Vigilada Mineducación

Análisis de las unidades geomorfológicas por fotointerpretación y parámetros morfométricos que influyen en la ocurrencia de avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada Naranjal en Quetame, Cundinamarca.

María Paula Agualimpia Perea

Trabajo de grado presentado como requisito de grado para optar al título de Geóloga

Director: MSc, PhD Joaquín Andrés Valencia Ortiz

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS EINGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2024

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1) RESUMEN 4
2) GENERALIDADES 7
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 7
HIPÓTESIS 7
OBJETIVOS 7
Objetivo General 7
Objetivos específicos 7
3) ZONA DE ESTUDIO 8
LOCALIZACIÓN 8
5) MARCO GEOLÓGICO 9
Geología Regional 9
Geología Local 10
Geología estructural 10
6) METODOLOGÍA 11
1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA 11
2.INTEPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA A ESCALA 1:10.000 12
3.CALCULO MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA. 13
7) RESULTADOS 16
INTEPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA 16
CALCULO MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA. 22
8) DISCUSIÓN 25
9) CONCLUSIÓN 26
10) BIBLIOGRAFÍA 27

FIGURA

Figura 1 Mapa localización Cuenca quebrada Naranjal. Fuente: Elaboración propia 8
Figura 2. Flujograma metodológico del proyecto. Fuente: elaboración propia..... 11
Figura 3 Mapa geomorfológico de la cuenca. Fuente Elaboración propia..... 16
Figura 4 Ladera erosiva. Fuente: Google Earth..... 18
Figura 5 Ladera ondulada Fuente: Google Earth..... 19
Figura 6 Lomo denudado alto de longitud larga Fuente: Google Earth 21
Figura 7 Curva Hipsométrica 24

TABLAS

Tabla 1 Clasificación de pendientes..... 13
Tabla 2Cálculos morfométricos. 15
Tabla 3 Unidades del ambiente denudacional..... 17
Tabla 4 Resultados cálculos morfométricos..... 23

.

1) RESUMEN

Los desastres naturales asociados a avenidas torrenciales se consideran de los fenómenos más destructivos en Colombia, debido a sus características geológicas y geomorfológicas. Este estudio busca identificar los parámetros geomorfológicos que influyen en la ocurrencia de estos eventos en la cuenca Naranjal, ubicada en Quetame, Cundinamarca. Para ello, se realizaron procesos de fotointerpretación para identificar unidades geomorfológicas a escala 1:10.000 y se calcularon parámetros morfométricos de la cuenca con el objetivo de analizar las dinámicas que generan procesos de avenidas torrenciales. A partir de este estudio se observó que La cuenca Naranjal está dominada casi en su totalidad por un ambiente denudacional, donde los procesos de meteorización y erosión son intensos, favorecidos por un relieve escarpado y baja capacidad de drenaje. La geometría alargada y los parámetros morfométricos indican que la cuenca tiene una respuesta hidrológica lenta, lo que incrementa el riesgo de avenidas torrenciales en eventos de lluvia intensas.

Palabras claves: Cuenca, fotointerpretación, morfométricos, avenidas torrenciales, denudacional.

ABSTRACT

Natural disasters associated with torrential floods are considered among the most destructive phenomena in Colombia due to the country's geological and geomorphological characteristics. This study aims to identify the geomorphological parameters influencing the occurrence of these events in the Naranjal basin, located in Quetame, Cundinamarca. To achieve this, photointerpretation processes were carried out to identify geomorphological units at a scale of 1:10,000, and morphometric parameters of the basin were calculated to analyze the dynamics that generate torrential flood processes. The study revealed that the Naranjal basin is almost entirely dominated by a denudational environment, where intense weathering and erosion processes are facilitated by steep terrain and low drainage capacity. Its elongated shape and morphometric parameters indicate a slow hydrological response, which increases the risk of torrential floods during intense rainfall events.

Keywords: Basin, photointerpretation, morphometric, torrential floods, denudational.

2) INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales son un tipo de movimiento en masa caracterizado por presentar flujos que circula a altas velocidades por cauces de montaña permanentes o intermitentes y que tienen, altas pendientes longitudinales. Este fenómeno se caracteriza por involucrar corrientes de agua, fragmentos de roca, lodo y escombros en diferentes proporciones (Ramos, 2021). Son generados por variables como precipitaciones, sismos, rotura de presas o por el aporte de grandes cantidades de agua debido a lahares y avalanchas (Aristizabal, Arango Carmona, & Garcia Lopez, 2020). El aporte de materiales al flujo proviene de laderas adyacentes o del lecho de los cauces y cuando el flujo alcanza zonas de baja pendientes se genera el depósito de material a lo largo del trayecto (Ramos, 2021). Las avenidas torrenciales por lo general tienen una corta duración, además, su recurrencia es de largos periodos (Duran, y otros, 1985). Hay diferentes tipos de avenidas torrenciales: flujos de escombros canalizados, inundación de escombros e inundaciones súbitas. En un evento torrencial es posible que se combinen estos distintos tipos de fenómenos (Aristizabal, Arango Carmona, & Garcia Lopez, 2020). Según Michel & Gonzales, (2004) las avenidas torrenciales son de las amenazas naturales más comunes, y por su gran potencial destructivo, afectan gravemente bienes físicos y personas. Una de las razones por las que este evento es tan dañino, es que su naturaleza es casi impredecible.

