

**Gestión de información geográfica de geoportales para el estudio de
taludes.**

Amparo Valentina Gamba Páez

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil

Director

Néstor Iván Rojas Gamba

Magíster en Geotecnia. Magíster en Gestión de la Información y Tecnologías Geoespaciales

Universidad Santo Tomás, Tunja

División de Ingeniería y Arquitectura

Ingeniería Civil

2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mi mamá, mi papá y mi hermano por su apoyo incondicional en mis años de carrera, gracias por su paciencia, comprensión y motivación en cada una de mis etapas, y por creer siempre que soy una persona muy capaz y que cada objetivo que me propongo lo logro. Su amor y respaldo han sido fundamentales para alcanzar este logro que será el primero de muchos.

De la misma manera, agradezco a mi director de tesis por su orientación, dedicación y comprensión a lo largo del desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos y apoyo fueron fundamentales para la realización de esta investigación y para mi formación académica y profesional.

Contenido

Introducción	13
1. Gestión de información geográfica de geoportales para el estudio de Taludes.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.1.1 Pregunta de investigación.	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
2. Marco referencial	18
2.1 Marco teórico	18
2.1.1 Elaboración del marco teórico	19
2.1.2 Relación del marco teórico con la programación de ArcGIS Pro	32
2.2 Marco conceptual	33
2.3 Marco legal.....	35
3. Método	36
3.1 Descripción y análisis del talud.....	36
3.2 Definición del movimiento.....	37
3.3 Limitaciones de escalas en los geoportales	40
3.4 Tipo de material y descripción	41
3.5 contextualización de la zona de localización del talud	42
3.5.1 Topografía	42
4. Resultados.....	54

4.1 ArcGIS	54
4.2 Condiciones morfométricas del talud.....	61
4.3 Análisis Comparativo previo y actual del Talud.....	64
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	66
5.1 Conclusiones	66
5.2 Recomendaciones.....	67
Referencias.....	68
Referencias del marco teórico.....	74
Apéndices.....	77

Lista de figuras

Figura 1 Resultados de la Ecuación	19
Figura 2 Análisis del software por temas relevantes	20
Figura 3 Análisis del software por años.....	21
Figura 4 Análisis de documentos en el software por densidad.....	22
Figura 5 Análisis de documentos mediante Notebook	23
Figura 6 Talud de estudio Vista Frontal	37
Figura 7 Talud vista perfil	38
Figura 8 Partes del movimiento del Talud.....	39
Figura 9 material presente en el talud.....	40
Figura 10 Mapa Topográfico de Boyacá	45
Figura 11 Localización del municipio de Tunja	46
Figura 12 Mapa topográfico con pendientes del municipio de Tunja	48
Figura 13 Mapa geológico de Tunja.....	49
Figura 14 Leyenda del mapa geológico del municipio.....	50
Figura 15 Mapa Geomorfológico de Boyacá.....	51
Figura 16 Curvas IDF	52
Figura 17 Zona de Estudio.....	53
Figura 18 Localización del talud dentro del mapa.....	55
Figura 19 Coordenadas y localización del talud dentro de la ciudad de Tunja	56
Figura 20 Delimitación del talud y Zona de Estudio	56
Figura 21 Erosión.....	58
Figura 22 Capa de Suelos	59

Figura 23	DEM	60
Figura 24	Curvas de Nivel	61
Figura 25	Mapa de pendientes con el Talud.	62
Figura 26	Latitud del Talud	63
Figura 27	Longitud del Talud	64
Figura 28	Análisis Talud de noviembre.....	65

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>Mapa topográfico de la localización del Talud</i>	77
Apéndice B. <i>Mapa de pendientes de la localización de Tunja</i>	77
Apéndice C. <i>Mapa Curvas de Nivel de la Localización del Talud.....</i>	77
Apéndice D. <i>mapa geográfico de la localización del talud</i>	77
Apéndice E. <i>Mapa Topográfico de Tunja.....</i>	77

Resumen

La investigación tiene como objetivo realizar un análisis geoespacial de un talud de estudio localizado en la vía Tunja-Monquirá, mediante la implementación del programa **ArcGIS Pro**. Este programa permite llevar a cabo una caracterización espacial sin la necesidad de extraer muestras del suelo ni de realizar visitas al sitio. A través de este enfoque, se buscó generar una caracterización más completa de las condiciones actuales del talud y, en caso de identificarse riesgos, proponer posibles soluciones que mitiguen el impacto para la población.

El informe se desarrolló de la siguiente manera: en primer lugar, se presentó un análisis bibliográfico relacionado con los temas de georeferenciación y modelos implementados a lo largo del tiempo, así como su influencia en el análisis de estabilidad en taludes. Posteriormente, se realizó una contextualización topográfica y geológica del área donde se localiza el talud de estudio. Finalmente, se expuso el análisis correspondiente mediante la implementación de **ArcGIS Pro**, en el cual se caracterizaron las condiciones actuales del talud y se llevó a cabo una comparación con un análisis previo.

Palabras clave: análisis geoespacial, georeferenciación, estabilidad, talud

Abstract

The objective of the research is to perform a geospatial analysis of a study slope located on the Tunja-Moniquirá road, through the implementation of the **ArcGIS Pro** program. This program allows spatial characterization to be carried out without the need to extract soil samples or make site visits. Through this approach, it was sought to generate a more complete characterization of the current conditions of the slope and, if risks are identified, to propose possible solutions that mitigate the impact on the population. The report was developed as follows: first, a bibliographic analysis related to the topics of georeferencing and models implemented over time was presented, as well as their influence on slope stability analysis. Subsequently, a topographic and geological contextualization of the area where the study slope is located was carried out. Finally, the corresponding analysis was presented through the implementation of **ArcGIS Pro**, in which the current conditions of the slope were characterized and a comparison with a previous analysis was carried out.

Keywords: geospatial analysis, georeferencing, stability, slope

Glosario

ArcGIS Pro: software de sistemas de información geográfica (SIG), el cual permite el análisis, visualización y gestión de datos espaciales y georreferenciados. (ESRI, 2022)

Clasificación de movimiento en masa: hace referencia a un sistema en donde se agrupan los movimientos del terreno según su material, mecanismo de movimiento y velocidad. (Cruden, D. M., & Varnes, D. J., (1996))

Condiciones geotécnicas: conjunto de propiedades mecánicas, hidráulicas y físicas de un determinado suelo o roca en donde se determinan los comportamientos en relación con cargas y estabilidad. (Rodríguez Ortiz, J. M., & De la Cruz, J., (2008))

Curvas de nivel: puntos de igual elevación que representan líneas cartográficas en donde se facilita el análisis de pendientes y diversa morfología del terreno. (Ponce, V. M., (1989))

Datos georreferenciados: información espacial relacionada directamente con coordenadas geográficas en donde se permite el análisis dentro de un sistema SIG. (ESRI, 2022)

DEM (modelo digital de elevación): representación tridimensional digital de una determinada superficie terrestre utilizada en análisis topográficos y geomorfológicos. (USDA, (2017))

Deslizamiento rotacional: hace referencia a un tipo de movimiento que es muy común en suelos cohesivos generalmente se caracteriza por una superficie de falla curva. (Cruden, D. M., & Varnes, D. J., (1996))

Fallas geológicas: hace referencia a la presencia de fracturas en la corteza terrestre generando un desplazamiento considerable entre bloques. (Etayo Serna, F., Renzoni, G., & Barrero, D., (1983))

Geología: ciencia cuya finalidad es el estudio de composición, estructura y evolución de la tierra. (Selby, M. J., (1993))

Geomorfología: disciplina en donde se analiza las diversas formas del relieve y los procesos fundamentales que los originan. (Carson & Kirkby, (1972))

Geoportales: corresponde a plataformas digitales online en donde se encuentra la visualización, descarga y análisis de información geoespacial recolectada de diversas fuentes, facilitando la incorporación de datos geológicos, topográficos y ambientales para estudios geotécnicos. (Bernard, L., Mäs, S., & Sliwinski, A, (2005))

InSAR (interferometría Radar de Apertura Sintética): técnica de teledetección en donde se emplean imágenes de radar obtenidas por satélites con la finalidad de distinguir deformaciones del terreno, siendo implementada para la detección de movimientos lentos en los taludes. (Tomás, R., Lopez-Sanchez, J. M., Li, Z., & Liu, P., (2014))

LiDAR (Light Detection and Ranging): tecnología de teledetección en donde se emplean pulsos laser con la finalidad de generar modelos digitales de buena resolución para identificar microformas del relieve, pendientes y zonas probablemente inestables. (Wehr, A., & Lohr, U., (1999))

Modelos de susceptibilidad: herramienta analítica mediante la cual se pueden calcular las probabilidades espaciales de deslizamientos, mediante la combinación de factores importantes como la pendiente, litología, precipitación o uso de suelo. (Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F., (2005))

Movimiento en masa: hace referencia al desplazamiento de roca o suelo por efecto de la gravedad. (Nguyen, H., Mehrabi, M., Kalantar, B., Moayedi, H., & Abdullahi, M. M., (2019))

Pisos térmicos: clasificación climática orientada por la altitud del mar, en donde se establecen rangos de temperatura y condiciones ambientales, en donde influyen los procesos geomorfológicos, hidrológicos y geotécnicos de una determinada región. (IDEAM, (2018))

Servicio geológico colombiano (SGC): entidad técnica del estado, donde su función es la investigación, monitoreo y generación de información geológica y geotécnica, empleada para la planificación territorial y gestión del riesgo. (Servicio Geologico Colombiano, (2015))

Susceptibilidad a deslizamiento: nivel de susceptibilidad de un área a la aparición de deslizamientos, resultado de la interacción de factores como pendiente, litología o uso de suelo. (Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F, (2005))

Talud: superficie inclinada que se puede presentar de forma natural o artificial por intervención del hombre en donde se pueden presentar condiciones de inestabilidad. (Rodríguez Ortiz, J. M., & De la Cruz, J., (2008))

Vulnerabilidad: falta de capacidad para resistirse de impactos negativos generando perdida de elementos expuestos a la amenaza debido a factores físicos, económicos o ambientales. (UNDRR, (2017))

Introducción

Al observar las catástrofes ocurridas en edificaciones a lo largo de la historia, se demuestra la importancia de un adecuado estudio de suelo. En la antigüedad, muchas de las edificaciones solían colapsar por diversos factores, como el clima, la ubicación o en la mayoría de los casos, porque el terreno no era el óptimo para el proyecto. Esto se debía al tipo de material presente y a las características físicas y básicas del suelo, las cuales no eran las mejores. Con el paso de los años, se empezaron a implementar estudios que ayudaban a identificar mejor las características del suelo, disminuyendo el riesgo de fallas estructurales y salvaguardando las vidas humanas en mayor proporción.

La finalidad de un buen estudio de suelos en cualquier proyecto es tener la seguridad y durabilidad de la edificación durante el periodo para el cual fue diseñada. Esta labor debe complementarse con la implementación de materiales adecuados y diseños constructivos óptimos, guiándose de los manuales y normas diseñados para cada tipo de proyecto como la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 y el Manual de Estabilidad en Taludes MET. Este último facilita la interpretación de toma de muestras in situ y en laboratorio en un estudio de suelos, principalmente en investigaciones relacionadas con movimientos en taludes. No obstante, existen diversos tipos de estudios que se realizan antes o durante el análisis de los proyectos, todos orientados a garantizar la estabilidad en obras civiles, particularmente en los taludes.

Dentro de estos estudios existen los **pre-exploratorios**, los cuales en conceptos de geotecnia son la primera etapa para obras de ingeniería civil. Su objetivo principal es reconocer y caracterizar, en términos generales, el terreno o suelo del proyecto antes de realizar sondeos o ensayos de laboratorio. Permitiendo planificar adecuadamente las etapas posteriores de la exploración. Posteriormente, se tienen los **estudios obligatorios de los proyectos**, que

proporcionan información importante para la toma de decisiones relacionadas con el tipo de obra que se pueden desarrollar en función del suelo y estructuras necesarias para su estabilización. Asimismo, se encuentran los estudios exigidos por normativas, dentro de los cuales se incluye el análisis de materiales de la zona y sus características.

Este tipo de estudios permiten generar un perfil detallado del terreno, especificando sus propiedades físicas, básicas, mecánicas y dinámicas. De esta manera, se facilita la caracterización del suelo y se determina el comportamiento del suelo en el momento de implementar cargas o modificar el terreno. Mediante análisis como: contenido de humedad, peso específico, granulometría, clasificación del suelo y propiedades geomecánicas, es posible evaluar la resistencia, deformabilidad y estabilidad del suelo mediante la implementación de fórmulas y métodos diseñados para su clasificación. Dentro del campo de geotecnia, los estudios pre-exploratorios son esenciales para disminuir la incertidumbre y garantizar la estabilidad de los suelos.

Mediante este proyecto se quiere demostrar la importancia de realizar una buena caracterización de suelos desde las primeras etapas, específicamente en la implementación de estudios pre-exploratorios para el análisis de un talud localizado en la vía Tunja-Moniquirá. Se llevo a cabo una caracterización geoespacial implementado ArcGIS Pro como programa de tratamiento de datos.

En el documento se presenta información relacionada con la edad del material presente en el Talud, así como un análisis general del entorno, evaluación de condiciones climáticas y el estudio de las características del terreno mediante el uso de herramientas de ArcGIS Pro.

Posteriormente, se presenta una síntesis de la clasificación del movimiento del talud, junto con recomendaciones para la comunidad sobre las diversas obras que puedan implementarse en el

sector. Finalmente, se proponen sugerencias enfocadas a las condiciones específicas de localización del talud, con el objetivo de promover acciones preventivas que contribuyan a la reducción de riesgo y seguridad de la población.

1. Gestión de información geográfica de geoportales para el estudio de Taludes

1.1 Planteamiento del problema

En la estabilidad de taludes se relacionan distintos factores, dentro de los que se destacan las características morfométricas del terreno, como pendiente, altitud y configuración del relieve. Estos elementos afectan los procesos de escorrentía superficial, infiltración de agua y erosión del suelo, los cuales ayudan en los movimientos en masa. Por cuya razón, el conocimiento de la morfometría del terreno es un aspecto importante para conocer el comportamiento del talud y evaluar las condiciones.

A lo largo de los años, la evolución de los sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido el avance en análisis espacial del terreno con la implementación de herramientas digitales capaces de procesar grandes volúmenes de información. Principalmente, un software como ArcGIS Pro, que facilita el análisis de características morfométricas partiendo de modelos digitales de elevación, donde se determinan parámetros importantes como pendientes, curvas de nivel, latitud y longitud. Generando evaluaciones más precisas de la zona de estudio.

Debido a esto, es necesario analizar las condiciones morfométricas de un talud localizado en la ciudad en la vía Tunja-Moniquirá mediante la implementación de herramientas SIG, para recopilar información de variables como pendientes y curvas de nivel. Este análisis permite entender el comportamiento del terreno y evaluar las condiciones del Talud.

1.1.1 Pregunta de investigación.

¿mediante la implementación herramientas de ArcGIS Pro es posible conocer las características morfométricas de un talud?

1.2 Justificación

La caracterización morfométrica es importante en el análisis de un talud ya que permite cuantificar y describir las dimensiones y pendientes del terreno, factores que afectan su estabilidad y comportamiento frente a agentes exógenos como lluvia o erosión.

El análisis morfométrico facilita la identificación de zonas críticas en donde predominan las pendientes pronunciadas, en donde aumenta la generación de inestabilidad o deslizamientos. Con la ayuda de herramientas de análisis espacial, se pueden generar mapas de pendientes y modelos digitales de elevación DEM que facilitan la visualización y análisis del comportamiento del terreno.

La investigación presenta un manual de aplicación de herramientas del software ArcGIS Pro, para el análisis morfométrico de un talud, siendo aplicable en proyectos que presentan condiciones similares. Mediante el análisis se desea demostrar la importancia de estudios pre-exploratorios especialmente en el campo de la geotecnia y estudios de suelos.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Desarrollar el estudio geoespacial de un talud mediante el uso de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) implementando el programa ArcGIS Pro, procesando información en diversas capas para conocer las condiciones de la zona de estudio.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Elaborar una revisión bibliográfica, mediante el análisis de información secundaria y fuentes técnicas oficiales, generando filtros de interés enfocados en el tema central de la investigación.

- Analizar el talud localizado en la vía Tunja-Moniquirá mediante la descarga de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) y el uso de herramientas SIG en ArcGIS Pro, con el fin de determinar las condiciones morfométricas del talud mediante un análisis detallado.
- Realizar un análisis comparativo del estado del talud documentado en evaluaciones previas y su condición actual, para identificar cambios relevantes, determinar sus condiciones morfométricas y reconocer agentes externos que causen su deterioro.

