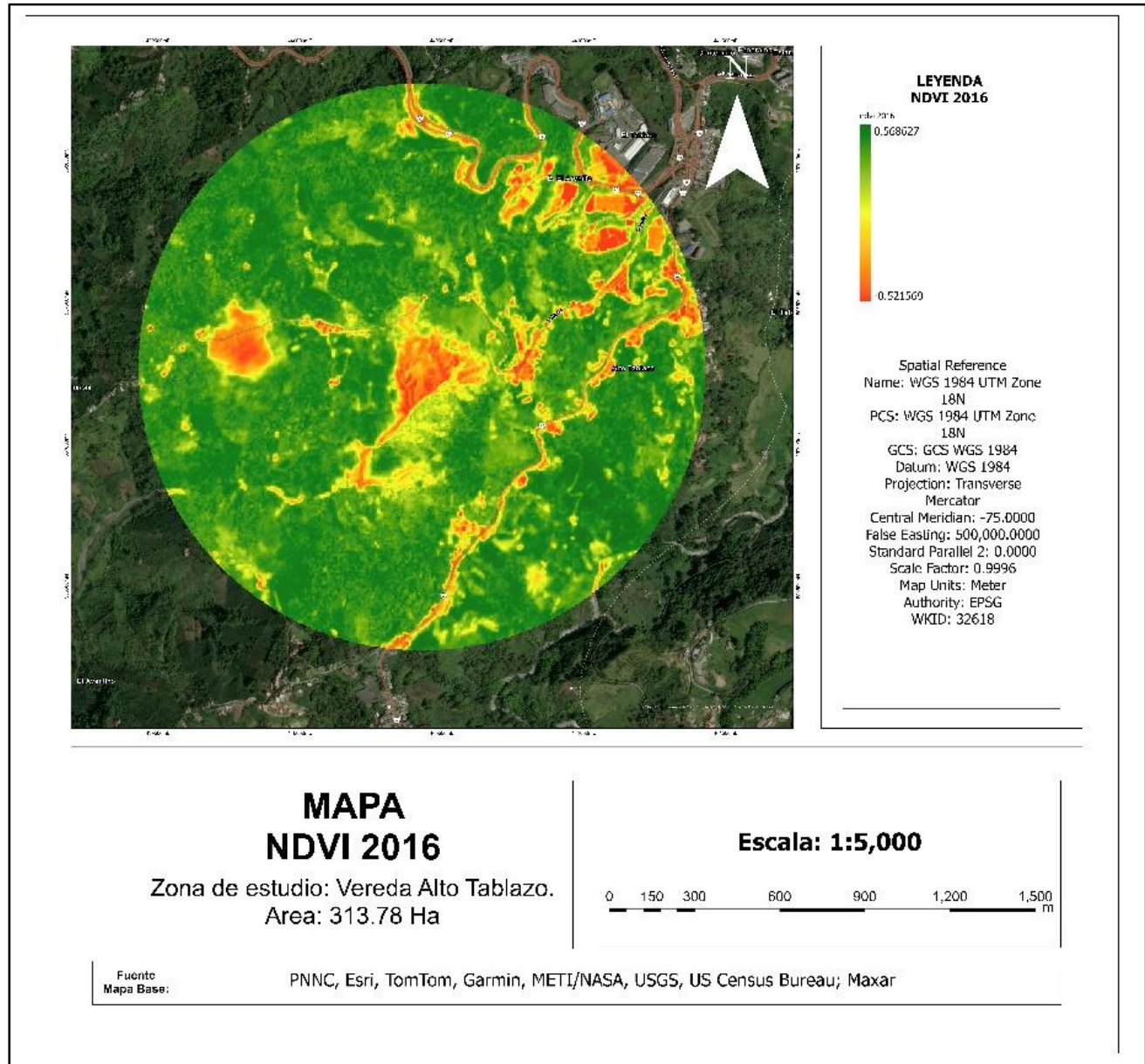


Figura 29