A nivel mundial, las avenidas torrenciales se han estudiado tomando en cuenta factores como las condiciones hidrometeorológicas y los procesos geomorfológicos. Un ejemplo de este fue descrito en la Isla Reunión, donde el 6 de mayo de 1965, después de una gran tormenta que aportó grandes volúmenes de agua a la cuenca del río Remparts, se desencadenó una avenida torrencial donde se transportó grandes cantidades de flujos de escombros a la ciudad de Saint-Joseph (Garcin , Poisson, & Pouget, 2005). Este fenómeno se analizó a partir de la combinación de varios estudios geomorfológicos de la cuenca, concluyendo que el lecho del rio tuvo una evolución rápida por factores como la erosión y la degradación. Además, se evaluó la dinámica de los sedimentos con el fin de estimar el volumen resultante de estos tras el evento (Garcin , Poisson, & Pouget, 2005).

Otro ejemplo es el Valle de Saona, en el noroeste de los Alpes italianos, donde se registraron dos avenidas torrenciales en 1993 y 2000, las cuales causaron daños en vías y áreas urbanas. Estos fenómenos fueron relacionados con eventos hidrometeorológicos, y su estudio se centró en los lechos de los cauces y las pendientes adyacentes mediante análisis e interpretación de fotografías aéreas. Los resultados concluyeron que los procesos geomorfodinámicos fueron la causa principal de la ocurrencia de las avenidas torrenciales (Luinoa, Turconi, Paliaga, Faccin, & Marincioni, 2018).

En el territorio colombiano, en los últimos 50 años, se han presentado 5665 avenidas torrenciales (SIMMA, 2024). La gran mayoría se han reportado en la región andina, asociada a condiciones de relieve montañosos, pendiente y clima. Geológicamente, esta región presenta una composición diversa entre rocas metamórficas, intruidas por cuerpos graníticos, cuerpos ígneos deformados por la tectónica activa y por rocas sedimentarias fracturadas y plegadas. La meteorización y erosión de estas rocas resulta en la formación de suelos finos y arenosos que pueden ser propensos a procesos superficiales. Estas condiciones, junto con factores climáticos, hacen que esta zona sea susceptible a avenidas torrenciales (Bedoya, Aristizabal, & Morales, 2019).

Para establecer el grado de afectación de las avenidas torrenciales que se presentan con mayores recurrencias debido a la degradación de macizo rocoso, es fundamental llevar a cabo un análisis de factores morfométrico y cartográfico de las cuencas hidrográficas ya que están estrechamente relacionados con procesos de modelación superficial (Valencia & Martinez, 2023).

A partir de lo anterior, esta investigación se enfocará en evaluar la influencia de las unidades geomorfológicas y las características físicas de la cuenca como variables inherentes en la ocurrencia de avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada Naranjal, ubicada, en el municipio de Quetame, (Departamento de Cundinamarca).

2) GENERALIDADES

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué factores geomorfológicos inciden en la susceptibilidad por avenidas torrenciales en periodos críticos de lluvia en la cuenca el Naranjal en el municipio de Quetame, Cundinamarca?

HIPÓTESIS

En cuencas de montaña como la de la quebrada Naranjal, los factores morfométricos y unidades geomorfológicas incrementan la ocurrencia a avenidas torrenciales durante periodos de alta precipitación.

OBJETIVOS

Objetivo General

Describir y evaluar las unidades geomorfológicas y los parámetros morfométricos de la cuenca de la quebrada Naranjal, para analizar su influencia en la probabilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales

Objetivos específicos

- Descripción de las unidades geomorfológicas a través de la fotointerpretación a lo largo de la cuenca de la quebrada el Naranjal.
- Analizar las condiciones morfometrías de la cuenca Naranjal
- Correlacionar las unidades geomorfológicas y los parámetros morfométricos para evaluar los procesos superficiales que generan avenidas torrenciales.

3) ZONA DE ESTUDIO

LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada en la cordillera oriental, al suroriente del departamento de Cundinamarca, en la vereda Naranjal, jurisdicción del municipio de Quetame (Figura 1). Esta región presenta una red de drenaje con una textura media, con una baja densidad y un patrón de drenaje subdentrítico, además la cuenca Naranjal es un afluente del río Negro. Se extiende entre los pisos térmico medio y páramo, contribuyendo a las altas precipitaciones en periodos de invierno y a la densa vegetación de la zona (Quetame, 2020). La quebrada el Naranjal presenta un relieve escarpado alcanzando alturas de hasta 3550 m.s.n.m (Ingeominas, 2011).