2. Marco referencial

En el marco referencial se encuentran definiciones y descripciones generales de conceptos clave para comprender adecuadamente el desarrollo del estudio. En donde se abordaron conceptos teóricos, conceptuales y normativos relacionados con la estabilidad de los taludes, uso de programas especializados en donde se evaluó su estabilidad. Este marco proporciona el soporte técnico y contextual que genera la investigación, facilitando posibles soluciones sin necesidad de realizar trabajo de campo, y estableciendo bases conceptuales en donde se direcciona la propuesta metodológica y los resultados.

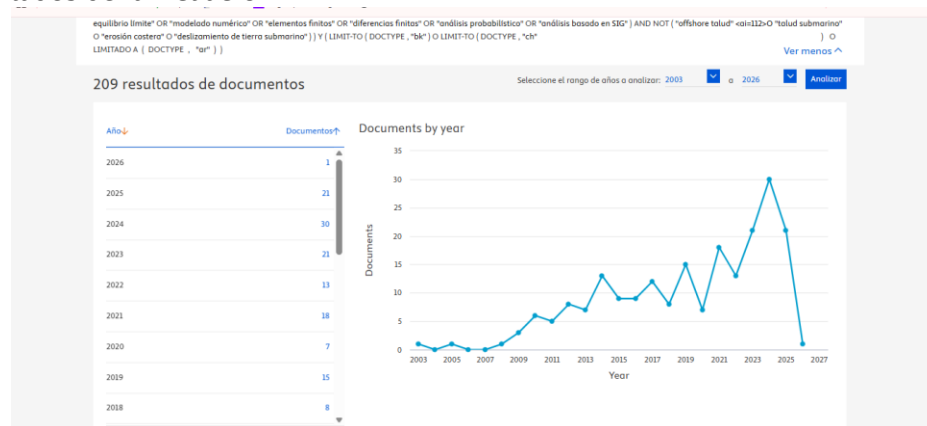
2.1 Marco teórico

En el marco referencial se tomaron en cuenta diversos autores y se realizó un análisis para entender los enfoques de los artículos más relevantes. Posteriormente, se generó un análisis comparativo de lo que se establece en el Manual de Estabilidad en Taludes enalteciendo los autores más importantes y sus aportes más significativos garantizando la estabilidad en taludes. Finalmente se hizo un análisis de la evolución de la implementación de estos métodos demostrando como ha ayudado a los avances en el sector de análisis de suelos.

2.1.1 Elaboración del marco teórico

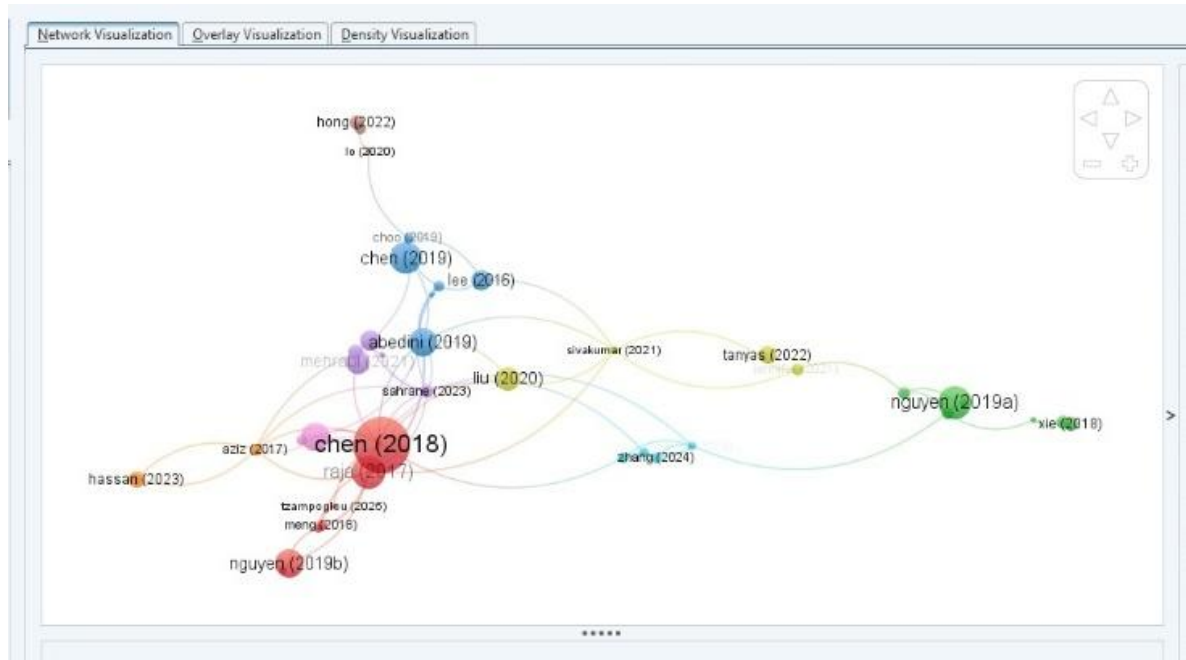
Inicialmente se programó una ecuación con ayuda de la inteligencia artificial. Se introdujo una serie de parámetros en el servidor con la intención de generar un filtro de documentos de interés, como se observa en la figura 1, el servidor Scopus encontró 209 artículos relacionados con los temas principales de la investigación de los cuales se tomaron 50 artículos para posteriormente analizarlos en el programa Vosviewer.

Figura 1 Resultados de la Ecuación



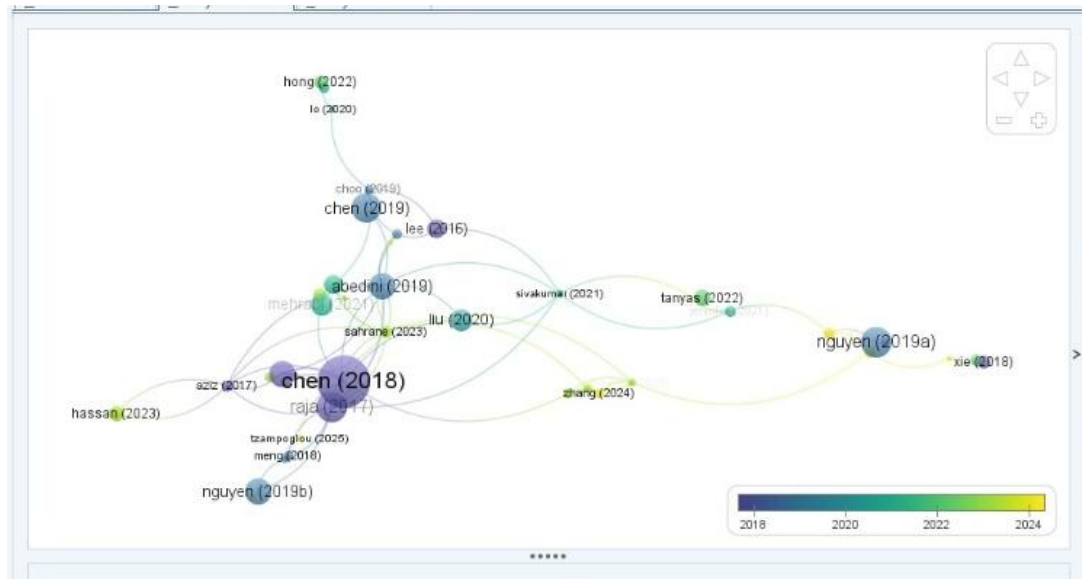
Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar el primer filtro de documentos con la ayuda de la ecuación generada por inteligencia artificial se procedió a realizar un segundo filtro con ayuda del programa Vosviewer. La configuración inicial del programa consiste en especificar los temas de interés que se desean filtrar, los años más recientes o relevante y características que se consideren fundamentales en la investigación. En la figura 2 se observa el análisis de documentos en donde los círculos más grandes y cercanos son los que tiene los temas más relevantes. Asimismo, los círculos más pequeños representan artículos muy poco relevantes.

Figura 2 Análisis del software por temas relevantes

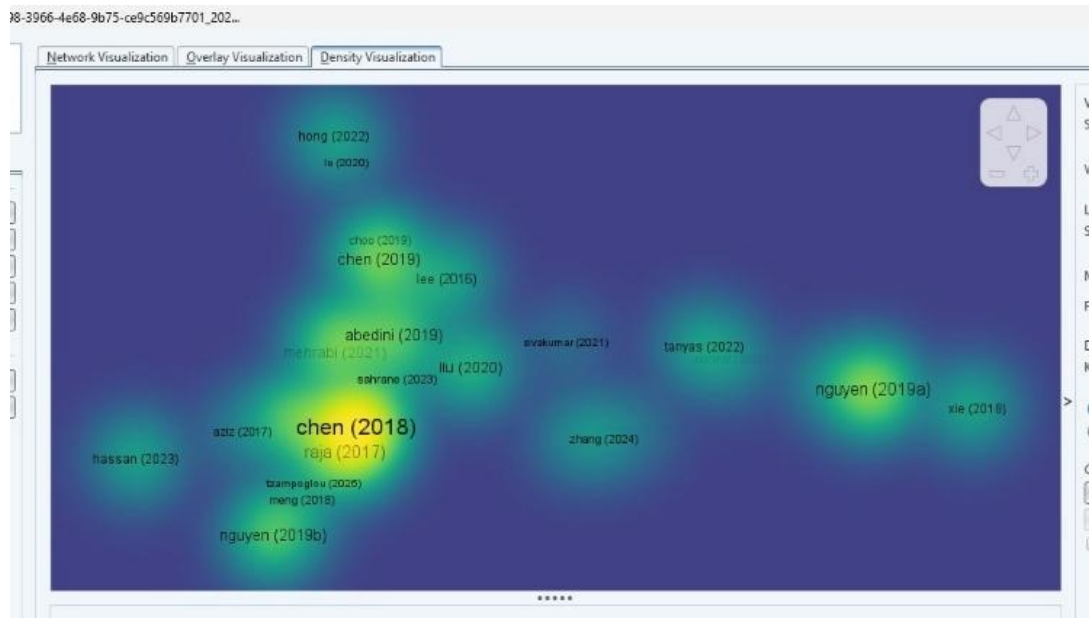
Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se observa un análisis temporal en donde se clasifica por colorimetria, significando los colores azules los años más recientes y los colores mas verdes y amarillos los años más lejanos. La implementación de este analisis es para descartar documentos o libros que ya no apliquen con la normativa actual o con restricciones presentes, ayuda a descartar documentos que ya no son utiles para la investigación.

Figura 3 Análisis del software por años

Fuente: Elaboración propia

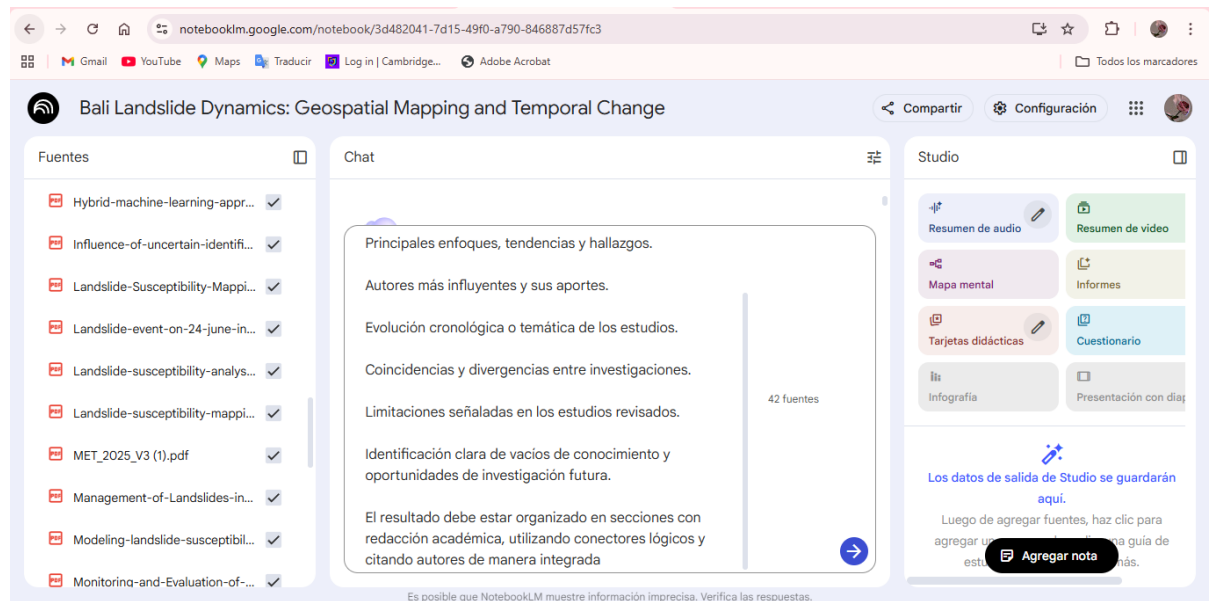
En la figura 4 se observa un filtro de documento por densidad, representa el nivel de importancia del tema del documento en comparación con los filtros que se asignaron en un inicio en la configuración, facilitando la selección de documentos por el nivel de interés que puede representar para la investigación.

Figura 4 Análisis de documentos en el software por densidad

Fuente: Elaboración propia

Luego de la revisión inicial mediante el software, se seleccionaron 42 artículos relevantes para la investigación. Estos artículos se analizaron mediante la herramienta Notebook, donde analizó los documentos y extrajo las partes más importantes de cada uno mediante una instrucción que especificaba criterios y características de interés, luego de determinar las características de interés, se procedió a crear un cuaderno con los artículos seleccionados junto con los comandos necesarios para realizar el análisis como se observa en la figura 5.

Figura 5 Análisis de documentos mediante Notebook



Fuente: Elaboración propia

2.1.1.1 Evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa

La investigación relacionada con los deslizamientos se centra en cuatro categorías metodológicas importantes, estas varían según su marco teórico y alcance de aplicación, las metodologías son: modelos mecanicistas, métodos heurísticos, modelos estadísticos y técnicas de aprendizaje automático (ML) (Farahani & Ghayoomi, 2025). Una dirección clara es la integración de enfoques híbridos en donde se brindan varias soluciones (Chen & Song, 2023).

2.1.1.1.1 Modelos de Susceptibilidad y Predicción

- **Modelos Mecanicistas/Determinísticos**

Este modelo se basa en principios básicos en donde se incluye el análisis de estabilidad de taludes y el método del bloque de deslizamiento de Newmark (Farahani & Ghayoomi, 2025), siendo más efectivos para evaluaciones específicas de sitio en donde se disponen de datos geotécnicos detallados (Chen &

Song, 2023), dentro de los avances recientes, los métodos simplificados de Newmark permiten la aplicación a niveles regionales, disminuyendo la demanda computacional (Farahani & Ghayoomi, 2025), una de las principales limitaciones del modelo es la suposición de direcciones de los deslizamientos rígidos, debido a esto se limita la capacidad de representar situaciones difíciles en el mundo real, a su vez afectando la escalabilidad de mapas de gran extensión (Farahani & Ghayoomi, 2025)

- **Modelos Estadísticos y Heurísticos**

Estos modelos son considerados métodos cualitativos, en donde se fundamentan de opiniones de expertos sin la implementación de bases de datos de deslizamientos, sin embargo, la precisión del método es limitada debido a la subjetividad (Tzampoglou et al., 2025), por otro lado los métodos cuantitativos como la Regresión Logística (LR), la Razón de Frecuencia (FR), la Entropía de Shannon (SE) y el Peso de la Evidencia (WoE) si requieren una base de datos más detallada (Yatim Mustapa & Tahar, 2025), un ejemplo claro se podría considerar como el modelo de regresión logística desarrollado por Nowicki Jesse et al (Farahani & Ghayoomi, 2025), desarrollado con 23 inventarios globales siendo un referente global para producción de mapas de riesgo de deslizamiento.