Mapa de NDVI - 2020

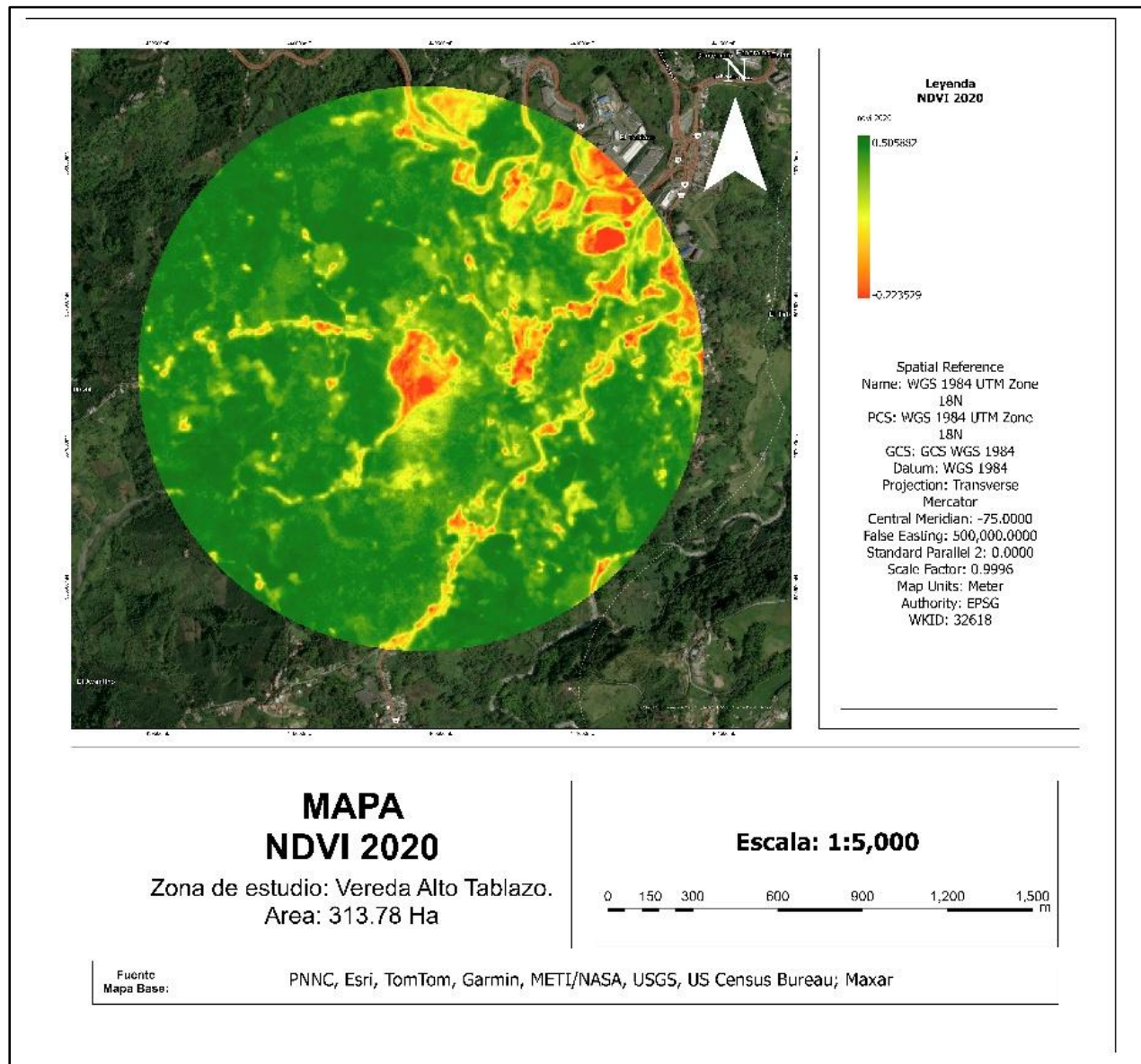