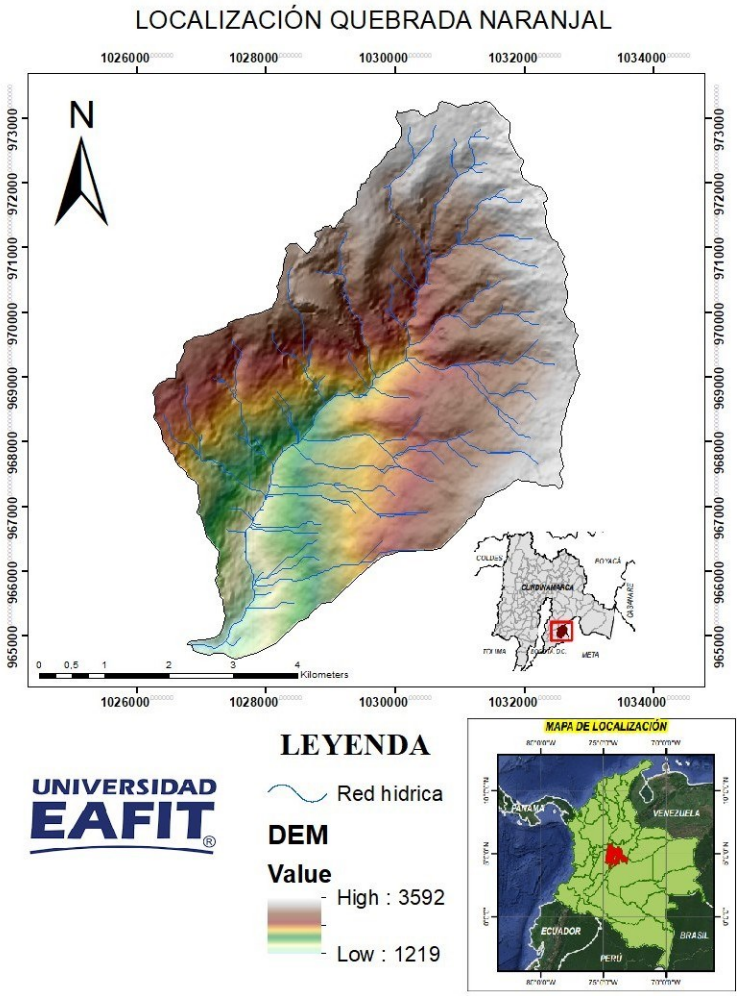


Figura 1 Mapa localización Cuenca quebrada Naranjal. Fuente: Elaboración propia

5) MARCO GEOLÓGICO

Geología Regional

La geología de la cuenca de la quebrada el Naranjal se encuentra copilada en la plancha geológica 247 Cáqueza escala: 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC). La sucesión litoestratigráfica empieza con rocas metamórficas y meta sedimentarias del Precámbrico al Paleozoico inferior pertenecientes al Grupo de Quetame, seguidas por rocas sedimentarias del Grupo Farallones, estas rocas pertenecen al Paleozoico Medio y Superior (Ingeominas, 2011).. Posteriormente se evidencia la sucesión del Cretácico inferior con registros de transgresión marina del Cretácico en un ambiente de cuenca extensional tipo <rift= en la zona de La Laguna de Chingaza, Formaciones Brechas de Buenavista, Lutitas de Macanal y Formación Cáqueza y parte de la formación Une. La fase postrift de sedimentación continua con el Grupo Guadalupe, Guaduas y Grupo Palmichal, extendiéndose hacia el piedemonte llamero en el Paleógeno. Las formaciones Cacho y Bogotá son el resultado de la sedimentación previa del evento de inversión tectónica del Terciario (Ingeominas, 2011)..

Los depósitos aluviales, terrazas y coluviones se desarrollaron durante la inversión tectónica, y algunos muestran actividad tectónica resiente. Los altos y bajos del basamento Paleozoico, controlados por fallas normales, condicionaron la sedimentación del Cretácico Inferior, especialmente en el lapso Titoniano-Berriasiano es por esto por lo que, en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, afloran las Formaciones Capas de La Laguna de Chingaza (areniticas lodolíticas) depositados en ambientes de llanuras intermareales (Ingeominas, 2011).. Por otro lado, en la zona de Farallones Medina se presentan rocas conglomeráticas de las Formaciones Brechas de Buenavista. En el resto de la plancha, la cuenca se profundiza desde el Valanginiano con acumulaciones marinas costeras y sedimentos de la Formación Lutitas de Macanal. Durante el Hauteriviano, se acumulan areniscas de la Formación Cáqueza en ambientes de frente de playa externo. El Barremiano evidencia condiciones de costa afuera evidenciado por la acumulación de sedimentos siliciclástico y carbonatados de la Formación Fómeque, mientras que la Formación Une se continua con el ambiente de frente de playa con acumulación de sedimentos areno-arcillosos y por último la formación Chipaque indican una sucesión de profundizaciones y somerizaciones hasta el Cretácico Superior (Ingeominas, 2011).. El Grupo Guadalupe muestra una regresión marina continua en el Campaniano-Maastrichtiano, finalizando en la Formación Guaduas con depósitos de

llanura costera y ríos. En el Paleógeno-Neógeno, la sedimentación fluvial de las Formaciones Cacho y Bogotá precede la actividad tectónica del Mioceno, que influye en las formaciones del Neógeno y depósitos cuaternarios (Ingeominas, 2011).