- **Técnicas de Aprendizaje Automático (ML) y Minería de Datos**

Estas técnicas se consideran más efectivas debido a la gestión de incertidumbre y la no linealidad de sistemas de deslizamiento (Chen & Song, 2023; Tzampoglou et al., 2025), uno de los avances más importantes es el alto rendimiento discriminatorio de modelos ML, un ejemplo claro es en donde un modelo RF (Random Forest),

donde se encuentran datos relacionados con cinco eventos sísmicos alcanzo un área bajo la curva de 0,95 en el conjunto de prueba, demostrando una generalización sólida.(Farahani & Ghayoomi, 2025)

- **Modelos Híbridos y de Ensamble**

La combinación de modelos de aprendizaje autónomo y modelos estadísticos es una tendencia muy utilizada en la actualidad con la finalidad de mejorar la precisión y predictibilidad (Zhang et al., 2024), La incorporación de algoritmos de optimización metaheurística (como COA o DE) en modelos como el Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) o las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) también ha demostrado un rendimiento predictivo superior(Nguyen et al., 2019)

2.1.1.1.2 Hallazgos Clave sobre Desencadenantes

- **Lluvia y Humedad del Suelo**

La estabilidad en los taludes se ve afectada por la intensidad y duración de la lluvia, así como también influye la lluvia acumulada y los antecedentes de lluvia (Instituto Nacional de Vías., 2025), la modelación demostró el efecto de la saturación por la lluvia antecedente y la como consecuencia la aparición de deslizamientos superficiales provocados por sismos (Martino et al., 2022)

- **Factores Geotécnicos**

La integración de parámetros geotécnicos como índice de plasticidad o índice de resistencia geológica como capas permite una pequeña mejora en el rendimiento de modelos de susceptibilidad, siendo más evidente en modelos que antes eran menos efectivos (Tzampoglou et al., 2025)

2.1.1.1.3 Autores más Influyentes y sus Aportes

- **David K. Keefer (1984, 2002)**

Los estudios históricos y recopilación de datos de 40 sismos a nivel mundial de los años 1811 al 1980 son importantes para la investigación de deslizamientos generados por terremotos (Farahani & Ghayoomi, 2025), catalogando 14 tipos de inestabilidad sísmica y a su vez analizando la distribución espacial de los diversos movimientos en masa (Instituto Nacional de Vías., 2025)

- **D. J. Varnes (1978) y D. M. Cruden (Cruden & Varnes, 1996)**

De este autor se destaca que la clasificación de los movimientos en masa son las más implementadas en Colombia y sirven de base para actualización y propuesta de diversas técnicas de clasificación implementadas por instituciones nacionales (Tomás et al., 2024)

- **F. Guzzetti y P. Reichenbach**

Reconocidos por sus rigurosas revisiones de modelos estadísticos (Yu et al., 2023), además de un enfoque en evaluación probabilística de amenaza (Instituto Nacional de Vías., 2025). Guzzetti resaltó la importancia de una mejor calidad de datos de lluvia y deslizamientos con la finalidad de disminuir la incertidumbre en sistemas de alerta temprana. (Peres et al., 2018)

2.1.1.1.4 Evolución Cronológica o Temática de los Estudios.

La evolución de los estudios se genera en una progresión desde la descripción y clasificación hasta la modelación geoespacial

- **Conceptos Fundamentales y Clasificación**

Los primeros estudios se centraron en definir y clasificar tipos de movimientos en masa y los respectivos desencadenantes, principalmente en sismos (Instituto Nacional de Vías., 2025)

- **Integración de GIS y Modelos Estadísticos**

En los finales del siglo XX la implementación de las tecnologías GIS fue esencial y muy importante para el mapeo de susceptibilidad (Arshid et al., 2024). Los métodos estadísticos bivariados y multivariados son generalizados para la realización de inventarios de deslizamientos para validación de los modelos (Tzampoglou et al., 2025)

- **Era del Machine Learning (ML)**

En la última década se observó una rápida adopción de aprendizaje autónomo para LSM (Nguyen et al., 2019), estos modelos han demostrado su importancia y valor gracias a su capacidad para manejar bases de datos grandes con multitemáticas y sistemas complejos sin la necesidad de depender de suposiciones de distribución estadística (Tzampoglou et al., 2025), los últimos trabajos comparan y evalúan la precisión de diversos algoritmos reflejando que RF, SVM y XGBoost superan a los métodos estadísticos tradicionales(Chen & Song, 2023)

- **Teledetección y Monitoreo Espacial Avanzado**

la implementación de sensores remotos ha incrementado significativamente (Instituto Nacional de Vías., 2025). El LIDAR aéreo se caracteriza por desarrollar Modelos Digitales de muy buena resolución, importantes para la identificación de micro relieves de inestabilidad, generalmente en regiones que presentan una vegetación muy densa (Instituto Nacional de Vías., 2025).la interferometría SAR

especialmente con datos de Sentinel-1, se utiliza para el monitoreo de deformaciones lentas y la identificación de precursores de falla en tiempo casi real (Instituto Nacional de Vías., 2025)

2.1.1.1.5 Coincidencias y Divergencias entre Investigaciones

- **Coincidencias**

- **Dominio de ML en Susceptibilidad**

Hay un acuerdo general en la literatura relacionado con el alto rendimiento predictivo de las técnicas ML con respecto a la representación del mapa de susceptibilidad (Chen & Song, 2023). Los modelos RF y SVM son frecuentemente citados por su robustez (Farahani & Ghayoomi, 2025)

- **Métricas de Evaluación Estándar**

La validación de los modelos es realizada de forma uniforme mediante la utilización del área bajo la curva (AUC/ROC), además de métricas complementarias como son: precisión, recall e índice Kappa de Cohen, facilitando la comparación entre metodologías.(Tzampoglou et al., 2025)

- **Influencia del Agua**

Se enaltece el papel importante que representan las condiciones hidrológicas como la lluvia y el nivel freático como factores desencadenantes principalmente cuando son procesos de infiltración en taludes no saturados. (Instituto Nacional de Vías., 2025)

- **Divergencias**

- **Modelo Óptimo**

Sin importar las integras comparativas, no hay un acuerdo académico sobre cuál es el algoritmo más apropiado para el mapeo de susceptibilidad (Zhang et al., 2024), generalmente RF representa el mejor rendimiento promedio (Fayaz et al., 2022; Tzampoglou et al., 2025), sin embargo otros análisis piensan que SVM y otros modelos híbridos pueden ofrecer una precisión superior dependiendo del conjunto de datos y el umbral de clasificación utilizado. (Ibrahim et al., 2021; Tzampoglou et al., 2025)

- **Estrategias de Muestreo**

La metodología implementada para la selección de puntos en el caso de no deslizamiento es un tema de interés de debate abierto y una fuente de sesgo de la investigación (Chen & Song, 2023; Tzampoglou et al., 2025), la selección aleatoria de puntos incluso en baja proporción genera un impacto negativo en los resultados del análisis (Chen & Song, 2023)

2.1.1.1.6 Limitaciones Señaladas en los Estudios Revisados

Los documentos analizados resaltan diversas limitaciones que afectan la precisión y generalización de modelos:

- **Incertidumbre y Escasez de Datos**

- **Datos Geotécnicos e Inventarios**

Se necesita una gran cantidad de datos geotécnicos detallados como ensayos de laboratorio y muestras de campo, esto delimita el área de estudio (Chou et al., 2025), algunos de los obstáculos más marcados o importantes son la falta de una base de datos histórica de deslizamientos centralizada además

de la restricción en el intercambio en el intercambio de información entre agencias(Yatim Mustapa & Tahar, 2025)

- **Datos de Lluvia**

- Se generan muchos errores en el momento de determinación de umbrales de activación de lluvia por la imprecisión en la localización de pluviómetros o criterios inconsistentes en la identificación de eventos, estos llevan a cabo la subestimación de los umbrales de deslizamientos y un elevado número de falsas alarmas comúnmente conocido como el efecto cry-wolf (Peres et al., 2018)

- **Resolución y Estándares de Datos**

La exactitud en los mapas de susceptibilidad se ve respaldada por la resolución de datos de entrada (Tzampoglou et al., 2025). Con gran frecuencia la información de suelos que se encuentra generalmente no se encuentra en la nomenclatura de ingeniería civil(Arshid et al., 2024)

- **Limitaciones de los Modelos**

- **Modelos Determinísticos/Equilibrio Límite**

Los métodos de equilibrio limite son rápidos y útiles para verificaciones preliminares, no se consideran las relaciones constitutivas como las que son esfuerzo-deformación, el mecanismo de falla progresiva, o el *creep*, debido a que generalmente no se consideran adecuados cuando la estratigrafía o la presión de poros son complejas (Instituto Nacional de Vías., 2025)

- **Generalización y Sesgo**

En los modelos habitualmente se presentan ajustes adicionales por las condiciones específicas del área de estudio, reduciendo la generalización (n.d.; Tzampoglou et al., 2025) (Instituto Nacional de Vías., 2025). En los métodos ML la selección de estrategia para el muestreo del no deslizamiento puede generar un sesgo (Tzampoglou et al., 2025)

2.1.1.1.7 Vacíos de Conocimiento y Oportunidades de Investigación Futura.

La investigación se enfoca en la mitigación de incertidumbres inherentes a datos y en la validación y comparación exhaustiva de metodologías avanzadas

- **Mejora de la Calidad y Estandarización de Datos**

Se necesita una recopilación de datos muy avanzada relacionado con datos geológicos, geotécnicos y climatológicos en este caso se habla con respecto a la lluvia y el suelo, esto con la finalidad de disminuir la incertidumbre, principalmente en cuanto a términos de variabilidad espacial y temporal (Yatim Mustapa & Tahar, 2025, (Instituto Nacional de Vías., 2025))

Se necesita discutir la falta de estandarización respecto con la información geotécnica, en donde se incluyen la falta de coordenadas georreferenciadas y falta de propuestas en estructuras bases de datos para gestión (Soriano-Cuesta et al., 2024)

Es necesario realizar una investigación en donde se puedan establecer valores de porcentajes exactos de distintas variables con enfoques como la superposición ponderada, debido a que en la actualidad se basan en la subjetividad (Arshid et al., 2024)

- **Integración de Información Geotécnica Detallada**

Se necesita continuar con la integración de parámetros geotécnicos intrínsecos como capas con la finalidad de mejorar los modelos de susceptibilidad, debido a que esto demuestra un potencial de mejora (Tzampoglou et al., 2025)

- **Monitoreo y Sistemas de Alerta Temprana (SAT)**

Las futuras investigaciones se deben concentrar en poner en práctica las redes de monitoreo en donde se integran los sensores remotos como por ejemplo la implementación de InSAR en cuanto a deformaciones o satélites para determinar la humedad del suelo/ lluvia, en cuanto a la detección de movimientos inminentes y el desarrollo de sistemas de alerta temprana más precisos, esto requiere de superar las limitaciones de calidad de los datos para determinar umbrales confiables (Peres et al., 2018)

2.1.2 Relación del marco teórico con la programación de ArcGIS Pro

La revisión literaria fue importante en el momento de definir algoritmos y herramientas implementadas en ArcGIS Pro, este análisis permitió la identificación de las metodologías y su evolución a lo largo de los años. A partir de la literatura revisada, se identificó la importancia de variables morfométricas como pendiente, altitud y topografía, características que pueden analizarse por medio de los modelos digitales de elevación (DEM). Con base en los aportes del marco teórico, se implementaron herramientas de análisis espacial en el software ArcGIS Pro, para el cálculo de pendientes y generación de curvas de nivel, procesando datos geoespaciales y caracterizando las condiciones del talud. De esta manera, los artículos analizados sirvieron para la selección de algoritmos de análisis espacial.

2.2 Marco conceptual

En esta parte del documento se definen y especifican los términos técnicos más importantes o relevantes para la investigación con la finalidad de contextualizar su significado dentro del documento relacionado con Gestión de información de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para el estudio de taludes, iniciando desde términos generales de la geotecnia hasta herramientas de análisis y monitoreo para facilitar la comprensión del documento.

Geotecnia: hace referencia a una rama de la ingeniería civil en donde se estudia el comportamiento de la roca y el suelo en términos mecánicos e hidráulicos, garantizando el diseño seguro de obras civiles además de la evaluación de estabilidad de un terreno determinado. (Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G., (1996))

Suelo: se considera un material natural no consolidado, compuestos por minerales, materia orgánica, agua y aire, este se forma gracias a procesos de meteorización y es considerado importante para la estabilidad en taludes y cimentaciones. (Das, B. M., (2011))

Roca: material sólido y natural conformado por uno o varios minerales en donde forman parte de la corteza terrestre, en donde su resistencia y grado de fractura está relacionado directamente por movimientos en masa y procesos de estabilidad. (Hoek, E., & Bray, J., (1981))

Talud: hace referencia a una superficie inclinada, existen de manera natural o artificial, la función es delimitar un volumen de suelo y su estabilidad depende directamente de los factores geológicos, hidrológicos y geotécnicos. (Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L., (2014))

Movimientos en masa: este tipo de movimientos se consideran procesos geodinámicos en donde la roca o el suelo generan un desplazamiento hacia abajo debido a la gravedad en distintas magnitudes. (Cruden, D. M., & Varnes, D. J., (1996))

Deslizamientos: hace referencia a un movimiento de masa representado en un desplazamiento de suelo o roca sobre una superficie de ruptura. (Varnes, D. J., (1978))

Susceptibilidad a deslizamientos: hace referencia a la facilidad o predisposición espacial que tiene un terreno de sufrir movimientos en masa por características naturales, en donde se considera únicamente los factores internos. (Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F., (2005))

Vulnerabilidad: se considera como el grado de pérdida de elementos expuestos por aparición de una amenaza, este depende de factores sociales, económicos, físicos y ambientales. (UNDRR, (2017))

Riesgo: hace referencia a la combinación de posibilidad de aparición de una amenaza junto con sus consecuencias negativas, teniendo en cuenta la susceptibilidad y vulnerabilidad de los elementos expuestos. (Varnes, D. J., (1984))

Modelos de susceptibilidad: herramienta analítica mediante la cual se pueden calcular las probabilidades espaciales de deslizamientos, mediante la combinación de factores importantes como la pendiente, litología, precipitación o uso de suelo. (Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F., (2005))

Sistemas de información geográfica (SIG): estos sistemas ayudan con la captura, almacenamiento y visualización de información espacial, considerándose importantes para en la modelación de susceptibilidad a deslizamientos. También es considerado en geotecnia como una integración de datos, análisis y visualización en el momento de toma de decisiones dentro del marco de trabajo. (Burrough, P. A., & McDonnell, R. A., (1998))

InSAR (interferometría Radar de Apertura Sintética): técnica de teledetección en donde se emplean imágenes de radar obtenidas por satélites con la finalidad de distinguir

deformaciones del terreno, siendo implementada para la detección de movimientos lentos en los taludes. (Tomás, R., Lopez-Sanchez, J. M., Li, Z., & Liu, P., (2014))

LiDAR (Light Detection and Ranging): tecnología de teledetección en donde se emplean pulsos laser con la finalidad de generar modelos digitales de buena resolución para identificar microformas del relieve, pendientes y zonas probablemente inestables. (Wehr, A., & Lohr, U., (1999))

2.3 Marco legal

En esta parte del documento se hace referencia a toda la normativa que se debe tener en cuenta para la elaboración del documento reuniendo el conjunto de normas, reglamentos y lineamientos necesarios para la gestión de información de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para el estudio de taludes.

Constitución política de Colombia: en la constitución se establecen principios importantes para la protección de la vida, bienes y el ambiente. principalmente en los artículos 79 y 80 en donde se nombran las obligaciones del estado de proteger el medio ambiente y prevenir el deterioro ambiental generado por agentes externos en donde se encuentran la mitigación de riesgos como los deslizamientos (constitución política de colombia , 1991)

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR 10): este reglamento consigna los requisitos técnicos requeridos para el diseño y construcción para edificaciones seguras, esta norma establece especificaciones para la caracterización del suelo, investigación geotécnica y además una evaluación de estabilidad en taludes tanto naturales como artificiales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2010))

Manual de Estabilidad de Taludes-INVIAS (Borrador 2025): este manual elaborado por el instituto nacional de vías reúne u documento técnico que se puede utilizar como guía para

la evaluación, análisis y mitigación de problemas relacionados directamente con la estabilidad en taludes, la versión borrador que se dio a conocer en el 2025 cuenta con metodologías para la investigación de sitio, caracterización geotécnica, análisis de estabilidad y medidas de intervención (Instituto Nacional de Vías., 2025)

3. Método

La investigación se desarrolló en tres etapas principales. En primera instancia, se realizó un análisis y contextualización de la zona de estudio para comprender las características físicas y ambientales. Posteriormente, se llevó a cabo una descarga de datos como suelo y erosión mediante Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), para determinar condiciones del terreno y análisis de factores influyentes en la estabilidad. Finalmente, se realizó un análisis de los resultados para conocer el comportamiento del talud, condiciones actuales y proponer posibles soluciones o recomendaciones. Este análisis permitió generar una caracterización morfométrica del talud y determinar la calidad de material presente, aportando una base técnica para la evaluación de su estabilidad.