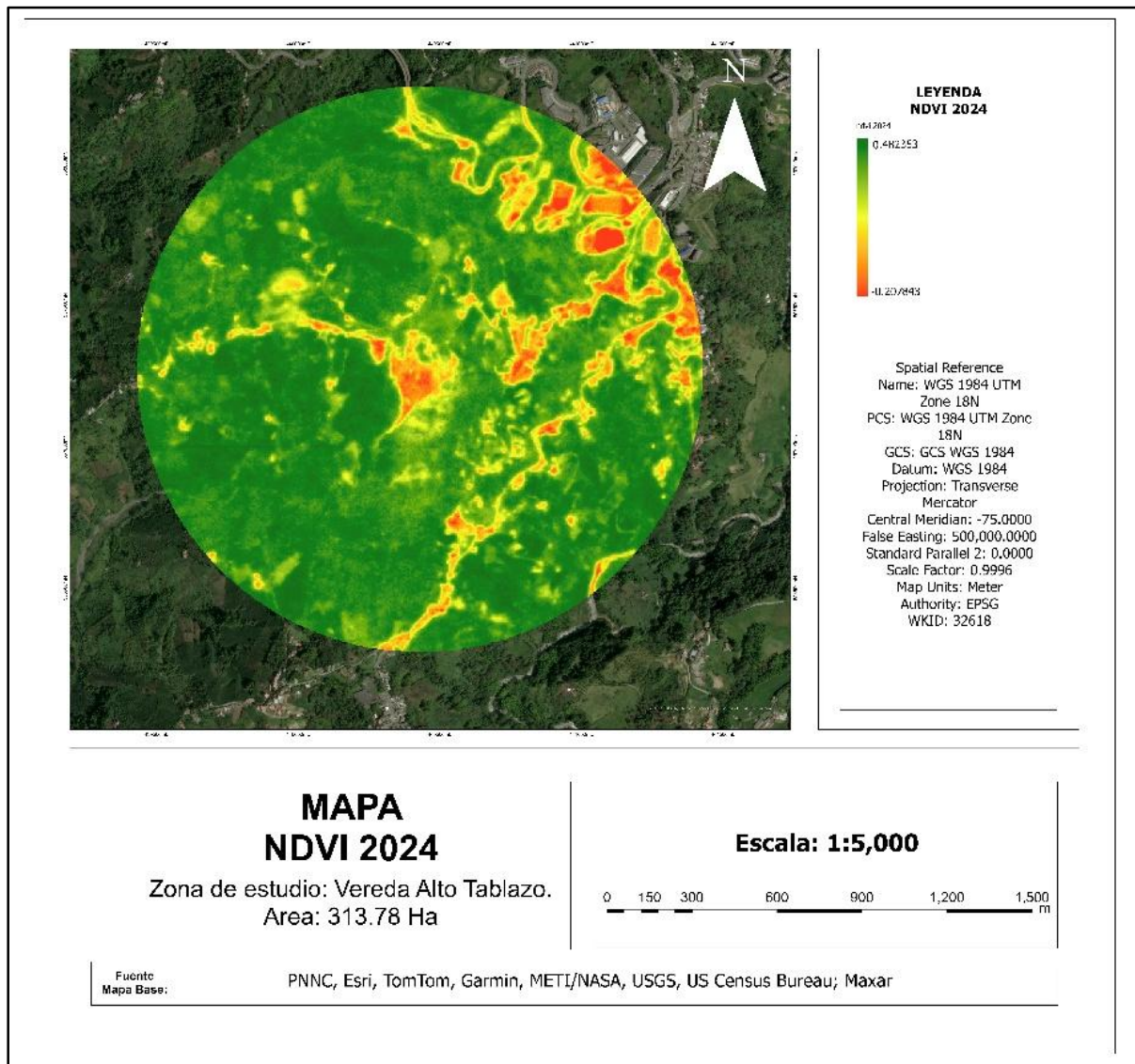