Geología Local

La cuenca del rio Naranjal está formada por rocas metamórficas pertenecientes al Macizo de Quetame. Litológicamente describen esta unidad (PEqgu), conformada por una secuencia de filitas y esquistos grises y verdes de composición clorítica, con tamaño de grano muy fino con bancos de espesor variable, muy foliadas y con venas de cuarzo paralelas a la foliación, se estima un espesor de 1080 m y la edad de esta unidad no se ha podido definir con elementos bioestratigráficos, más sin embargo se le asignó una edad de Pre-Devónico (Ingeominas, 2011).

Geología estructural

Respecto a la geología estructural el municipio de Quetame se encuentra enmarcado por una zona de transición entre el Rio Teusacá y la Región Quetame-chingaza la cual presenta un cinturón plegado y se caracteriza por la presencia de cierres periclinales escasos; la principal falla presente en el área de estudio es la falla Quetame y la falla Naranjal (Mora & Kammer, 1999).

Falla geológica Quetame: Es una falla regional con un ángulo alto, asociada a la presencia de un cuerpo intrusivo Radioactivo y a fuentes termales localizadas al sur del municipio de Quetame. La falla tiene una dirección N25E y esta controla el curso de la quebrada la Negra (Ingeominas, 2011).

Falla geológica Naranjal: falla de rumbo lateral izquierdo con orientación de N15°E/90° y una dirección SW-NE (Salcedo, Gomez, & Mora, 2008).

6) METODOLOGÍA

Esta investigación comprende tres fases: 1) Delimitación de la cuenca hidrográfica; 2) Interpretación geomorfológica a escala 1:10.000 siguiendo los lineamientos de Carvajal, (2011); 3) Cálculos morfométrico de la cuenca (Figura 2).

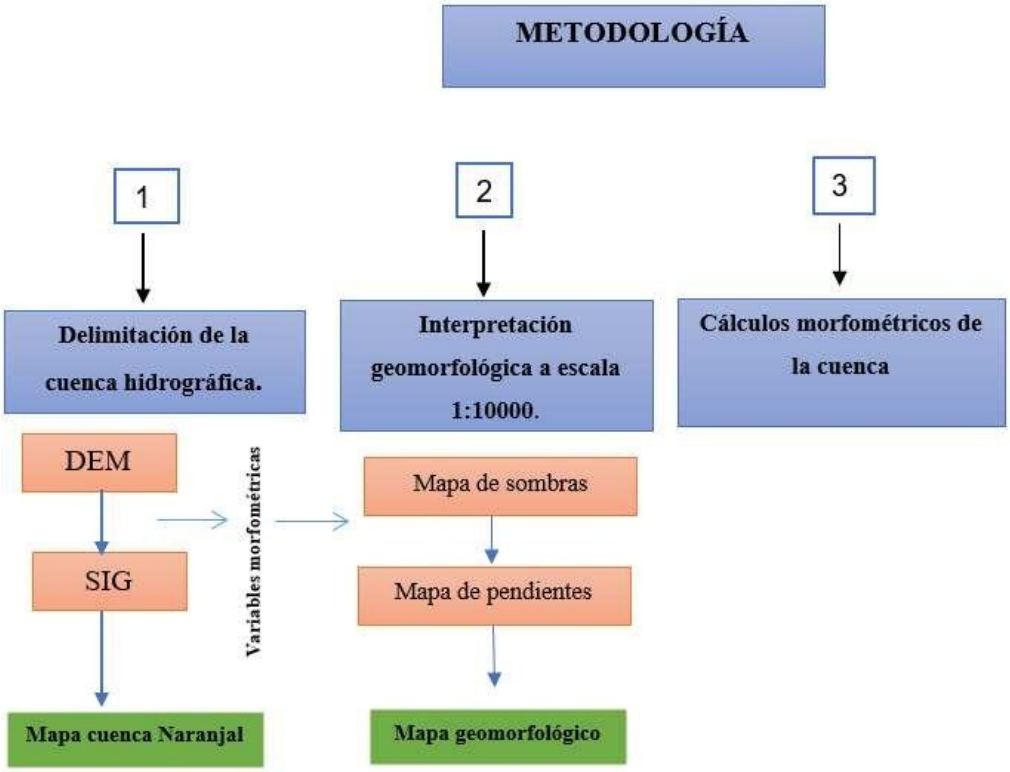


Figura 2. Flujograma metodológico del proyecto. Fuente: elaboración propia

1. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.