Antes de realizar el análisis al talud se debe tener claridad del tipo de material presente, basado en esta información se pueden identificar problemas de deslizamiento o filtraciones debido a su granulometría o tamaño de roca presente. Esta caracterización también ayuda a dar soluciones enfocadas y pertinentes. Asimismo, ayuda a una descripción más específica del terreno.

3.1 Descripción y análisis del talud

En la figura 6 se evidencia el estado actual del talud, en donde se identificaron los materiales presentes, se observó presencia de cobertura vegetal y algunas fisuras que representan la presencia de agua, también se puede distinguir una variabilidad en el tamaño de roca presente

en donde este hace referencia a una granulometría variable entre material fino como arcillas y arenas y uno más grueso como fragmentos de roca o suelos duros.

Figura 6 Talud de estudio Vista Frontal

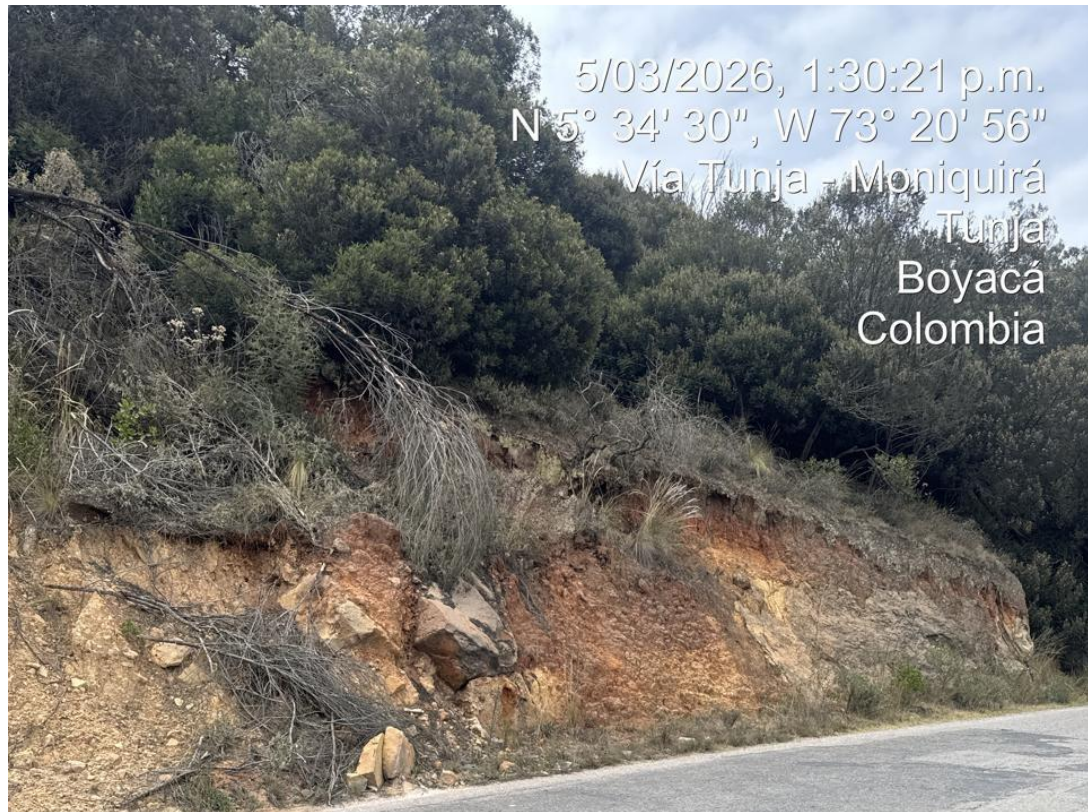


Fuente: Elaboración propia

3.2 Definición del movimiento

En la figura 7 se puede identificar una remoción de masa, donde se puede clasificar como un deslizamiento rotacional, se clasifica de este modo debido a que el movimiento ocurre a lo largo de la superficie de falla curva cóncava hacia arriba que es común en suelos cohesivos y rocas blandas (Rodríguez, guillermo, 2025)

Figura 7 Talud vista perfil



Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se pueden identificaron diversas partes del movimiento delimitadas por los colores, donde el color rojo señala la corona, el naranja representa el límite del escarpe principal y finalmente el verde representa la zona de la superficie de falla que es donde ocurre el deslizamiento previamente descrito.

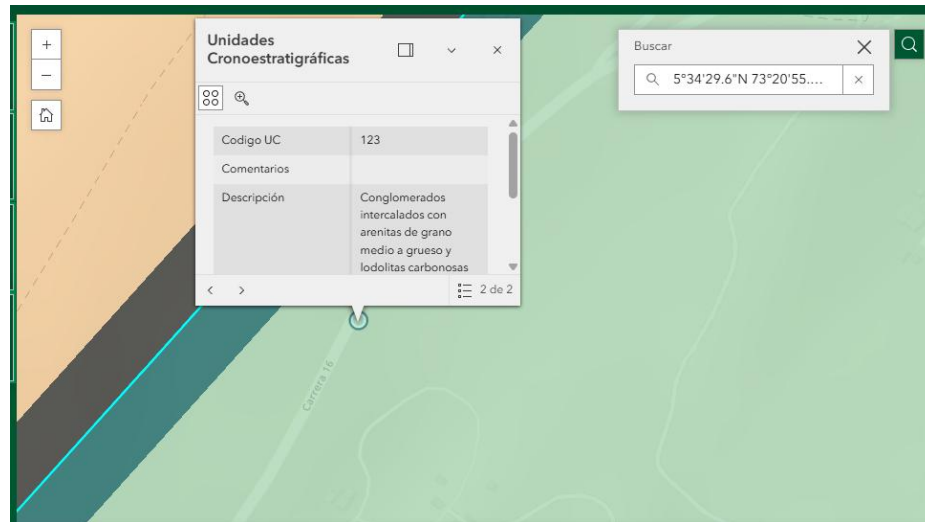
Figura 8 Partes del movimiento del Talud



Fuente: Elaboración propia

Luego de la descripción visual del material, se desarrolló la búsqueda del material presente en el talud mediante el servicio geológico colombiano (SGC), como se observa en la figura 9, con la finalidad de determinar la edad del material y sus principales características. Este tipo de información permite caracterizar adecuadamente el material, determinar sus propiedades y realizar un análisis más preciso y enfocado.

La figura fue tomada del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el mapa geológico de Colombia a una escala 1:500 000, esta escala representa un nivel de detalle bajo, se utilizó esta escala debido a que se iba a realizar una caracterización de material, generalmente esta escala es utilizada para un análisis nacional.

Figura 9 material presente en el talud

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2020)

3.3 Limitaciones de escalas en los geoportales

Las limitaciones de escala que se presentan en algunos geoportales colombianos afectan directamente a la resolución de datos espaciales. Estas limitaciones afectan la precisión y nivel de detalle en los análisis geográficos cuando se realizan análisis con herramientas SIG.

Muchos portales institucionales colombianos como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), publican información cartográfica elaborada en escalas predeterminadas, como 1:25.000, 1:50:000 o 1:100.000. Significa que los mapas fueron diseñados para utilizarse en ese rango, por lo que el uso de escalas más detalladas presenta errores de interpretación o pérdida de precisión (Servicio Geologico Colombiano , 2020) (Instituto Geografico Agustín Codazzi, 2020)

Asimismo, cuando la cartografía es representada en escalas pequeñas, como 1:100.000 o 1:250.000, muchos elementos del territorio se simplifican y representan de forma general con la

finalidad de facilitar su visualización. Como consecuencia algunos detalles topográficos o geomorfológicos no se logran representar con exactitud, afectando análisis que necesitan un alto nivel de detalle. (Instituto Geografico Agustín Codazzi, 2020) (Servicio Geologico Colombiano , 2020)

3.4 Tipo de material y descripción

En la ilustración anterior se logró identificar una unidad litoestratigráficas presentes en el material identificados en el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la unidad encontrada está denominadas con el código E1-Sc, esto significa que el rango temporal abarca del paleoceno

- Unidad E1-Sc:

En esta unidad se presenta una intercalación entre arenitas de grano medio a grueso e lodolitas carbonosas, esto hace referencia a ambientes de alta energía, la presencia de intercalaciones carbonosas hace referencia a periodos de calma hidrodinámica, la edad paleoceno representa una etapa de actividad sísmica activa. (UPME – Unidad de Planeación Minero Energética, (2013))

Las arenitas de grano medio a grueso son rocas sedimentarias detríticas al igual que las lodolitas carbonosas, sin embargo, el tamaño de grano y los componentes las diferencian, las areniscas presentan concentración de granos de arena y se forman en ambientes de alta energía, lugares donde el agua o el viento tienen suficiente fuerza como para desplazar y depositar partículas grandes. Las lodolitas por otro lado contienen en gran medida la proporción de materia orgánica y se forman en ambientes de baja energía, generalmente en condiciones reductoras donde el oxígeno es escaso. (Boggs , s, 2014)

3.5 contextualización de la zona de localización del talud

3.5.1 Topografía

Las condiciones de topografía en donde está localizado el terreno son de interés influyente debido a que es de gran ayuda para distinguir las condiciones de drenaje del suelo y movimientos en masa donde se logra ver afectado en gran medida el sitio de estudio. Para establecer las características necesarias (alturas, pendientes y geoformas) se realiza un debido análisis de planos altimétricos a escala para establecer y definir la altura de la franja del terreno todo esto con la finalidad de identificar a nivel local las alturas, pendientes y curvaturas que presenten influencia en el talud.

3.5.1.1 Topografía regional

Boyacá está localizada en el centro oriente de Colombia, cuenta con una variedad geográfica diversa y compleja debido a esto existe variedad de ecosistemas, climas y paisajes en donde se encuentran desde grandes montañas hasta valles fértiles en donde se enriquece su biodiversidad, potencial agrícola y turístico, la mayor parte del departamento cuenta con una zona de montaña, gracias a su disposición orográfica la cordillera ocupa casi todo el ancho del territorio y atraviesa longitudinalmente SW a N, (Gobernacion de Boyaca , 2012)

superiores a 500 m.s.n.m. siendo una región rica en petróleo y geografía plana; por otra parte, en el altiplano se encuentran alturas entre 2600 y 2800 m.s.n.m. compuesto por valles intercalados con buena fertilidad y belleza como los valles de Tunja y Sogamoso siendo de las zonas más densamente pobladas del país y finalmente en esta región se encuentran zonas abruptas escarpadas con alturas de hasta 5300 m.s.n.m. (Gobernacion de boyaca, 2012)

Debido a la gran variedad de alturas dentro del departamento cuenta con diversidad de pisos térmicos que contemplan desde el cálido hasta las nieves constantes y gracias a ello genera una gran variedad de especies de flora y fauna. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

- Cordillera Oriental: Está cordillera atraviesa el departamento de sur a norte y se divide en tres ramales:
 - i. Occidental: entre los ríos Magdalena y Suárez, destacando el Páramo de Saboya con 4.000 m.s.n.m. (Gobernacion de Boyaca , 2012)
 - ii. Central: entre los ríos Suárez y Chicamocha, separando el valle de Chiquinquirá del altiplano de Tunja, con el Páramo de Chontales a 4.000 m.s.n.m. (Gobernacion de Boyaca , 2012)
 - iii. Oriental: el más alto, limita con el departamento de Arauca y alberga la Sierra Nevada del Cocuy, con el Alto de Ritacuba alcanzando los 5.493 m.s.n.m (Gobernacion de Boyaca , 2012)
- Altiplano Cundiboyacense

Ubicado en el centro del departamento, este altiplano se caracteriza por tierras altas y planas, con altitudes que oscilan entre 2.470 y 2.850 m.s.n.m. Está compuesto por valles intercalados de gran fertilidad y belleza, como los valles de Tunja, Sogamoso, Belén, Corrales, Floresta y Paz de Río, entre otros. Este altiplano es una de las regiones más ricas y densamente pobladas del país. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

- Piedemonte de los Llanos Orientales

Esta zona baja ubicada al costado oriental de la Cordillera Oriental limita con el departamento de Casanare. Los terrenos son ondulados, escarpados y de poca fertilidad,

con bosques nativos. Es rica en recursos minerales como sal, azufre y plomo, y su economía se basa principalmente en la ganadería. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

- Valle del Magdalena Medio

Al occidente del departamento, en la región del Territorio Vásquez, se encuentran tierras bajas con altitudes inferiores a 500 m.s.n.m. Esta región es rica en petróleo y presenta una geografía plana, cubierta por selvas y ciénagas. Es una zona insalubre y casi despoblada. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

3.5.1.1.1 Ecosistemas y páramos destacados

- Páramos

Boyacá alberga varios páramos importantes, como el de Sumapaz, Pisba, La Rusia, Guantiva, Chontales y Rechíniga. Estos ecosistemas son cruciales para la regulación hídrica de la región, ya que actúan como esponjas naturales que capturan y almacenan agua. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

- Sierra Nevada del Cocuy

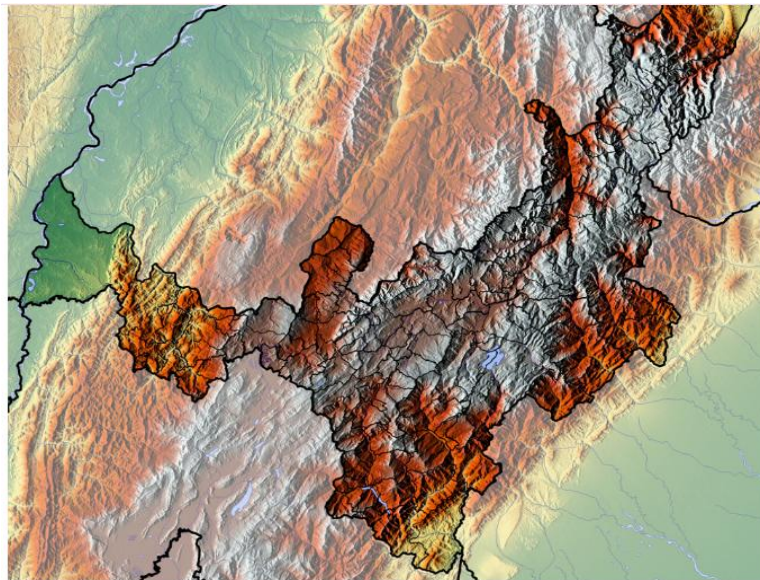
Es la única altura nevada de la Cordillera Oriental, con veinticinco nevados, entre los que se destacan el Ritacuba Blanco, el Pan de Azúcar, el Púlpito del Diablo y el Ritacuba Negro. Esta zona es un importante atractivo turístico y fuente de biodiversidad. (Narváez, s.f.)

3.5.1.2 Importancia geográfica y cultural

La diversidad topográfica de Boyacá no solo enriquece su paisaje, sino que también influye en su desarrollo económico, social y cultural. Los diferentes pisos térmicos y ecosistemas han permitido una variedad de actividades productivas, desde la agricultura en

los valles fértiles hasta la ganadería en las zonas de piedemonte. Además, la riqueza natural ha convertido a Boyacá en un destino turístico de gran interés, especialmente para los amantes del ecoturismo y la aventura. En la figura 10 se observa (Gobernacion de Boyaca , 2012)

Figura 10 Mapa Topográfico de Boyacá

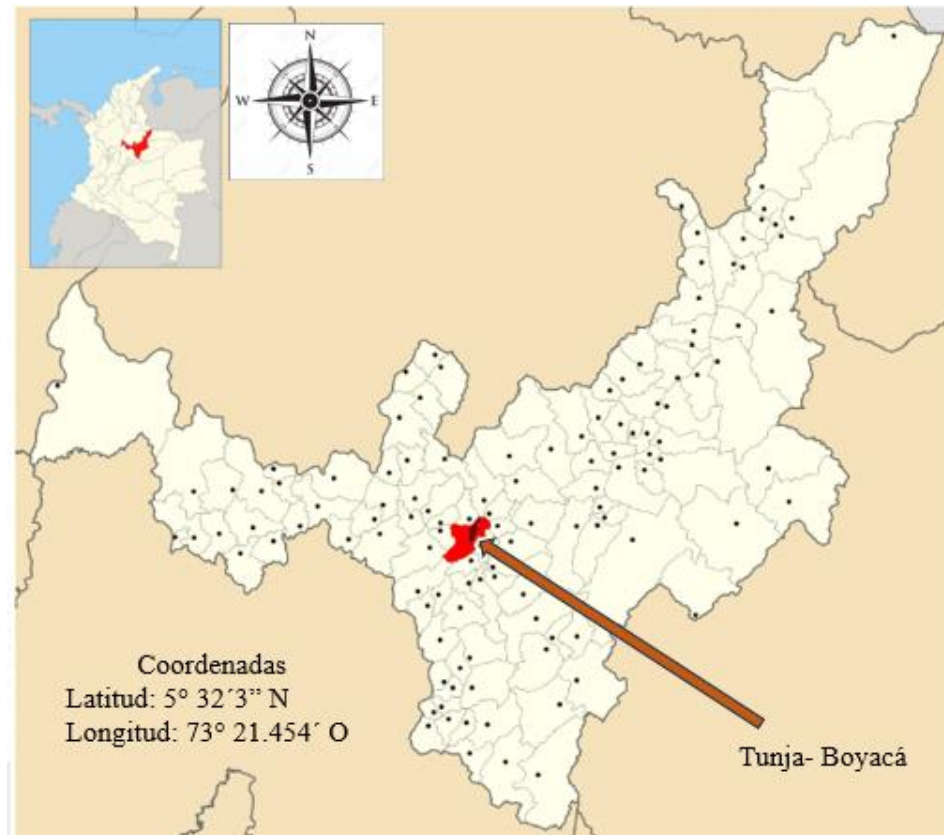


Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020)

3.5.1.3 Topografía local

Luego de establecer y caracterizar la topografía regional aclarando la gran diversidad que se tiene en la región se procede a caracterizar la topografía exacta del lugar en donde se localiza el talud para comprender con mayor facilidad el material por el que está constituido y sus respectivas pendientes. (Ver Apéndice E)

En la figura 11 se encuentra la localización del municipio de Tunja dentro del departamento de Boyacá y las coordenadas correspondientes.