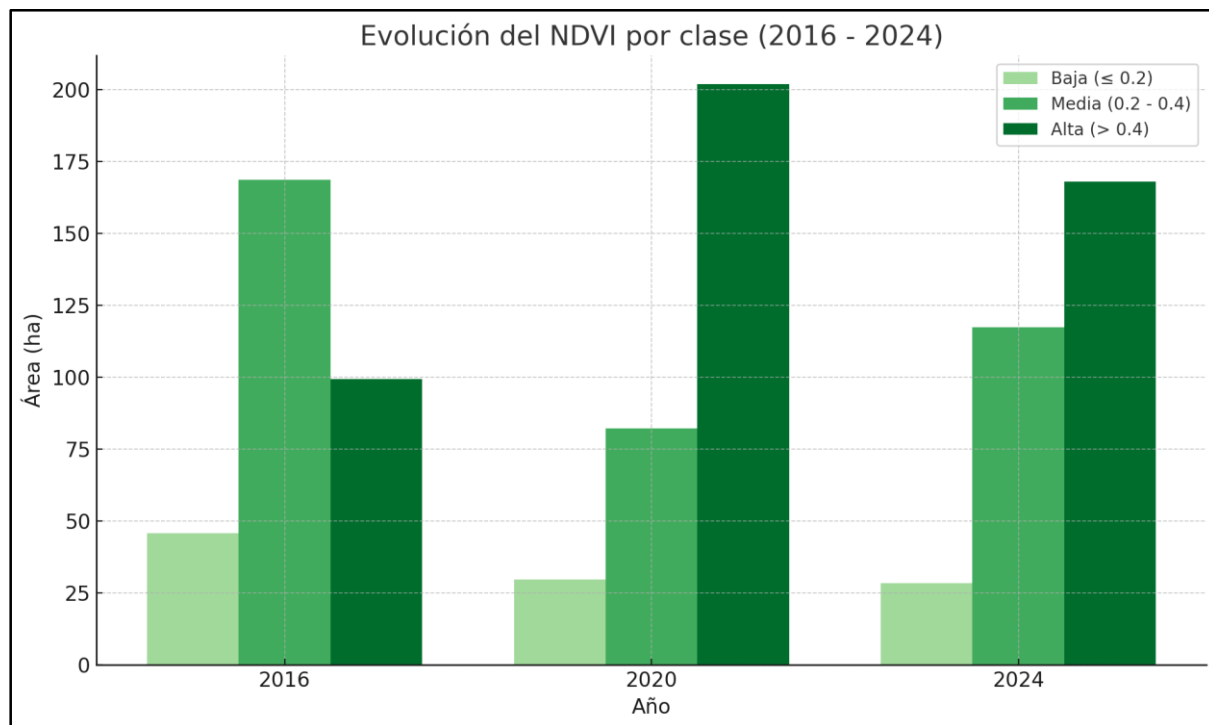
Figura 30
Mapa de NDVI - 2024



La evolución de la cobertura vegetal entre los años 2016, 2020 y 2024, evaluada a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), muestra dinámicas contrastantes en la densidad y calidad de la vegetación presente en la zona de estudio. La Tabla 12 y el gráfico de barras asociado permiten visualizar cómo se ha distribuido el área según tres clases establecidas.

Tabla 12*Distribución de área por clase de NDVI*

Clase NDVI	Rango	Área (ha)		
		2016	2020	2024
1. Baja (Suelo desnudo / Urbano)	≤ 0.2	45.79	29.73	28.33
2. Media (Vegetación media)	> 0.2 y ≤ 0.4	168.66	82.15	117.37
3. Alta (Vegetación densa)	> 0.4	99.33	201.91	168.08

Figura 31*Evolución del NDVI por clase (2016 - 2024)*

En el año 2016, predominaban las coberturas de vegetación media (168.66 ha), seguidas por las de vegetación alta (99.33 ha), mientras que el área con vegetación baja o sin cobertura sumaba 45.79 ha. Esta distribución inicial sugiere un entorno vegetado, aunque con una porción considerable de suelos descubiertos o urbanos.

Para 2020, se observa un fuerte incremento en la cobertura de vegetación alta, alcanzando las 201.91 ha (más del doble respecto a 2016), lo que podría reflejar procesos de recuperación

vegetal, regeneración natural o condiciones climáticas más favorables. Esta ganancia se dio en detrimento de la vegetación media, que cayó a 82.15 ha, y también de la vegetación baja, que se redujo a 29.73 ha.