Para la delimitación de la cuenca fue necesario un Modelo de Elevación Digital (MDE) que cubriera como mínimo el 97% del área de estudio. Este modelo tenía una precisión de 12.5 m y debía ser acorde a los criterios definidos por la Resolución 471 del 2020 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Ramos, 2021). Por medio de las herramientas software ArcGis Pro se empezó a generar la delimitación de la cuenca, al MDE descargado anteriormente se le definió una proyección, las coordenadas añadidas fueron MAGNA-SIRGA CMT12. Una vez definidas las coordenadas se procedió a eliminar imperfecciones o vacíos del ráster y esto se realizó a través de la herramienta Hydrology > Fill. A partir de esta capa, se definió la dirección de la red hídrica utilizando la herramienta Flow Direction, la cual generó un

ráster con la dirección de los flujos en cada una de las celdas. Posteriormente, se generó un ráster con el flujo acumulado mediante la herramienta Flow Accumulation. Sobre esa misma capa, se realizó una clasificación de los cursos de agua a través de la herramienta Stream Order, utilizando el método de Strahler. Después de completar estos pasos, se procedió a la delimitación de la Cuenca Hidrográfica utilizando la herramienta Basin. El resultado fue un ráster que delineó todas las cuencas hidrográficas con base en la red de drenaje, empleando el ráster generado con la herramienta Flow Direction. Finalmente, se transformó el ráster de delimitación de cuencas a formato vectorial (shapefile) mediante la herramienta Raster to Polygon (Loro, 2012).

2.INTEPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA A ESCALA 1:10.000.

La representación cartográfica de la geomorfología tiene como objetivo constituir un registro de información de cada una de las formas del terreno identificadas a una escala específica de trabajo, teniendo en cuenta tanto las estructuras geológicas, geoformas que las conforman. A su vez realizando un análisis de los procesos superficiales que actúan sobre estas a través del tiempo, logrando entender la historia evolutiva del paisaje de un área específica (Ramos, 2021). Se realizó la interpretación geomorfológica basada en la metodología presentada en el documento <*PROPUESTA DE ESTANDARIZACION DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLOGICA EN COLOMBIA*=. Está metodología propuso una forma de jerarquizar las geoformas según la escala de trabajo, con el objetivo de zonificar el terreno en categorías. Esta investigación se trabajó a escala 1:10.000. La taxonomía geomorfológica se estableció en unidades, previo a esto se identificó el ambiente en el que se encontraban la geomorfología de la zona. Además, se definieron unidades homogéneas en fotos aéreas, imágenes de satélite, y a través del MDE se derivan las variables morfométricas como el mapa pendientes y Curvatura (Carvajal, 2011). La pendiente se reclasificó en 7 categorías como se muestra en la Tabla 1 y en el anexo 1

Tabla 1 Clasificación de pendientes.

Inclinación	Descripción
< 5°	Plana o suavemente inclinada
6°-10°	Inclinada
11°-15°	Muy inclinada
16°-20°	Abrupta
21°-30°	Muy abrupta
31°-45°	Escarpada
>45°	Muy escarpada

3.CALCULO MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA.

El análisis morfométrico de la cuenca tiene como objetivo la caracterización y el análisis cualitativo de las superficies del terreno (Valencia & Martinez, 2024). Se evalúan parámetros del relieve, sistema de drenaje y movilidad del flujo esto con el fin de describir el grado de afectación que ejercen factores externos sobre ellos y al mismo tiempo el control de la meteorización y erosión de las superficies. A partir de este análisis se describe el comportamiento dinámico de la cuenca y su respuesta cualitativa para generar avenidas torrenciales (ver tabla 2).

Área (A): Es uno de los parámetros más importantes y se define como la proyección horizontal de toda área de drenaje se expresa normalmente en km^2, se calcula mediante el software ArcGIS.

Longitud (L): es la distancia desde la desembocadura del rio principal hasta el punto más alto que corte la divisoria de la cuenca, se calcula a través del software ArcGIS.

Perímetro(P): Es la medición lineal del parteaguas y se expresa en km, se calcula a partir del software ArcGIS.

Factor forma (Kf): Es la relación entre el área en la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido, mide que tan cuadrada o alargada puede ser una cuenca (Horton, 1945)

Orden de transmisión (Ot): El método Strahler, se asigna un orden de 1 a todos los vínculos sin afluentes, que se conocen como de primer orden. El número de orden de los cursos de agua aumenta cuando los cursos de agua del mismo orden se intersecan (Tarboton, Bras, & I. Rodriguez, 1991).

Densidad de drenaje (Dd): Es la capacidad que tiene una cuenca de desalojar el volumen de agua en periodos de lluvia se relaciona la longitud de las corrientes con el área de la cuenca (Horton, 1945).