Figura 11 Localización del municipio de Tunja

Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2020)

El municipio de Tunja, capital del departamento de Boyacá, con alturas que varían desde los 2.400 msnm hasta los 3.250 msnm como se observa en la figura 12, con una latitud de **5° 32' 3'' N** y longitud de **73° 21.454' O**. Este municipio presenta una extensión de 119,38 Km², la delimitación urbana del municipio abarca un área de 20,84 Km² y el área rural abarca un área de 96,57 Km². Presentando una temperatura promedio de 12° C. (Alcaldía Mayor de Tunja., 2019) (Topographic Map., 2024)

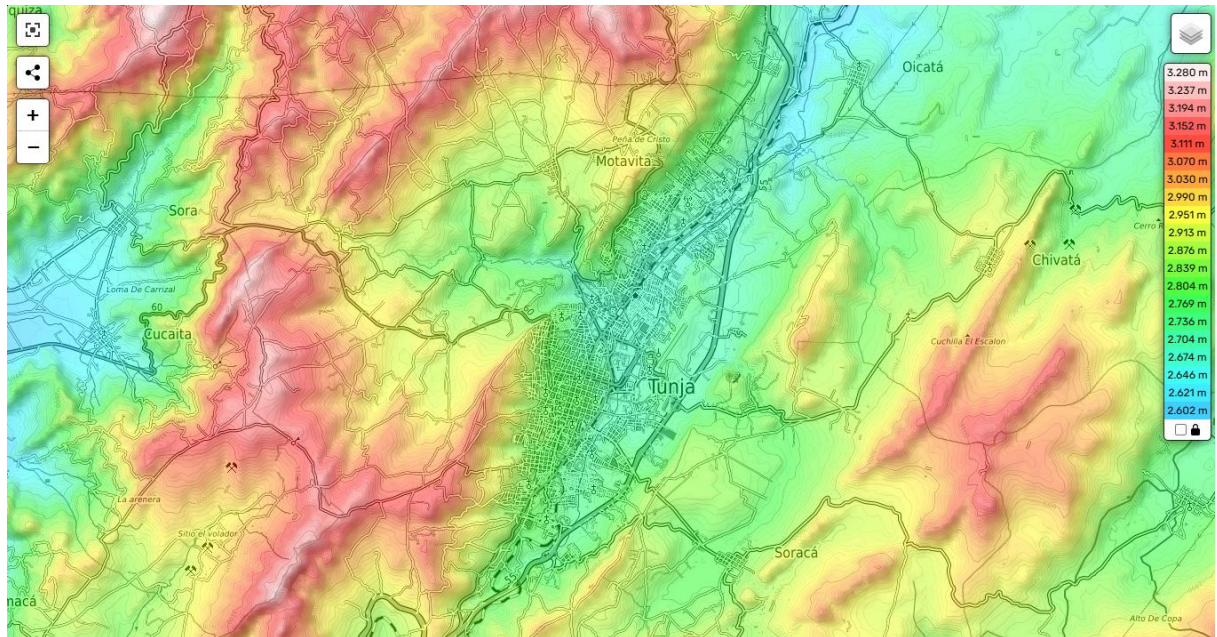
Este municipio es conocido por las riquezas arquitectónicas, atractivos religiosos, culturales e históricos. También es conocido como una ciudad estudiantil debido a que cuenta con

13 instituciones educativas públicas con niveles preescolar, primaria secundaria y media y 116 instituciones privadas. Además, cuenta con 12 instituciones de educación superior. (Alcaldía Mayor de Tunja., 2019) (Topographic Map., 2024)

Este municipio se localiza en el Altiplano Cundiboyacense, debido a esta ubicación geográfica significa una topografía mayormente montañosa y ondulada, esta es una principal característica de las regiones andinas de alta montaña. Dentro del municipio existe una variación de mesetas, colinas y valles interandinos o valles que se encuentran localizados entre montañas, generando un relieve irregular con pendientes variables. (Alcaldía Mayor de Tunja., 2019) (Topographic Map., 2024)

Las variaciones topográficas generan variación en diversidad de relieves y pendientes dentro del municipio, condicionando la geomorfología local y procesos de erosión y drenaje. (Alcaldía Mayor de Tunja., 2019) (Topographic Map., 2024)

Dentro del área urbano del municipio se identificaron tres topografías principales. En primer lugar, se localiza el valle interandino, en una altitud aproximada de 2.650 msnm, en donde se localiza gran parte de actividades urbanas y de infraestructura. En segundo lugar, una zona de meseta central, con una altitud cercana a los 2.770 msnm, donde se localiza el centro histórico de la ciudad. Finalmente, se identificó una zona de colinas y elevaciones periféricas, principalmente en el sector Occidental y algunas áreas rurales, con altitudes de 2900 msnm o superiores, generando un relieve escapado y pendientes pronunciadas. (Alcaldía Mayor de Tunja., 2019) (Topographic Map., 2024)

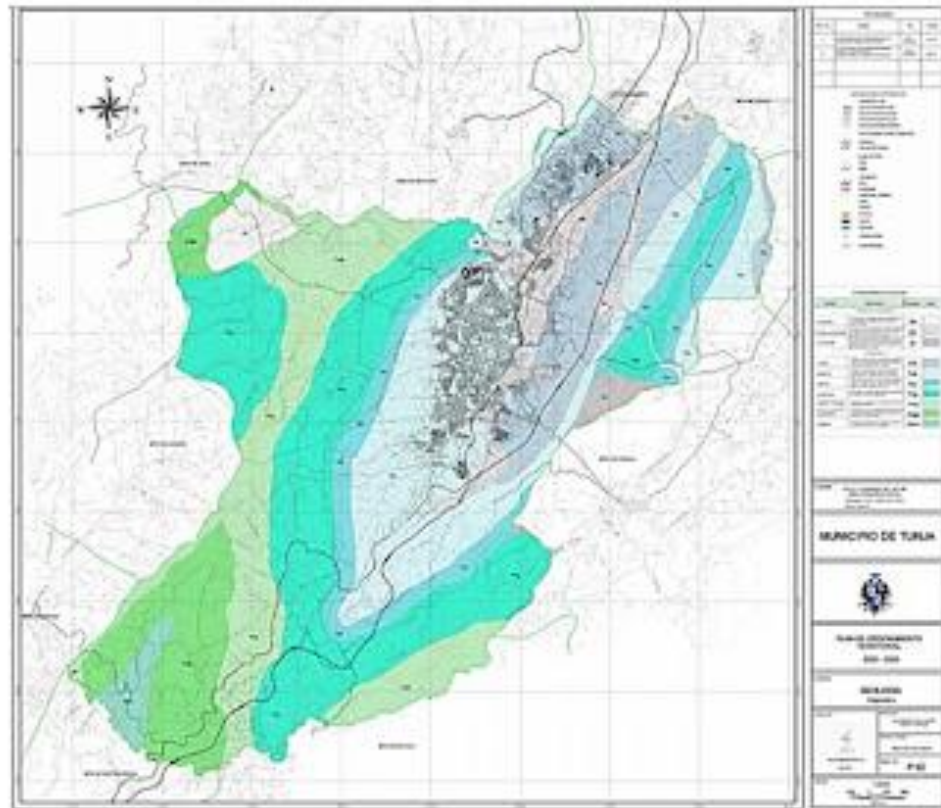
Figura 12 Mapa topográfico con pendientes del municipio de Tunja

Fuente: (Topographic Map Viewer., 2023)

3.5.1.3.1 Geología y geomorfología

Los procesos geológicos se pueden clasificar en dos clases por un lado están los externos en donde estos actúan sobre la superficie terrestre mediante erosión, transporte y sedimentación de materiales cambiando el aspecto externo de la tierra; por otra parte, tenemos los internos en donde se da origen a nuevas estructuras, como se observa en la figura 13. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

Figura 13 Mapa geológico de Tunja



Fuente: (Alcaldia Mayor de Tunja , 2019)

El mapa geológico permite identificar las formaciones predominantes en el municipio, como rocas sedimentarias, depósitos aluviales o materiales residuales, así como estructuras geológicas importantes, tales como fallas o plegamientos.

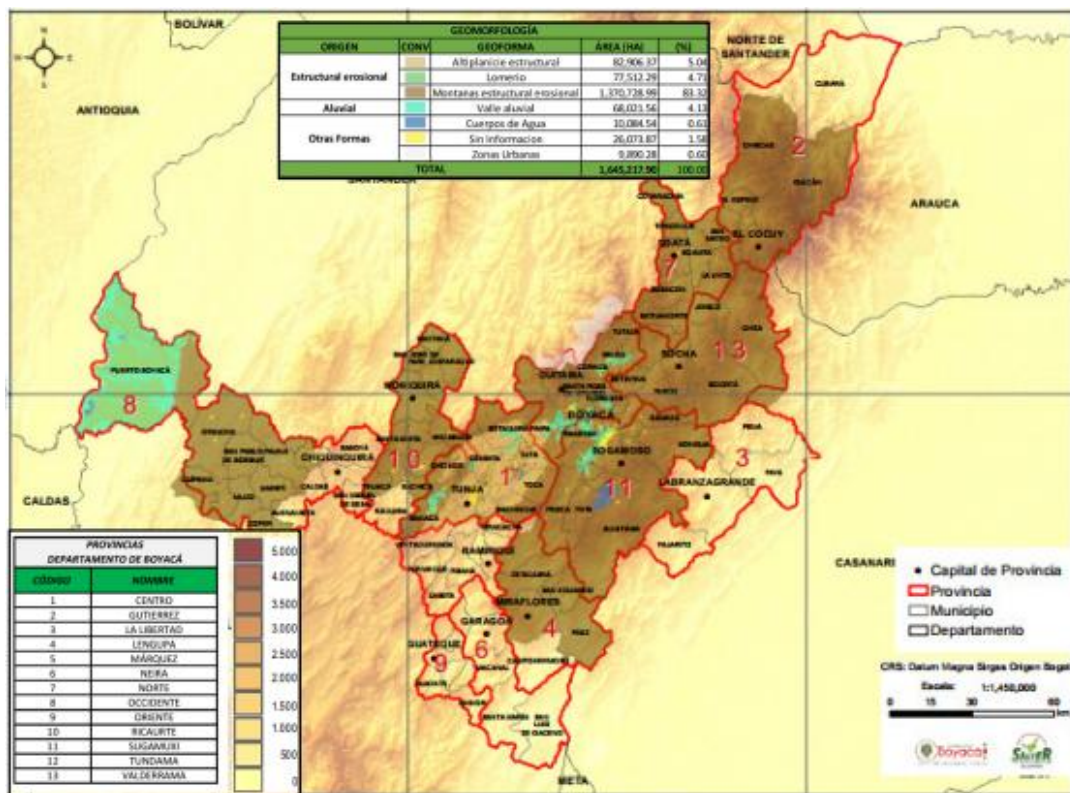
En la figura 14 se encuentra la leyenda o descripción del mapa geológico en donde se especifica a que corresponde cada color, su simbología y una breve descripción del depósito o formación presente en el territorio de Tunja, Boyacá.

Figura 14 Leyenda del mapa geológico del municipio

Unidad	Descripción	Símbolo	Color
DEPOSITOS CUATERNARIOS			
COLUVIAL	Constituido por grandes bloques depositados por gravedad, embebidos en una matriz arenosa arcillosa.	Qc	
FLUVIO-LACUSTRE	Depósitos no consolidados de limos constituidos por intercalaciones de arena y arcilla de color carmelita y con oxidaciones rojizas.	Qfl	
LACUSTRE	Gránulos de arenisca blanca de grano fino con una matriz arcillosa, chert, arcilla amarilla, arena arcillosa de grano fino a medio con fragmentos de arenas rojas y amarillas.	Ql	
FORMACIONES			
TILATA	Arenas y limos de color variable entre amarillo y rojo, con intercalaciones conglomeráticas y frecuente estratificación cruzada.	TQt	
BOGOTA	Sucesión monótona de arcillolita agarrada de colores gris, violeta y rojo en bancos y separados por niveles de arenisca arcillosa.	Tpb	
CACHO	Arenisca cuarzosa de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio, presentando algunos niveles conglomeráticos.	Tpc	
GUADUAS	Areniscas y arcillas abigarradas con presencia de mantos de carbón explotable.	TKg	
GRUPO GUADALUPE LABOR Y TIENA	Shales grises oscuros con pequeñas intercalaciones de arenisca.	Ksgl	
GRUPO GUADALUPE PLAENERS	Porcelanitas, chert y esporádicas fosforitas con una parte intermedia de arcilla y arenisca con presencia de foraminíferos.	Ksgp	
CONEJO	Areniscas intercaladas con niveles de shales de color gris oscuro a amarillento.	Kscn	

Fuente: (Alcaldía Mayor de Tunja , 2019)

En la figura 15 se encuentra el mapa geomorfológico del departamento de Boyacá, este nos permite una visualización y contextualización de la geomorfología del departamento. Este departamento cuenta con un ambiente morfogenético estructural- erosional, esto significa que el paisaje está determinado en mayor parte por estructura geológica, este tipo de estructura evoluciona principalmente por procesos de erosión. (EQUIPO TECNICO GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, , 2018)

Figura 15 Mapa Geomorfológico de Boyacá

Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Boyacá., 2016)

3.5.1.3.1.3 Clima

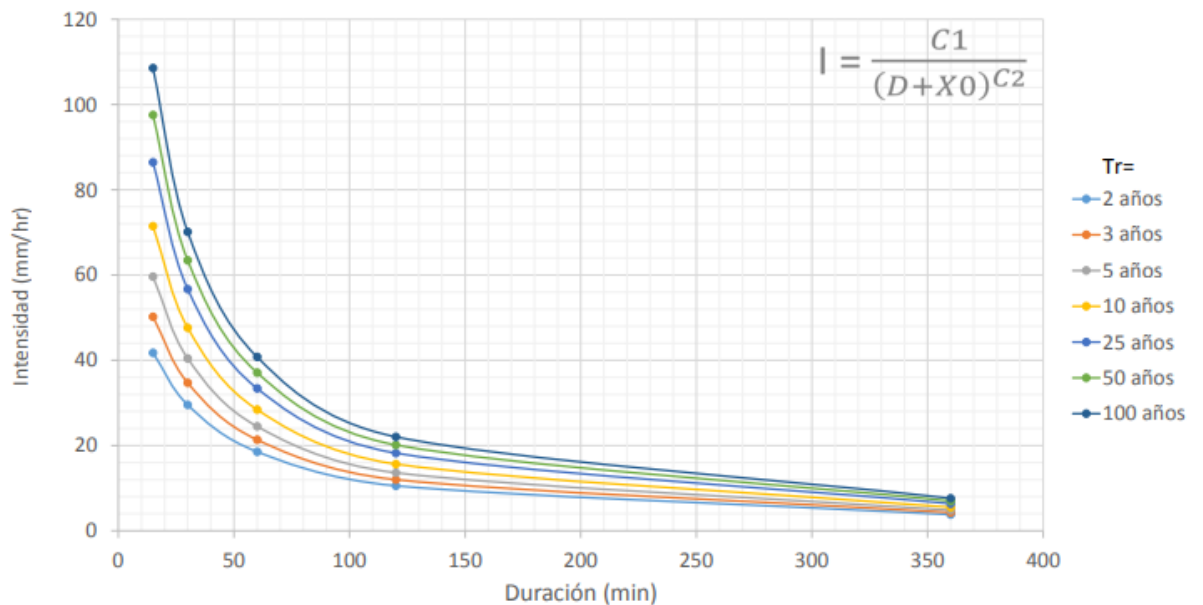
En Boyacá se encuentra gran variedad de pisos térmicos desde cálido con temperaturas superiores a 28 °C como en el valle medio magdalena y piedemonte llanero, pasando por el templado en vertientes occidentales y orientales, frío especialmente en zonas montañosas en la parte central hasta llegar a zonas con temperaturas por debajo de 0 °C como en el nevado del cocuy localizado al noreste del departamento. (Gobernacion de Boyaca , 2012)

Debido a la gran variedad de pisos térmicos localizados dentro del departamento de Boyacá se realizó un análisis en el municipio de estudio localizado en la parte central de este, mediante la observación de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) desarrollando un estudio en la intensidad de lluvia.