En 2024, se presenta un nuevo reacomodo: si bien la vegetación alta disminuye levemente a 168.08 ha, la vegetación media vuelve a incrementarse significativamente (117.37 ha), lo que sugiere cierta reconfiguración estructural del paisaje vegetal, probablemente relacionada con disturbios menores, cambios estacionales, presión antrópica o sucesión ecológica. La vegetación baja continúa en descenso, representando solo 28.33 ha.

En conjunto, estos resultados muestran un patrón general positivo en términos de calidad de cobertura vegetal, con una tendencia hacia mayor densidad (incremento sostenido de las clases NDVI medias y altas), lo cual es relevante frente a procesos erosivos como los presentes en la cárcava del Alto Tablazo. No obstante, la dinámica entre las clases media y alta sugiere una vegetación sensible a perturbaciones y en constante ajuste, lo cual amerita un monitoreo continuo.

7.3.4 Relación entre cambio de cobertura y factores detonantes

El análisis multitemporal de la cobertura del suelo en el Alto Tablazo, complementado con la evaluación de factores detonantes como la pendiente, la precipitación, la cobertura vegetal (NDVI) y los condicionantes geológicos, permite establecer una relación integral entre la dinámica ambiental y los procesos de remoción en masa que afectan a esta zona del sur de Manizales.

Desde un enfoque geomorfológico, el área del Alto Tablazo se ubica en una región con pendientes que oscilan entre los 15° y 50°, lo cual genera una alta susceptibilidad a la inestabilidad del terreno. A partir del modelo digital de elevación (DEM) procesado y reclasificado, se observa que gran parte de la cárcava se desarrolla sobre laderas con inclinaciones superiores al 30°, una condición crítica que favorece la aceleración de procesos erosivos, especialmente cuando se combina con otras variables como la escorrentía superficial y la baja cobertura vegetal.

Los factores geológicos juegan un papel fundamental en la evolución de la cárcava. El área de estudio se encuentra influenciada directamente por el sistema de fallas Romeral, el cual atraviesa el sector y genera fracturamientos importantes en las unidades. En particular, la presencia del Complejo Quebradagrande –conformada por filitas silíceas, lodolitas grafitosas y metasedimentos fuertemente meteorizados– determina un comportamiento estructural frágil y una baja cohesión de

materiales. Este substrato, junto con los sedimentos volcanogénicos mal consolidados de la Formación Casabianca, crea un contexto geotécnico altamente inestable, tal como lo advierten Muñoz Rodríguez (2015) y Duque Bernal (2006).

El análisis climatológico también revela aspectos relevantes. La precipitación total mensual acumulada entre 2017 y 2022 indica una marcada estacionalidad, con periodos de intensas lluvias coincidentes con los años 2018, 2019 y parcialmente en 2022. Si bien se detectó un comportamiento anómalo entre junio de 2020 y julio de 2021 por fallas en el sensor de la estación Villamaría – AUT, los datos disponibles permiten inferir que los picos de precipitación pueden haber influido directamente en la activación o intensificación de procesos de remoción en masa. Las lluvias intensas que en los meses de lluvia fácilmente sobrepasa los 250 mm, al incidir sobre un terreno de pendiente y poco consolidado, aumentan el nivel freático, reducen la resistencia al corte y favorecen los colapsos del suelo superficial y profundo (IDEAM-DHIME, 2003).

En cuanto a la cobertura vegetal, el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mostró una dinámica interesante. La vegetación densa ($NDVI > 0.4$) se mantuvo un crecimiento exponencial entre el 2016 y el 2020, con una leve disminución hacia 2024, ganando terreno principalmente a la vegetación media y en menor medida a la baja. La vegetación media descendió casi a la mitad en el primer periodo y se recuperó aproximadamente en 40 ha frente a la densa vegetación para el 2024. Lo que indica dinámicas de rápidos cambios entre la alta vegetación y media, sin una consolidación clara. La dinámica de la vegetación Baja (suelos desnudos o zonas urbanas) es interesante, pues disminuye significativamente, pasando del 2016 de 45.79 ha al 2024 28.33 ha, esto indica una recuperación de vegetación, que se evidencia en como visualmente la cárcava disminuye su tamaño en los mapas de NDVI, sin embargo esto se puede deber a procesos de colonización secundaria en zonas previamente degradadas, como la misma cárcava, esta nueva cobertura, asociada principalmente a pastos o herbazales, no aporta una función de refuerzo mecánico suficiente en las laderas, por lo que la erosión puede continuar de forma subterránea o lateral, a pesar del “verdor” superficial percibido (Jensen, 2007; Rouse et al., 1974).