Coeficiente de torrencialidad (Ct): Este índice mide el grado de torrencialidad por medio de la relación de números de cauces de orden 1 con respecto al área total de la misma.

Tiempo de concentración de la cuenca (Tc) : Es el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa (Kirpich, 1940).

Factor de asimetría: Es la relación del área de las vertientes separadas por el cauce principal, este factor evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje el resultado indica hacía que lado se encuentra recostado el cauce principal (Keller & Pinter, 1996)

Coeficiente de circularidad (Rc): El coeficiente de circularidad según (Miller, 1953) es la relación entre el cociente del área de la cuenca y el circulo cuya circunferencia es igual al perímetro de la cuenca, dando como resultados valores entre 0 y 1, en donde valores cercanos a 0 corresponden a cuencas alargadas y valores próximos a 1 a cuencas con forma redonda

Coeficiente de compacidad (Kc): Propuesto por (Gravelius, 1914) compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia cuyo circulo tiene la misma área de la cuenca.

Curva hipsométrica: Es una representación gráfica donde se describe el estado de la cuenca entre juvenil maduro y senil (Schumm, 1956).

Coeficiente de masividad (Cm): Es la relación entre la curva hipsométrica y el área de la cuenca y da como resultado si la cuenca es montañosa o si es una cuenca, plana (Martonne, 1940).

Tabla 2Cálculos morfométricos.

Cálculo de parámetros morfométricos	
Parámetro morfométrico	**Formula**
Área	Software ArcGIS
Longitud	Software ArcGIS
Perímetro	Software ArcGIS
Factor forma (Kf)	$kf = \frac{A}{L^2}$
Densidad de drenaje (Dd)	$D_d = \frac{L}{A}$
Orden de trasmisión	
Tiempo de concentración de la cuenca (Tc)	$T_C = 0.01\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$
Altura media de la cuenca	Software ArcGIS
Pendiente media	Software ArcGIS
Factor de asimetría (Af)	$A_f = 100 * \frac{A_r}{A}$
Coeficiente de circularidad (Rc)	$R_C = 4\pi(\frac{A}{P^2})$
Coeficiente de compacidad (Kc)	$k_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$
Coeficiente de torrencialidad (Ct)	$Ct = \frac{C.O}{A}$
Curva hipsométrica	
Coeficiente de masividad (Cm)	$Cm = \frac{Hm}{A}$

7) **RESULTADOS**

INTEPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA

La geomorfología regional está controlada principalmente por la actividad tectónica de la orogenia andina y por procesos de erosión en masa. A través de la interpretación geomorfológica a escala 1:10.000, se puedo evidenciar que la geomorfología de la cuenca de la quebrada el Naranjal se encuentra entre dos (2) ambientes geomorfológicos: el ambiente denudacional y ambiente fluvial (ver Figura 3). Siendo el ambiente denudacional el de mayor influencia y presencia en la cuenca. El ambiente denudacional abarca una extensión de 32.70 km², lo que representa el 99.8% y el ambiente fluvial corresponde solo al 0.2% del área total de la cuenca, con un área 0.07 km^2.