La finalidad de estudio de curvas IDF fue analizar y estimar la intensidad de lluvia relacionada con diversas duraciones y periodos de retorno. En geotecnia las curvas IDF se implementan para conocer eventos de lluvias críticas que generan infiltración en el suelo y como consecuencia incremento en presión de poros dentro del talud (IDEAM, Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para estaciones meteorológicas en Colombia., 2016)

En la figura 16 se observan las curvas IDF de la estación de la UPTC, donde se observa que, a mayor duración de la lluvia, la intensidad disminuye y que, a una mínima duración, la intensidad aumenta con el periodo de retorno (T). Esto señala que las lluvias más intensas son menos frecuentes, pero más peligrosas, como son el caso de T=50.

Figura 16 Curvas IDF

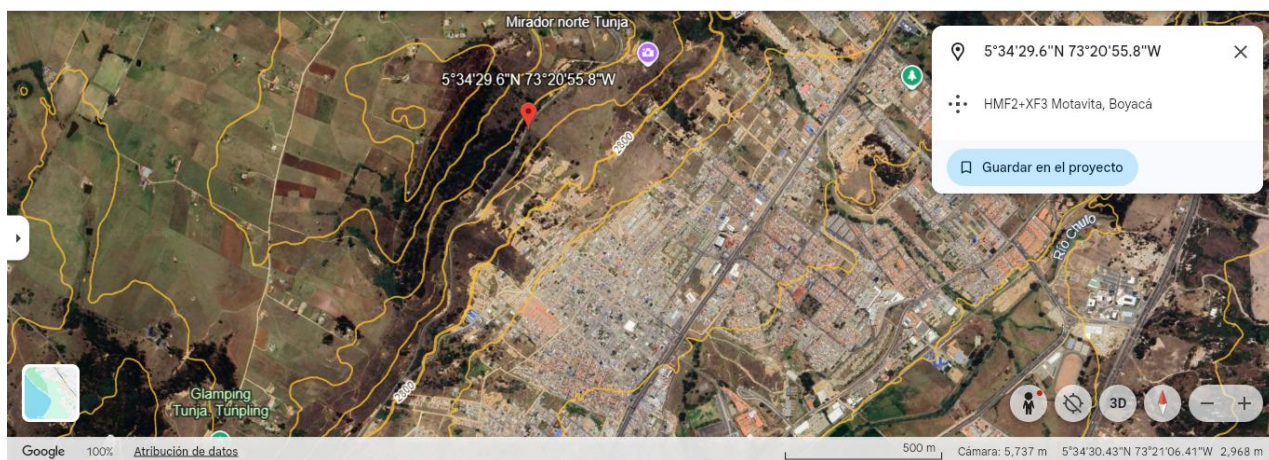


Fuente: (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017)

3.5.1.3.1.4 Vista satelital.

La vista satelital del sector occidental de la ciudad de Tunja, Boyacá, donde se observa una combinación de zonas urbanizadas y áreas con cobertura vegetal. Dentro del recuadro resaltado se distingue claramente el límite entre el área urbana y una zona de topografía más irregular, con vegetación densa y caminos sinuosos, lo cual es típico de áreas con pendientes pronunciadas, como se observa en la figura 17.

Figura 17 Zona de Estudio



Fuente: (Google Earth, 2026)

3.5.1.3.1.5 Descripción contextual para una exploración geotécnica del talud.

Este talud se encuentra en el límite entre la urbanización y una zona natural o semirrural, el área presenta una transición muy marcada entre la ladera y el sector construido, lo que podría generar condiciones de inestabilidad si no se manejan adecuadamente las cargas, drenajes y cambios en el uso del suelo. (ver Apéndice D)

En la figura 17 se puede identificar una clara zonificación del terreno, donde la parte derecha representa una alta densidad de viviendas con calles dispuestas en forma de cuadrícula, mientras que en el sector izquierdo predominan zonas verdes, posiblemente con pendientes

pronunciadas. La zona de la ladera está atravesada por caminos secundarios que facilitarían el acceso de maquinaria de perforación o equipos de monitoreo. Además, la cobertura vegetal presente en algunas áreas de la ladera sugiere una estabilidad superficial parcial, aunque podría estar ocultando procesos erosivos o fracturas internas que deben ser evaluados.

Luego de realizar una contextualización de la zona en donde se localiza el talud, se procedió al análisis de las condiciones generales del terreno. Dichas condiciones se evaluaron mediante la implementación herramientas de georreferenciación espacial, como ArcGIS, permitiendo el desarrollo de un análisis complementario.

En la presente investigación se presentó únicamente la implementación de estas herramientas, con la finalidad de evidenciar su aplicabilidad en proyectos de ingeniería y la facilidad de integración en los procesos de análisis.

la metodología anteriormente explicada pretende realizar un análisis del comportamiento de las condiciones actuales del talud en donde se relaciona también con el estudio y explicación de los movimientos que se han generado en el talud debido a agentes externos que afectan las condiciones como clima, presencia de agua, esfuerzos a los que se encuentra sometido el material y otros agentes que afectan directamente a la remoción de material generando un movimiento y clasificación específico permitiendo clasificarlo según el tipo de movimiento y así explicando factores que afecten.

4. Resultados

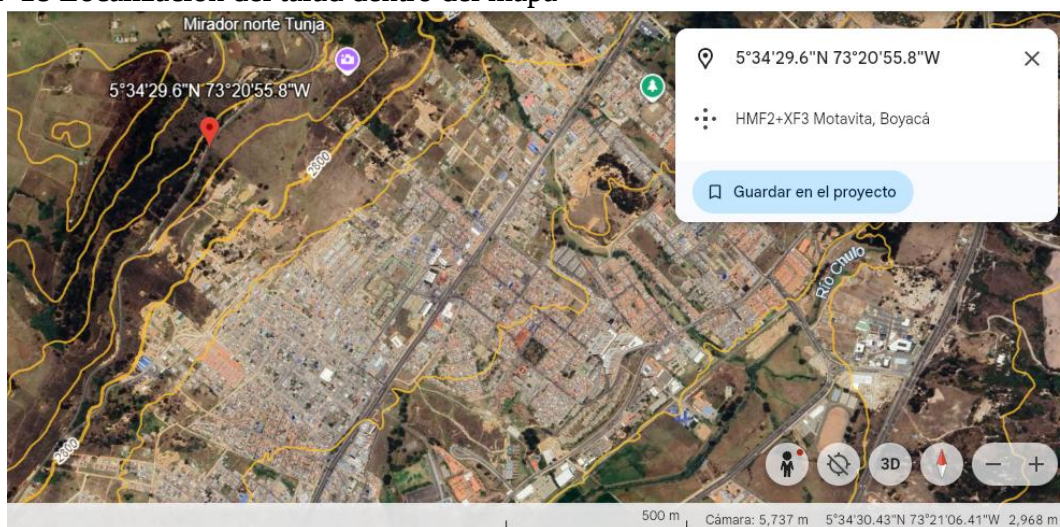
4.1 ArcGIS

Luego de un breve análisis del clima, topografía y geología de la ciudad de Tunja para contextualizar las condiciones en las que se encontró el talud, se procedió a implementar el programa **ArcGIS Pro**, este programa combina el análisis geoespacial avanzado, la visualización

3D y la gestión de datos geológicos. La implementación de la herramienta brindó beneficios a la investigación. La ejecución del programa fue mediante el análisis de las propiedades y características del talud, entendiendo el comportamiento del material y su respuesta a condiciones naturales.

En la figura 18 se distingue la localización del talud dentro del municipio de Tunja, esto con el propósito de realizar un enfoque exacto para la descripción y estudio del talud.

Figura 18 Localización del talud dentro del mapa

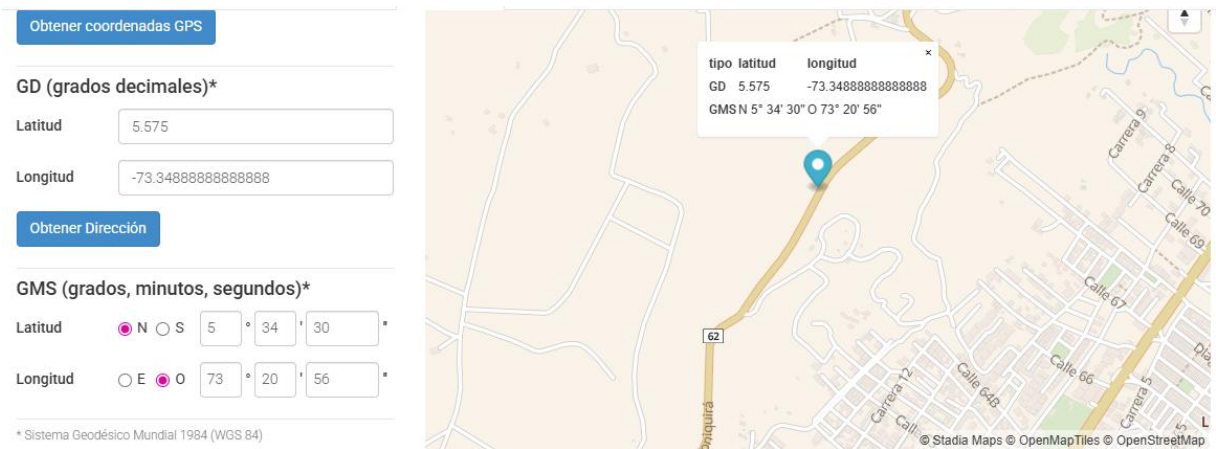


Fuente: (Google Earth, 2026)

En la figura 19 se observa el área del talud estudiado, localizado en el perímetro urbano de la ciudad de Tunja exactamente en el sector nororiental designado al barrio asís más exactamente en la vía que comunica a Tunja con el municipio de Monquirá localizado en las coordenadas $5^{\circ}34'30''\text{N}$ y $73^{\circ}20'56''\text{W}$, carretera asignada como regional por su conexión intermunicipal, la figura 20 destaca una figura poligonal de color verde en donde se representa el área específica del talud, el polígono se encuentra delimitado en un cuadrado que se considera la zona de estudio, este rectángulo corresponde a una zona delimitada, donde se realizaron los análisis geoespaciales mediante el programa, desarrollando el estudio de la zona donde se pretende interpretar el

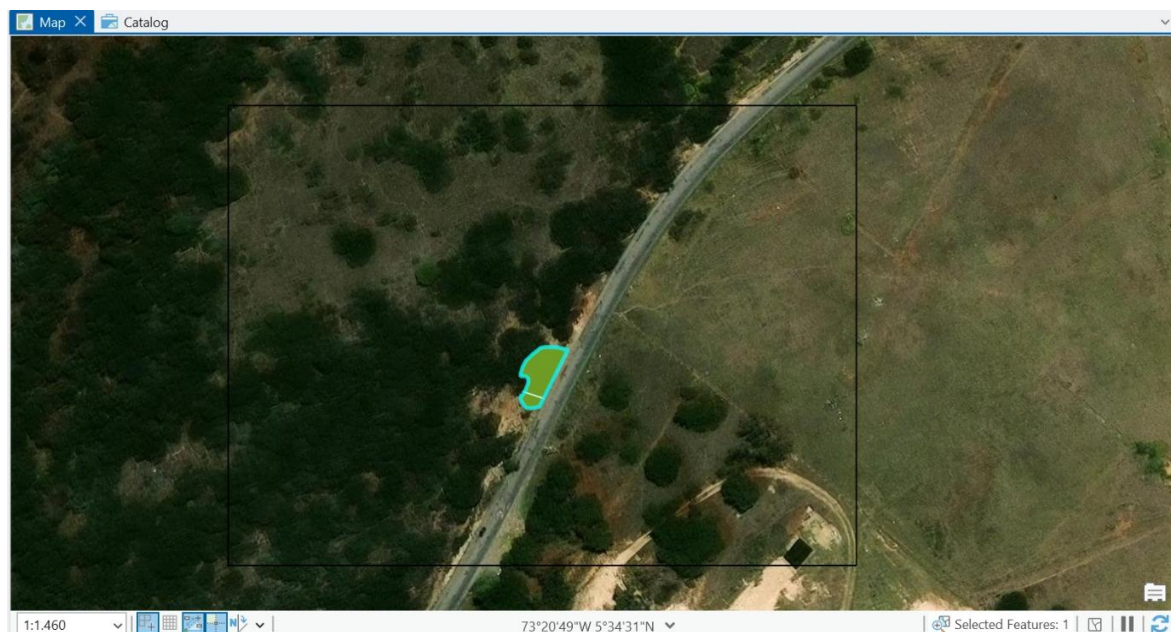
comportamiento del suelo. Es importante definirla para la aplicación de capas y selección del Modelo de Elevación Digital (DEM). (Ver Apéndice A)

Figura 19 Coordenadas y localización del talud dentro de la ciudad de Tunja



Fuente: (Coordenadas-GPS.com., 2026)

Figura 20 Delimitación del talud y Zona de Estudio



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realizó el análisis del talud mediante la implementación de ArcGIS Pro. La creación de varias capas permitió caracterizar las condiciones del talud actuales en donde identificaron puntos clave.

El análisis de las capas se desarrolló mediante el programa ArcGIS Pro. Se consulto el geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la cual es la entidad encargada de la cartografía oficial del país. A través de esta plataforma se recopiló información necesaria para el análisis del suelo, utilizando los datos abiertos en donde se localizan diferentes capas geográficas necesarias para el estudio geoespacial del talud. Permitiendo integrar variables territoriales para entender las características del terreno.

A diferencia de las otras capas que se encuentran en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Modelo de Elevación Digital (DEM) se descargó de la plataforma Landviewer, en este caso se delimito un área de interés y se identificó el DEM que abarque más zona de estudio para generar un análisis completo en donde se localiza el talud. Esta plataforma en línea permite la visualización, análisis y descargar de imágenes satelitales de la tierra, esta herramienta permite la aplicación de filtros espectrales y obtener información necesaria para investigaciones y proyectos en sistemas de información (SIG). (Analytics, (2023))

Para subir los documentos al software se realizó la ruta abrir **ArcGIS Pro** → **Browser** → **Carpeta donde se localizan las capas descargadas** → **se selecciona** → **abrir**, esta ruta se utiliza para cargar las capas de erosión, suelo y DEM al software para posteriormente analizarlas, en el caso de la delimitación de la zona de estudio accede a la ruta **Analysis** → **Tools** → **Clip (para cortar las capas)** → **Clip Raster (para cortar la capa del DEM)** → **Input Raster (DEM)** → **Output Raster (zona de estudio)**. Para la zona de estudio **View** → **Catalog** → **se crea carpeta** → **New** → **File Geodatabase** → **New** → **Feature class** → **se definen parámetros**.

En el análisis del mapa geológico se obtuvo como respuesta que de acuerdo con la localización del talud se encuentra en áreas muy altas y montañosas. La representación en el programa fue un color marrón oscuro.

En la figura 21 se encuentra el análisis de mapa temático de la erosión en el sector de la zona de estudio, se identificó una zona extensa de color verde que representa el material superficial predominante posiblemente de suelos de baja consolidación como materiales terrosos, arcillosos o limosos, una zona en donde se evidencia riesgo de erosión activa.