La clasificación supervisada de las imágenes satelitales PlanetScope analizadas, reveló cambios sustanciales en la cobertura del suelo. Se observó una dinámica de crecimiento de la cobertura de bosque, reemplazando a vegetación arbustiva o zonas abiertas. Este proceso de transición es coherente con el proceso evidenciado en el NDVI, con discrepando en el periodo

intermedio. Sin embargo, estas transformaciones no implican necesariamente una mejora en términos de estabilidad del terreno, ya que son procesos que no se han consolidado de manera clara, y que evidencian mucha inestabilidad entre las clases, solo la estabilización de vegetación densa reduce la capacidad de anclaje del suelo, particularmente en contextos de ladera y alta pendiente (Coppin et al., 2004)

Adicionalmente, la expansión de zonas urbanizadas se ha mantenido relativamente estable, aunque su presencia en zonas adyacentes a áreas de alta inestabilidad representa un riesgo latente para la población. Las obras civiles implementadas en el pasado, como los diques de contención y pantallas pasivas, han resultado en gran medida ineficaces, pues la cárcava continúa su progresión, afectando infraestructura vial y vivienda, y manteniéndose como un foco de amenaza activa (Muñoz Rodríguez, 2015; Corpocaldas, 2022).

Aunque en los mapas de clasificación y en el análisis NDVI se evidencia una reducción aparente del área de la cárcava hacia 2024, esto puede interpretarse más como una estabilización parcial en ciertos frentes erosivos y una cobertura temporal por vegetación pionera, más que como una recuperación efectiva del terreno. La cárcava continúa presentando procesos de profundización y avance lateral en varios sectores, como lo sugieren los eventos de remoción en masa reportados en 2018 y 2023.

En conclusión, la evolución de la cárcava del Alto Tablazo no puede explicarse a partir de un solo factor. La combinación de una geología débil, precipitaciones concentradas, pendientes elevadas, pérdida de cobertura vegetal y presión antrópica sobre el territorio genera un escenario de riesgo complejo y persistente. El uso de herramientas como SIG, NDVI y análisis multitemporal ha permitido identificar patrones críticos y zonas vulnerables, lo cual constituye una base esencial para la formulación de estrategias de mitigación integradas y adaptativas. Sin embargo, es indispensable complementar este análisis con monitoreo en campo, estudios geotécnicos y participación comunitaria para garantizar una gestión sostenible del territorio.

8. Conclusiones

La cárcava del Alto Tablazo continúa siendo un fenómeno activo de remoción en masa, impulsado por la interacción de factores naturales como las pendientes pronunciadas, litologías frágiles y eventos de precipitación intensa, junto con factores antrópicos que agravan su evolución. El crecimiento urbano desorganizado, el uso ganadero intensivo y la ausencia de control hídrico en la parte alta del terreno incrementan la escorrentía superficial y debilitan aún más la estabilidad del suelo. Aunque los análisis NDVI de 2024 muestran una aparente reducción del área erosionada, esta se debe principalmente a procesos de revegetalización con coberturas de densidad media dominadas por herbazales y pastos. Este tipo de vegetación pionera no proporciona suficiente refuerzo mecánico en zonas de alta pendiente, por lo que el riesgo geodinámico sigue presente y los procesos erosivos no han sido completamente controlados.

La clasificación supervisada de coberturas muestra flujos importantes entre bosque, vegetación media y áreas abiertas. Estos intercambios reflejan procesos de degradación y regeneración sin consolidación, especialmente en las zonas aledañas a la cárcava.

Las estructuras de contención construidas (dique ciclópeo, pantallas pasivas) no lograron frenar el avance de la cárcava, en gran medida por la falta de mantenimiento y por no haber sido integradas con estrategias eco-ambientales.