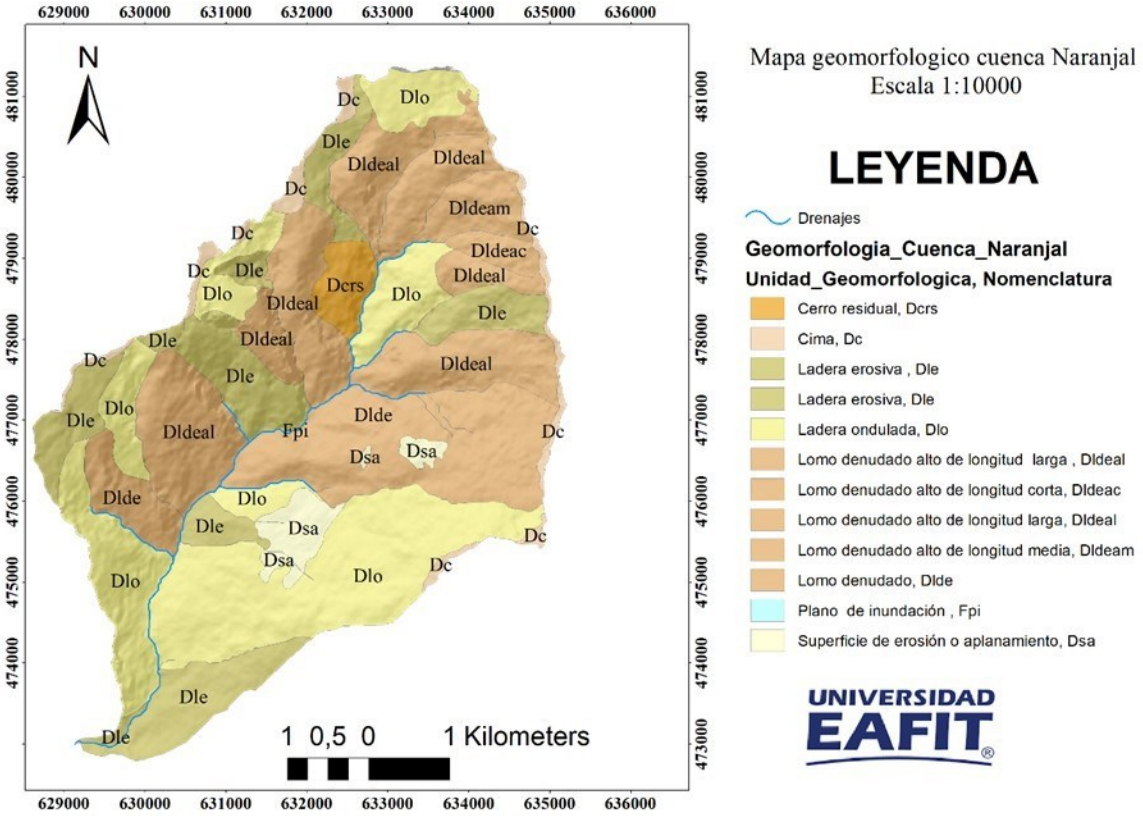


Figura 3 Mapa geomorfológico de la cuenca. Fuente Elaboración propia

Ambiente denudacional

El ambiente denudacional esta defino por la acción de procesos exógenos de meteorización, erosión, transporte gravitacional, pluvial y remoción de masas, que actúan sobre geoformas prexistentes (SGC, 2012). Las unidades geomorfológicas del ambiente denudacional ocupan un 99.8% del área total de la cuenca.

La unidad con mayor predominancia en el ambiente denudacional es la ladera ondulada (Dlo) con un 31% seguido por el lomo denudado alto de longitud larga (Dldeml) y finalmente el porcentaje restante es correspondiente a las unidades de menor extensión en el ambiente.

Tabla 3 Unidades del ambiente denudacional

Unidad Geomorfológica	Área (km^2)	Área (%)
Lomo denudado alto de longitud corta	0.391	1%
Cerro residual	0.682	2%
Lomo denudado alto de longitud media	0.839	3%
Cima	0.880	3%
Superficie de erosión o aplanamiento	0.881	3%
Ladera erosiva	5.659	17%
Lomo denudado	5.100	16%
Lomo denudado alto de longitud larga	8.042	25%
Ladera ondulada	10.226	31%

Cerro residual: Esta unidad geomorfológica corresponde a una prominencia aislada y sobresaliente, con una morfología alomada y cimas redondeadas a planas, algunas veces onduladas. Presenta pendientes escarpadas, asociadas al desarrollo de suelos residuales gruesos (SGC, 2012). Dentro de la cuenca, se observa una sola, la unidad de este tipo que tiene una forma semi circular y se encuentra a altitudes entre 2450 y 2900 ms.n.m., con pendientes que varían de abruptas a escarpadas. Además, se ha determinado a partir de fotointerpretación se observó la presencia de 1 movimiento en masa tipo deslizamiento traslacional.

Cima: Superficie plana dispuesta en franjas alargadas presentan pendientes entre planas a inclinadas limitadas por laderas cuya inclinación puede ser moderada a escarpada. Su origen se establece a partir de procesos meteorización, erosión intensa y actividad antrópica (SGC, 2012). En la cuenca esta unidad se encuentra en la parte alta bordeando el parte agua con altitudes entre 3450y 3550 ms.n.m con inclinación de laderas entre plana a muy inclinadas, rodeadas por laderas inclinaciones escapadas.

Ladera erosiva: Superficies de terreno con pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas., de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos (SGC, 2012). Esta unidad en la cuenca presenta una morfología cóncava y se sitúa a altitudes entre 1650 y 3550 ms.n.m. Se caracteriza por sus largas laderas, un índice de inclinación escarpado y drenajes que siguen la pendiente de la ladera. También se observaron procesos erosivos en forma de surcos y 6 movimientos de masa tipo deslizamientos (ver Figura 4).