Figura 21 Erosión



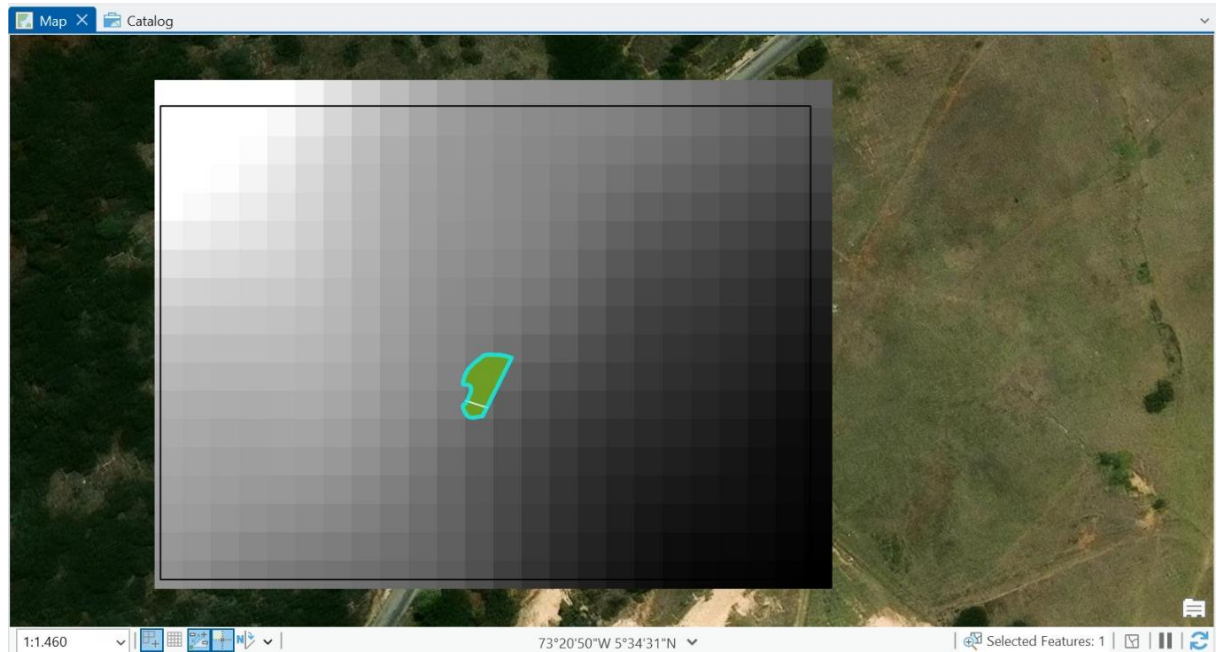
Fuente: Elaboración propia

En la figura 22 se encuentra el mapa de cobertura de suelo, el área representa una cobertura homogénea, significando una baja variabilidad con respecto al tipo de cobertura. La baja cobertura disminuye la protección del terreno e incrementa el riesgo de deslizamientos superficiales, significando áreas con bajos niveles de vegetación presente.

Figura 22 Capa de Suelos

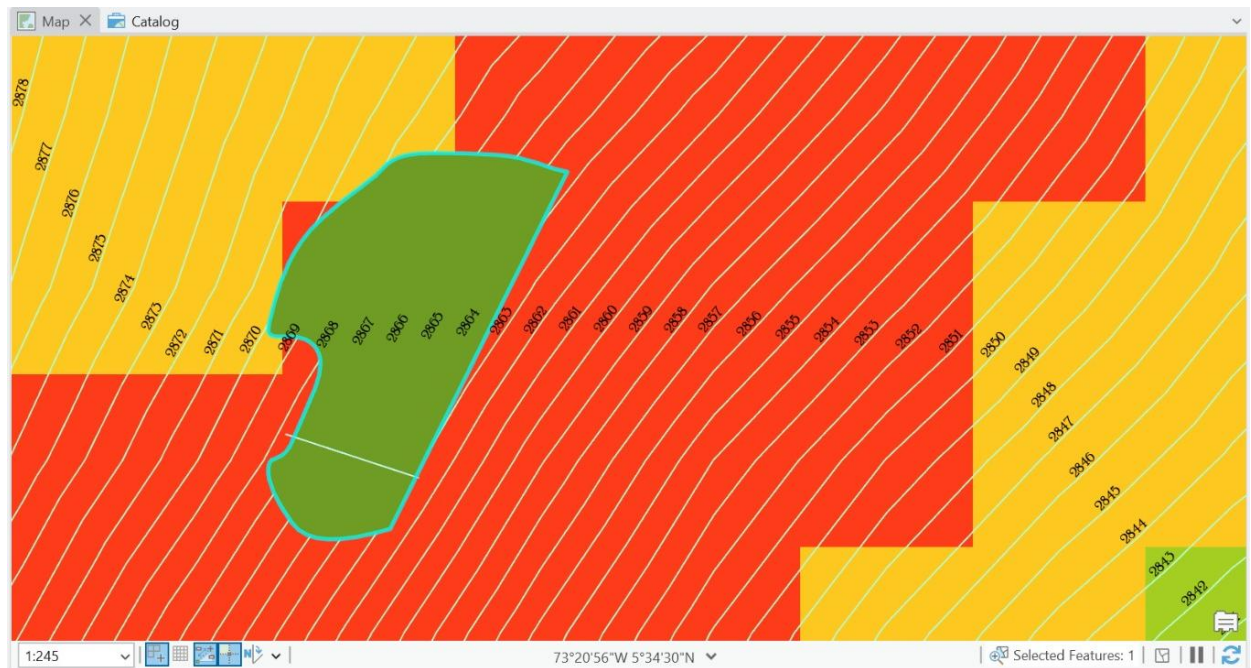
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 23 se encuentra el modelo digital de elevación (DEM), consistió en la visualización, los cambios de altitud del terreno representados en una escala de grises, en donde los grises claros representan elevaciones mayores mientras que los grises oscuros representan las elevaciones menores, este modelo es de gran ayuda ya que permite un análisis topográfico y facilita la identificación de zonas críticas de acumulación o escurrimiento de agua, zonas de ruptura o movimientos en masa. En el proceso de análisis se obtuvo que el polígono se localiza en una zona de transición altimétrica en donde se localizan pendientes moderadas a fuertes.

Figura 23 DEM

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 24 se observan las curvas de nivel muestran con variaciones de altitud entre 2800 y 2900 metros, facilitando la identificación de pendientes, zonas planas, valles y elevaciones, estas curvas de nivel son importantes en los estudios de amenaza, ya que permite observar como la topografía afecta en la ocurrencia de fenómenos naturales como deslizamientos o escorrentías, en la ilustración se logra identificar que en la zona de la izquierda se presentan más pendientes en comparación con la de la derecha. Esta representación cartográfica ayuda a la planificación territorial y evaluación de riesgos, ya que representa la interacción entre la topografía y la distribución espacial de amenazas. (ver Apéndice C)

Figura 24 Curvas de Nivel

Fuente: Elaboración propia

4.2 Condiciones morfométricas del talud.

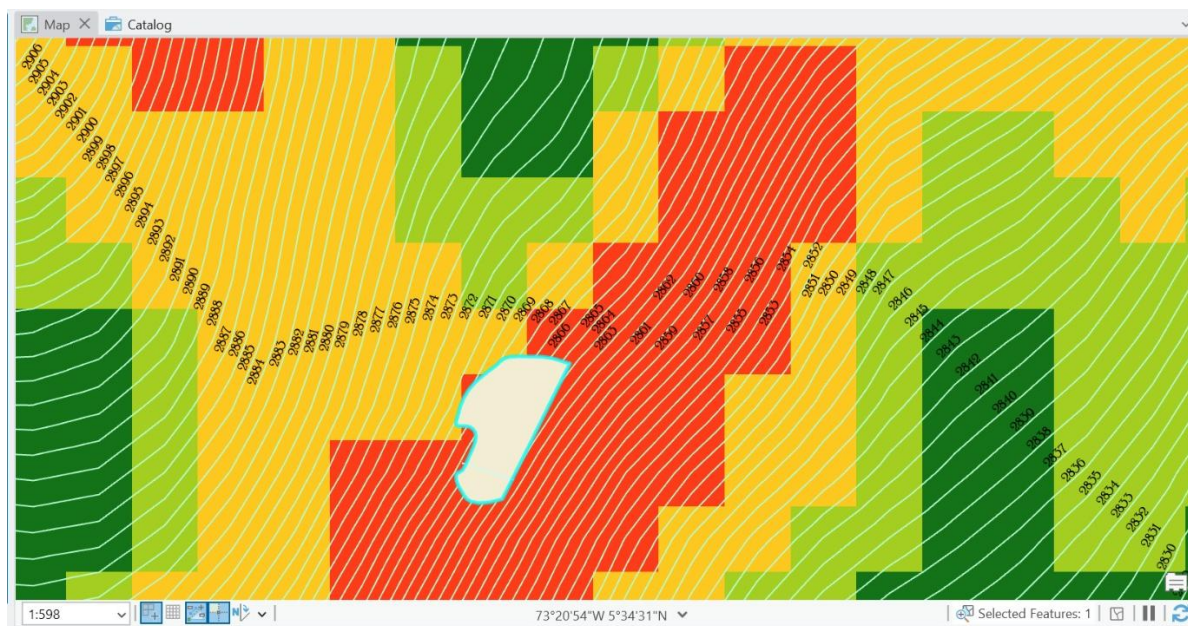
Luego de analizar y describir las condiciones topográficas de la zona de estudio se procedió a realizar un análisis de características morfométricas. Mediante la implementación de herramientas de ArcGIS se identificaron diversas características específicas del talud, como lo son altitud, pendiente y longitud para entender la configuración del terreno y su influencia en la estabilidad.

Las herramientas para la descripción de características morfométricas variaron según el dato que se solicitó. En primera instancia, se realizó el **mapa de pendientes** de la zona de estudio. Para ello con la capa DEM cargada en el software, se accedió a la ruta **Analysis** → **Tools** → **Spatial Analyst Tools** → **Surface** → **Slope**, donde se configuró el **Input Raster** como **DEM** y el **Output measurement** como **Degree (grados)**.

Para la representación de pendientes se realizaron dos filtros de clasificación. El primero constaba de una escala de clasificación en tonos café, donde la variación dependía del ángulo de la pendiente, cuando el tono era más oscuro significaba una pendiente más pronunciada, representada en grados. El segundo filtro implementó la escala de colores que variaba de verdes a rojos, donde los verdes representaban zonas planas y los rojos pendientes pronunciadas.

En el caso específico del talud analizado como se observa en la figura 25, se identificó que este se encontraba en una zona representada en tonos amarillos y rojos representando una zona de pendiente pronunciada, variando la pendiente entre 45° y 90° . (ver Apéndice B)

Figura 25 Mapa de pendientes con el Talud.

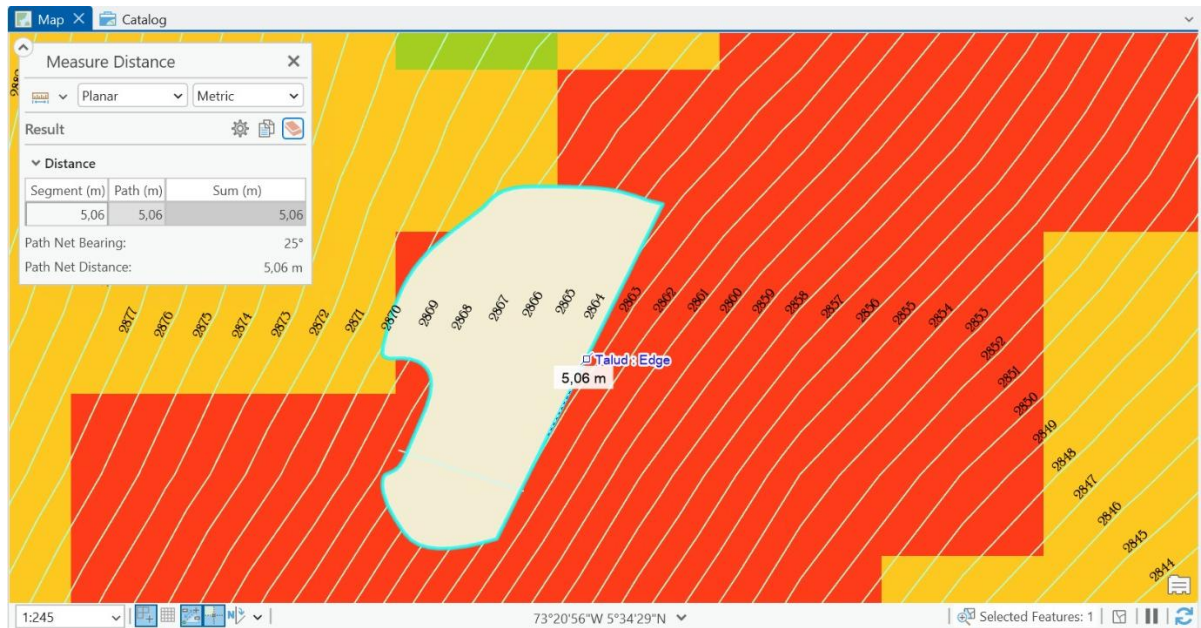


Fuente: Elaboración propia

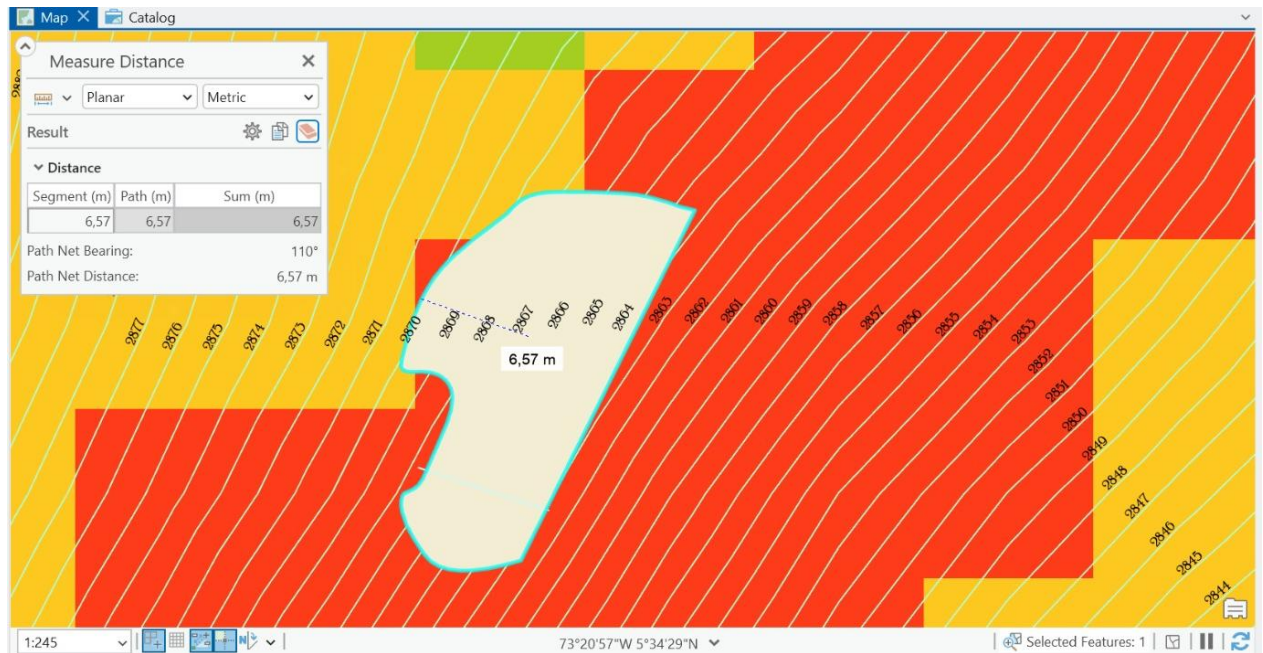
Para determinar la latitud y longitud del talud se configuró la ruta **Map** → **Measure** → **Measure Distance**. En el aspecto de latitud se tomó desde la corana del talud hasta el pie de este tomando una distancia de 5,06 metros como se muestra en la figura 26. Por otro lado, la longitud

se midió a lo largo de la superficie tomando el valor de 6,57 metros como se muestra en la figura 27.

Figura 26 Latitud del Talud



Fuente: Elaboración propia

Figura 27 Longitud del Talud

Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis Comparativo previo y actual del Talud

Luego de tener las características morfométricas del talud, se realizó un análisis comparativo de las condiciones del talud, la misma caracterización del talud de hace cuatro meses en donde se identificó que el talud presentaba una área o polígono más pequeña como se observa en la figura 28. Esto puede suceder debido a condiciones endógenas o exógenas.