El uso de plataformas SIG, análisis multitemporal, clasificación supervisada y NDVI permitió visualizar y cuantificar cambios territoriales y ambientales, ofreciendo insumos valiosos para la planificación del riesgo.

9. Recomendaciones

Se recomienda priorizar tratamientos vivos y de bajo impacto para la estabilización de la cárcava, incluyendo revegetalización con especies de raíces profundas, control hídrico superficial, y bioingeniería de taludes. Estas soluciones deben facilitar que el sistema se autosostenga a largo plazo (Muñoz Rodríguez, 2015).

Es crucial establecer una línea base de seguimiento anual con imágenes satelitales y NDVI, complementadas por observación en campo, para evaluar el progreso de la cobertura vegetal y su efectividad en la mitigación del riesgo.

Integrar variables climáticas y estudios geotécnicos en sistemas de alerta temprana para la mejora del riesgo por movimientos en masa, al igual que es necesario la regulación del uso del suelo en las zonas que presentan mayor susceptibilidad restringiendo actividades antrópicas.

Educar y vincular a la comunidad en la gestión del riesgo. Fortalecer la apropiación social del territorio a través de procesos participativos en la gestión ambiental. Las comunidades deben ser capacitadas en prácticas sostenibles, manejo del agua y vigilancia de zonas inestables.

Articular los planes locales con instrumentos normativos regionales. El PMGRD y el POT de Manizales deben integrar estos hallazgos y mapas temáticos como insumo para actualizar sus estrategias de prevención, uso del suelo y manejo del riesgo en el corregimiento Agroturístico.

10. Referencias

- Alcaldía de Manizales. (2014a). *Diagnóstico / Documento resumen. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales 2017–2031*.
- Alcaldía de Manizales. (2014b). *Diagnóstico / Documento resumen. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales 2017–2031*.
- Alcaldía de Manizales. (2022). *SIG Manizales - POT Rural*. <https://tinyurl.com/sigmanizales>
- Arango Gartner, J. D. (2006). *Obras de reducción y mitigación de riesgos en el departamento de Caldas*. <https://tinyurl.com/corporacionautonoma>
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1–2), 15–31. <https://tinyurl.com/applicationofGIS>
- Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central. (2003). *La Gestión Local del Riesgo. Nociones y Precisiones en torno al Concepto y la Práctica*. <https://tinyurl.com/gestionlocal>
- Chen, F.-W., & Liu, C.-W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy and Water Environment*, 10(3), 209–222. <https://tinyurl.com/EstimationSpatial>
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., & Sdao, F. (2014). Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). *CATENA*, 113, 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.006>
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004a). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565–1596. <https://tinyurl.com/ArticleDigitalecosystem>
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004b). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), 1565–1596. <https://tinyurl.com/ArticleDigitalecosystemb>
- Corpocaldas. (2022a). *Respuesta a petición sobre la Cárcava del Tablazo y acciones en la comunidad de Guacas y Alto Tablazo*.

- Corpocaldas. (2022b). *Respuesta a petición sobre la Cárcava del Tablazo y acciones en la comunidad de Guacas y Alto Tablazo*.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. (1996). *Landslide types and processes*. <https://tinyurl.com/LandslideType>
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Duque Bernal, J. (2006a). *Análisis de susceptibilidad y vulnerabilidad en la vía Manizales - Chinchiná*.
- Duque Bernal, J. (2006b). *Análisis de susceptibilidad y vulnerabilidad en la vía Manizales - Chinchiná*.
- Fonseca, J. J., & Gómez, S. M. (2013). *Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat caso de estudio: cambio de área laderas de la ciénaga de Tumaradó parque natural los Katíos* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://tinyurl.com/Analisismultitemporal>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). *State of the World's Forests 2016: Forests and Agriculture: Land-Use Challenges and Opportunities*. FAO.
- Gelete, T. B., Pasala, P., Abay, N. G., Woldemariam, G. W., Yasin, K. H., Kebede, E., & Aliyi, I. (2024). Integrated machine learning and geospatial analysis enhanced gully erosion susceptibility modeling in the Erer watershed in Eastern Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 12(August), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1410741>
- Glade, T., Anderson, M., & Crozier, M. (2005). *Landslide Hazard and Risk* (T. Glade, M. Anderson, & M. J. Crozier, Eds.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470012659>
- Gobernación de Caldas. (2024). *LaPatria*. LaPatria. <https://www.lapatria.com/caldas/se-construye-una-ilusion-en-el-brillante-entre-pacora-y-san-bartolome-arrancaran-obras>
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1–2), 113–129. <https://tinyurl.com/Geostatisticalevation>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1–2), 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>