Figura 28 Análisis Talud de noviembre

Fuente: Elaboración propia

Los aspectos morfométricos que se midieron en este talud se realizaron con la misma ruta implementada anteriormente. La latitud medida en este caso tomo el valor de 4,05 metros y la longitud medida tomo el valor de 5,57 metros. El análisis se realizó el 20 de noviembre del 2025.

Según el análisis realizado y la comparación de las características morfometrías, se concluye que el talud se vio afectado tanto por factores endógenos como exógenos. En primera instancia, las condiciones endógenas afectan de manera significativa debido a que los materiales presentes son finos, disminuyendo la estabilidad del terreno. Asimismo, se presentan las condiciones exógenas, debido a los cambios climáticos como incremento de precipitaciones y variaciones en el nivel freático, aumentando procesos de inestabilidad. Debido a esta interacción el talud presenta deterioro progresivo y disminución en su estabilidad.

Al comparar las características se observó un aumento significativo tanto en la latitud como en la longitud del Talud.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica se identificaron factores fundamentales en el proceso de análisis de estabilidad en taludes, factores que afectan las condiciones como el clima. También se interpretaron diversos métodos que se implementan para el análisis de este.

En el análisis y descripción del talud se identificaron factores que afectan la estabilidad como la variación en el tamaño de roca, debido a esto se generan zonas con distintas resistencias mecánicas en el talud. Por otro lado, se identificó erosión superficial, factor que debilita progresivamente al talud debido al movimiento en masa evidenciado en pequeños deslizamientos. Asimismo, la presencia de cobertura vegetal localizada en la corana ayuda en la estabilización de suelo mediante sus raíces, sin embargo, las zonas expuestas favorecen en una mayor infiltración incrementando la saturación del terreno y disminuyendo su resistencia.

Con la implementación de herramientas SIG mediante el software ArcGIS Pro, se identificaron características morfométricas del talud, ayudando en la contextualización de las condiciones para determinar su estado.

Debido a la presencia de materiales de grano fino, como lo son las acillas y lodolitas, el talud absorbe una gran cantidad de agua, perdiendo su resistencia cuando los materiales se saturan. En épocas de lluvia como suele ser enero, ocasiona pequeños deslizamientos de material en el talud generando una zonas inestables y expansión del movimiento en varias direcciones.

5.2 Recomendaciones

Debido al incremento del área del talud identificada en el análisis espacial, se recomienda considerar la implementación de obras de estabilización como son los muros de contención con la finalidad de reducir el riesgo de deslizamiento y aumentar la seguridad en la vía.

Se recomienda realizar monitoreo continuo debido al tipo de material presente en el talud, principalmente en épocas de lluvia para detectar cambios en la estabilidad.

Se recomienda complementar el análisis espacial con estudios geotécnicos detallados con la finalidad de tener conocimiento del comportamiento del talud, con el análisis de suelo realizado se puede complementar el análisis mediante el software Slide determinando un factor de seguridad.

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. ((2010)). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. AIS*. Obtenido de <https://www.ais.org.co/wp-content/uploads/2018/09/NSR-10.pdf>
- Instituto Nacional de Vias. ((2025)). *Manual de estabilidad de taludes (borrador)*. Obtenido de Manual de estabilidad de taludes (borrador).
- A. Rezi and M. Allam,. (1995). Techniques in array processing by means of transformations . En *Control and Dynamic Systems Vol. 69* (págs. 133-180). San Diego: Academic Press.
- Alcaldia Mayor de Tunja . (2019). *Mapa de zonificación de amenazas del municipio de Tunja*. Obtenido de Plan de Ordenamiento Territorial (POT): <https://alcaldiatunja.micolombiadigital.gov.co>
- Alcaldía Mayor de Tunja. (2019). *Diagnóstico territorial: Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Tunja*. Obtenido de Diagnóstico territorial: Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Tunja.: https://alcaldiatunja.micolombiadigital.gov.co/sites/alcaldiatunja/content/files/000670/33475_2019_7nov_sintesis_diagnostico_tomo_1_pot_tunja_2019.pdf
- American Psychological Association. (s.f.). *Style and Grammar Guidelines*. Recuperado el 17 de enero de 2020, de Apastyle: <https://apastyle.apa.org/style-grammar-guidelines>
- Analytics, E. D. ((2023)). *LandViewer: Online satellite imagery viewer and analytics platform*. Obtenido de EOS Data Analytics: <https://eos.com/landviewer/>
- Bernard, L., Mäs, S., & Sliwinski, A. ((2005)). *Geoportals: The backbone of spatial data infrastructures*. Springer.
- Boggs , s. (2014). *principles of sedimentology and stratigraphy*.

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. ((1998)). *Principles of geographical information systems*.
Oxford University Press.

Carson & Kirkby. ((1972)). *Hillslope Form and Process*.

constitución política de colombia . (1991). Obtenido de <https://www.constitucionpolitica.com>

Coordenadas-GPS.com. (2026). *Convertidor de coordenadas GPS*. Obtenido de Convertidor de
coordenadas GPS: https://www.coordenadas-gps.com/convertidor-de-coordenadas-gps?utm_source=chatgpt.com

Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2016). *Mapa geomorfológico del departamento de Boyacá*. Obtenido de Mapa geomorfológico del departamento de Boyacá:
<https://www.corpoboyaca.gov.co>

CRAI USTA Bucaramanga. (2020). *Informe de recursos y servicios bibliográficos*. Bucaramanga:
Universidad Santo Tomás.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. ((1996)). *Landslide types and processes*. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36–75). Obtenido de
Landslide types and processes. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36–75).: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/11057/landslides-investigation-and-mitigation>

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. ((1996)). *Landslide types and processes*. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and mitigation* (pp. 36–75). *National Research Council*.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. ((1996)). *Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247*. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>

Das, B. M. ((2011)). *Principles of geotechnical engineering (7th ed.)*. Cengage Learning.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. ((2014)). *Soil strength and slope stability (2nd ed.)*. Wiley.

EQUIPO TECNICO GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, . (2018). *ESTRUCTURA BIOFÍSICA DEPARTAMENTO DE BOYACÁ*. Obtenido de <https://planeacion.boyaca.gov.co/wp-content/uploads/2018/09/ESTRUCTURA-BIOF%C3%8DSICA.pdf>

ESRI. (2022). *ArcGIS Pro documentation*. Environmental Systems Research Institute. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/>

Etayo Serna, F., Renzoni, G., & Barrero, D. ((1983)). *Mapa geológico de la región andina central*. INGEOMINAS.

Fawcett, T. (2006). an introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861-874.

En *Pattern Recognition Letters*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

Gobernacion de Boyaca . (21 de 06 de 2012). Obtenido de Aspectos geograficos : <https://www.boyaca.gov.co/aspectos-geograficos/>

Gobernacion de boyaca. (21 de 06 de 2012). Obtenido de Aspectos geograficos : <https://www.boyaca.gov.co/aspectos-geograficos/>

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. ((2005)). *Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines*.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. ((2005)). *Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines*.

Hoek, E., & Bray, J. ((1981)). *Rock slope engineering (3rd ed.)*. Institution of Mining and Metallurgy.

IDEAM. ((2018)). *Atlas climatológico de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.*

IDEAM. (2016). *Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para estaciones meteorológicas en Colombia.* Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.: <http://archivo.ideam.gov.co/curvas-idf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2017). *Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para Colombia.* Obtenido de Curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) para Colombia: <https://www.ideam.gov.co>

Instituto Geografico Agustín Codazzi. (2020). *Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales – ICDE y geoportal institucional.* Obtenido de Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales – ICDE y geoportal institucional.: <https://geoportal.igac.gov.co>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). *Modelo digital de elevación y relieve sombreado de Colombia.* Obtenido de Geoportal IGAC: <https://geoportal.igac.gov.co>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). *División político-administrativa de Colombia: departamento de Boyacá.* Obtenido de Geoportal IGAC: <https://geoportal.igac.gov.co>

Instituto Nacional de Vías. (2025). *Manual de estabilidad de taludes para infraestructura vial en Colombia.* Obtenido de Manual de estabilidad de taludes para infraestructura vial en Colombia: <https://www.invias.gov.co>

Miao, L. L. (November 8-12). A specification based approach to testing polymorphic attributes. *Formal Methods and Software Engineering: Proceedings of the 6th International Conference on Formal Engineering Methods, ICFEM 2004.* Seattle, WA, USA,.

Narváez, A. M. (s.f.). *Los Páramos, prioridad en Boyacá.* Obtenido de proyecto paramos bosque alto-andino: <https://paramos.regioncentralrape.gov.co/2018/03/07/los-paramos-prioridad->

en-

boyaca/#:~:text=Boyac%C3%A1%20est%C3%A1%20rodeada%20de%20seis,el%20que%20lo%20quiera%20visitar.

Nguyen, H., Mehrabi, M., Kalantar, B., Moayed, H., & Abdullahi, M. M. ((2019)). *Potential of hybrid evolutionary approaches for assessment of geo-hazard landslide susceptibility mapping. Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1667–1693.

Ponce, V. M. ((1989)). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall. En *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall.

Rodríguez Ortiz, J. M., & De la Cruz, J. ((2008)). *Geotecnia y cimentaciones*. Limusa. En *Geotecnia y cimentaciones*. Limusa.

Rodriguez, guillermo. (08 de 02 de 2025). *tipos de movimientos en taludes* . Obtenido de centro geotecnico internacional : <https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/tipos-de-movimientos-de-taludes-una-perspectiva-integral.html>

Selby, M. J. ((1993)). *Hillslope Materials and Processes*.

Servicio Geologico Colombiano . (2020). *Geoportal del Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Geoportal del Servicio Geológico Colombiano.: <https://www.sgc.gov.co/>

Servicio Geologico Colombiano. ((2015)). *Mapa geológico de Colombia*. SGC.

Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Mapa Geológico de Colombia*. Obtenido de Unidades cronoestratigráficas – visor geológico de Colombi: https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Cartografia_Geocientifica/

Sole, A. C. (2006). *Instrumentación Industrial*. Mexico: Alfaomega.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. ((1996)). *Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.

Tomás, R., Lopez-Sanchez, J. M., Li, Z., & Liu, P. ((2014)). *Advanced differential SAR interferometry: Monitoring ground deformation. Remote Sensing*, 6(2), 1149–1180.

Topographic Map Viewer. (2023). *Mapa topográfico del área de Tunja, Boyacá, Colombia [Mapa de elevación]*. Obtenido de Mapa topográfico del área de Tunja, Boyacá, Colombia [Mapa de elevación].: <https://es-co.topographic-map.com/map-b8k14/Tunja/?center=5.54252%2C-73.35537&zoom=13&base=2>

Topographic Map. (2024). *Mapa topográfico de Tunja, Boyacá, Colombia*. Obtenido de Mapa topográfico de Tunja, Boyacá, Colombia: <https://topographic-map.com/map-7qk1t6/Tunja/>

UNDRR. ((2017)). *Terminology on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction*.

UPME – Unidad de Planeación Minero Energética. ((2013)). *Analisis Área de Influencia – Leyenda de unidades geológicas (p. 93). UPME*.

USDA. ((2017)). *National engineering handbook: Part 630 – Hydrology. NRCS. En National engineering handbook: Part 630 – Hydrology. NRCS*.

Varnes, D. J. ((1978)). *Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), Landslides: Analysis and control (pp. 11–33). Transportation Research Board*.

Varnes, D. J. ((1984)). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. UNESCO*.

Wehr, A., & Lohr, U. ((1999)). *Airborne laser scanning—An introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 68–82.

Wigner, E. P. (2005). Theory of traveling wave optical laser . *Phys. Rev.*, 134, A635-A646.

Referencias del marco teórico

- Arshid, M. U., Akbar, M., Zohaib, M., Huali, P., Salih, R., Khan, M. A., Alkahtani, M. Q., Badar, J., Mursaleen, M., Soudagar, M. E. M., & Islam, S. (2024). Landslide susceptibility analysis and hazard zonation of Koh-e-Suleman range using weighted overlay technique. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2389861>
- Chen, Z., & Song, D. (2023). Modeling landslide susceptibility based on convolutional neural network coupling with metaheuristic optimization algorithms. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 3384–3416. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2249863>
- Chou, J. S., Nguyen, H. M., Phan, H. P., & Wang, K. L. (2025). Predicting deep-seated landslide displacement on Taiwan's Lushan through the integration of convolutional neural networks and the Age of Exploration-Inspired Optimizer. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(1), 119–146. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-119-2025>
- Farahani, A., & Ghayoomi, M. (2025). A Soil Moisture-Informed Seismic Landslide Model Using SMAP Satellite Data. *Remote Sensing*, 17(15). <https://doi.org/10.3390/rs17152671>
- Fayaz, M., Meraj, G., Khader, S. A., Farooq, M., Kanga, S., Singh, S. K., Kumar, P., & Sahu, N. (2022). Management of Landslides in a Rural–Urban Transition Zone Using Machine Learning Algorithms—A Case Study of a National Highway (NH-44), India, in the Rugged Himalayan Terrains. *Land*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/land11060884>
- Ibrahim, M. B., Mustaffa, Z., Balogun, A. L., Hamonangan Harahap, I. S., & Ali Khan, M. (2021). Advanced data mining techniques for landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2430–2461. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1960433>
- Martino, S., Marmoni, G. M., Fiorucci, M., Ceci, A. F., Discenza, M. E., Rouhi, J., & Tedoradze, D. (2022). Role of Antecedent Rainfall in the Earthquake-Triggered Shallow Landslides

- Involving Unsaturated Slope Covers. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(6).
<https://doi.org/10.3390/app12062917>
- Nguyen, H., Mehrabi, M., Kalantar, B., Moayedi, H., & Abdullahi, M. M. (2019). Potential of hybrid evolutionary approaches for assessment of geo-hazard landslide susceptibility mapping. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 1667–1693.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1607782>
- Peres, D. J., Cancelliere, A., Greco, R., & Bogaard, T. A. (2018). Influence of uncertain identification of triggering rainfall on the assessment of landslide early warning thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(2), 633–646. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-633-2018>
- Soriano-Cuesta, C., Romero-Hernández, R., Mascort-Albea, E. J., Kada, M., Fuls, A., & Jaramillo-Morilla, A. (2024). Evaluation of Open Geotechnical Knowledge in Urban Environments for 3D Modelling of the City of Seville (Spain). *Remote Sensing*, 16(1).
<https://doi.org/10.3390/rs16010141>
- Tomás, R., Zeng, Q., Lopez-Sanchez, J. M., Zhao, C., Li, Z., Liu, X., Navarro-Hernández, M. I., Hu, L., Luo, J., Díaz, E., Szeibert, W. T., Pastor, J. L., Riquelme, A., Yu, C., & Cano, M. (2024). Advances on the investigation of landslides by space-borne synthetic aperture radar interferometry. *Geo-Spatial Information Science*, 27(3), 602–623.
<https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2266224>
- Tzampoglou, P., Loukidis, D., Anastasiades, A., & Tsangaratos, P. (2025). Advanced machine learning techniques for enhanced landslide susceptibility mapping: Integrating geotechnical parameters in the case of Southwestern Cyprus. *Earth Science Informatics*, 18(2).
<https://doi.org/10.1007/s12145-025-01761-9>

- Yatim Mustapa, M. F., & Tahar, K. N. (2025). Landslide Susceptibility Mapping Utilizing the Weighted Frequency Ratio Technique: A Case Study of Klang Valley, Malaysia. *International Journal of Geoinformatics*, 21(2), 70–86. <https://doi.org/10.52939/ijg.v21i2.3939>
- Yu, X., Xiong, T., Jiang, W., & Zhou, J. (2023). Comparative Assessment of the Efficacy of the Five Kinds of Models in Landslide Susceptibility Map for Factor Screening: A Case Study at Zigui-Badong in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010800>
- Zhang, J., Qian, J., Lu, Y., Li, X., & Song, Z. (2024). Study on Landslide Susceptibility Based on Multi-Model Coupling: A Case Study of Sichuan Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 16(16). <https://doi.org/10.3390/su16166803>

Apéndices

Apéndice A. *Mapa topográfico de la localización del Talud*
[..\topografia.pdf](#)

Apéndice B. *Mapa de pendientes de la localización de Tunja*
[..\pendientes.pdf](#)

Apéndice C. *Mapa Curvas de Nivel de la Localización del Talud*
[..\curvas de nivel.pdf](#)

Apéndice D. *mapa geográfico de la localización del talud*
[..\geografia.pdf](#)

Apéndice E. *Mapa Topográfico de Tunja*
[..\topografia tunja.pdf](#)

Los apéndices mencionados anteriormente no se incluyen en el libro; sin embargo, se consideran importantes, debido a que proporcionan información complementaria que ayuda a la comprensión de algunos apartados desarrollados en el trabajo.