-
- IDEAM-DHIME. (2003). *Datos históricos meteorológicos*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). *Monitoreo de la Cobertura y Uso del Suelo en Colombia 2010 - 2016*.
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* ((2nd ed.)). Pearson Education.
- Ley 1523 de 2012 (2012). política nacional de gestión del riesgo
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. D. J., & Toro, L. M. (2008). Proveniencia Del Material Clástico Del Complejo Quebradagrande Y Su Relación Con Los Complejos Estructurales Adyacentes. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 22, 27–38.
- Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosion and Conservation. *European Journal of Soil Science*, 56(5), 686–686. <https://tinyurl.com/Soilerosionconservation>
- Muñoz Rodríguez, G. M. (2015a). *Actualización del análisis retrospectivo y propuesta eco-ambiental para la solución de la cárcava el Tablazo ubicada al sur occidente del municipio de Manizales*. Universidad de Caldas.
- Muñoz Rodríguez, G. M. (2015b). *Actualización del análisis retrospectivo y propuesta eco-ambiental para la solución de la cárcava el Tablazo ubicada al sur occidente del municipio de Manizales*. Universidad de Caldas.
- Naranjo, J. L., & Ríos, P. A. (1989). *Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos*.
- Osorio, D., Suárez, L., & Avella, E. (2020). Deslizamientos en Colombia: Causas y Consideraciones para su Evaluación. *Revista de Geografía Física y Geomorfología*.
- Ozioko, O., & Igwe, O. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping using heuristic and bivariate statistical methods for Iva Valley and environs Southeast Nigeria. *SpringerLink*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31950278/>
- Parra Arias, A. M., Duque Montenegro, J. D., & Castaño Vasco, L. J. (2020). *Análisis de medidas estructurales para mitigar el riesgo de desastres en tres sectores urbanos de Manizales, Caldas*. <https://tinyurl.com/RepositorioUCM>.

-
- Petit, C., Scudder, T., & Lambin, E. (2001). Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: Resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *International Journal of Remote Sensing*, 22(17), 3435–3456. <https://doi.org/10.1080/01431160010006881>
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). *Gully erosion and environmental change: importance and research needs*. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1).
- Ríos, J. (2021). Camino ancestral que atraviesa la cárcava del Tablazo será analizado. *Caracol Manizales*.
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite- I Symposium*.
- Sholichin, Othman, Prayogo, R. (2024). *Assessing Landslide susceptibility and formulating adaptation strategies in the Konto Watershed, East Java, Indonesia*. ScienceDirect. <https://tinyurl.com/SusceptibilityandFormulating>.
- Sobre, E., & Caracas, D. M. D. E. (2005). *INFORME FINAL*.
- Tian, F., Wang, Y., Fensholt, R., Wang, K., Zhang, L., & Huang, Y. (2013). Mapping and evaluation of NDVI trends from synthetic time series obtained by blending landsat and MODIS data around a coalfield on the loess plateau. *Remote Sensing*, 5(9), 4255–4279. <https://doi.org/10.3390/rs5094255>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2019). *Metodologías para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa*. <https://tinyurl.com/UNGRDzonificacion>.
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, 63(2–3), 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Villada Marín, D. M. (2013). *Diagnóstico corregimientos municipio de Manizales. Componente rural del Plan de Ordenamiento Territorial*.

-
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* ((2nd ed.)). Routledge.
- Zhu, Z., Woodcock, C. E., & Olofsson, P. (2012). Continuous monitoring of forest disturbance using all available Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 122, 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.030>