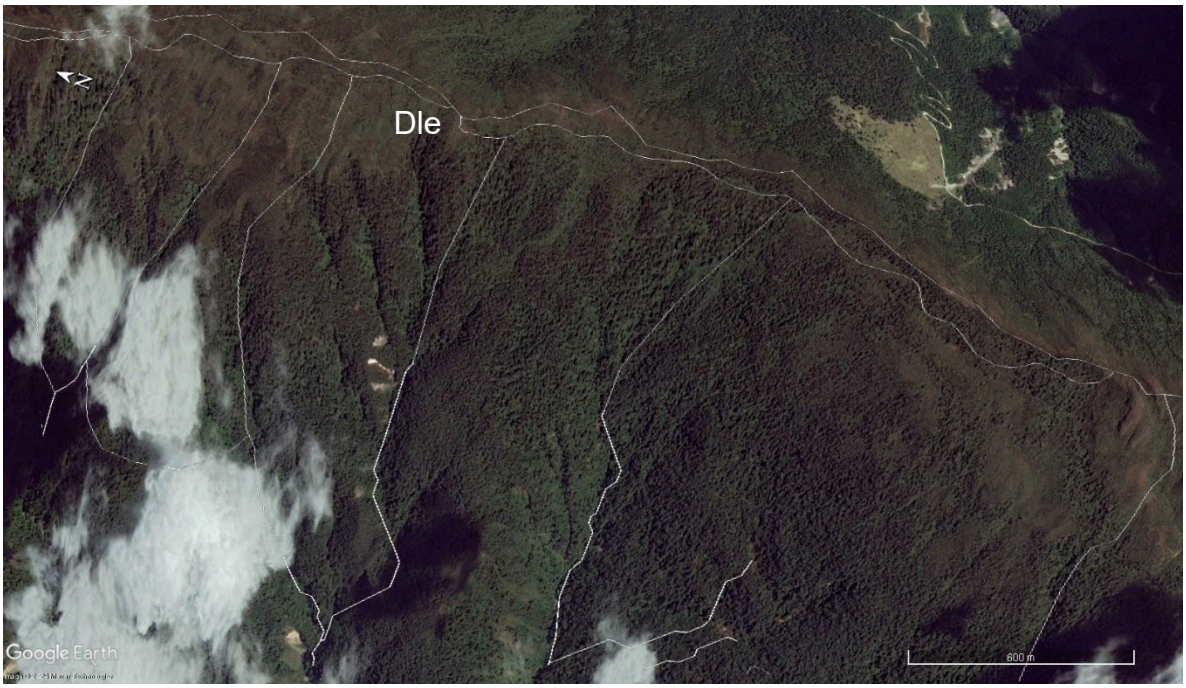


Figura 4 Ladera erosiva. Fuente: Google Earth. Ubicada al lado derecho de la cuenca

Ladera ondulada: La unidad geomorfológica de ladera ondulada se caracteriza por una superficie alomada o colinada, con pendientes que varían de inclinadas a escarpadas y con una longitud de laderas de corta a muy larga. Estas laderas se desarrollan sobre suelos

residuales y depósitos coluviales (SGC, 2012). En la cuenca, las laderas onduladas presentan una morfología convexa, situándose entre los 1650 y 3550 ms.n.m., con pendientes escarpadas y longitudes de moderadas a largas. Además, se observó la presencia de escarpes en algunas áreas y 7 movimientos de masa tipo deslizamiento **(**Ver Figura 5)

Figura 5 Ladera ondulada Fuente: Google Earth. Ubicada al margen derecho de la cuenca

Lomo denudado: Son conjuntos de lomos ubicados a diferentes alturas con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos o de la velocidad de la erosión del rio principal (SGC, 2012).Dentro de la cuenca esta unidad encuentra a una altitud entre 1650 y 2500 ms.n.m. Se observa un morfología alomada y cóncava con longitud de laderas cortas a moderadas, La pendiente varia de muy abrupta a escarpada y se orienta en dirección perpendicular al drenaje. Además, se observaron 2 movimientos de masa, específicamente deslizamientos de detritos de tipo traslacional.

Lomo denudado alto de longitud corta: Son conjuntos de lomos situados a diferentes altitudes, con un índice de relieve relativo que varía entre 250 y 1000 m. Tienen una forma alargada, orientados perpendicularmente al drenaje principal. La inclinación y orientación del eje del lomo proporcionan información sobre los procesos y velocidades de levantamiento

del conjunto cordillerano, así como sobre la velocidad de erosión del río principal o eje geomorfológico (SGC, 2012). En la cuenca, esta unidad se encuentra entre los 3200 y 3550 ms.n.m., con una pendiente escarpada, morfología cóncava y laderas de longitud larga.

Lomo denudado alto de longitud media Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo mayor que 1000 m y el eje principal tiene una longitud entre 250 m y 1000 m; son formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal. El tope o parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha desarrollado la roca dominante y de los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico (SGC, 2012). Dentro de la cuenca, esta unidad se encuentra a altitudes entre 2850 y 3500 ms.n.m., con una morfología cóncava, índices de inclinación escarpados y laderas largas, no evidencia movimientos en masa

Lomo denudado alto de longitud larga: Esta unidad geomorfológica está compuesta por conjuntos de lomos o filos de forma alargada, dispuestos perpendicularmente al drenaje principal. Presentan un índice de relieve relativo que varía entre 250 y 1000 m y una longitud del eje principal superior a 1000 m. Las cimas pueden mostrar diversas morfologías, influenciadas por el grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito desarrollado en la roca dominante y los procesos erosivos que las han modelado a lo largo del tiempo (SGC, 2012). En la cuenca, estas unidades exhiben una inclinación de ladera que varía de escarpada a muy escarpada, una morfología alargada y cóncava, y evidencias de 6 movimientos en masa (ver figura 6).

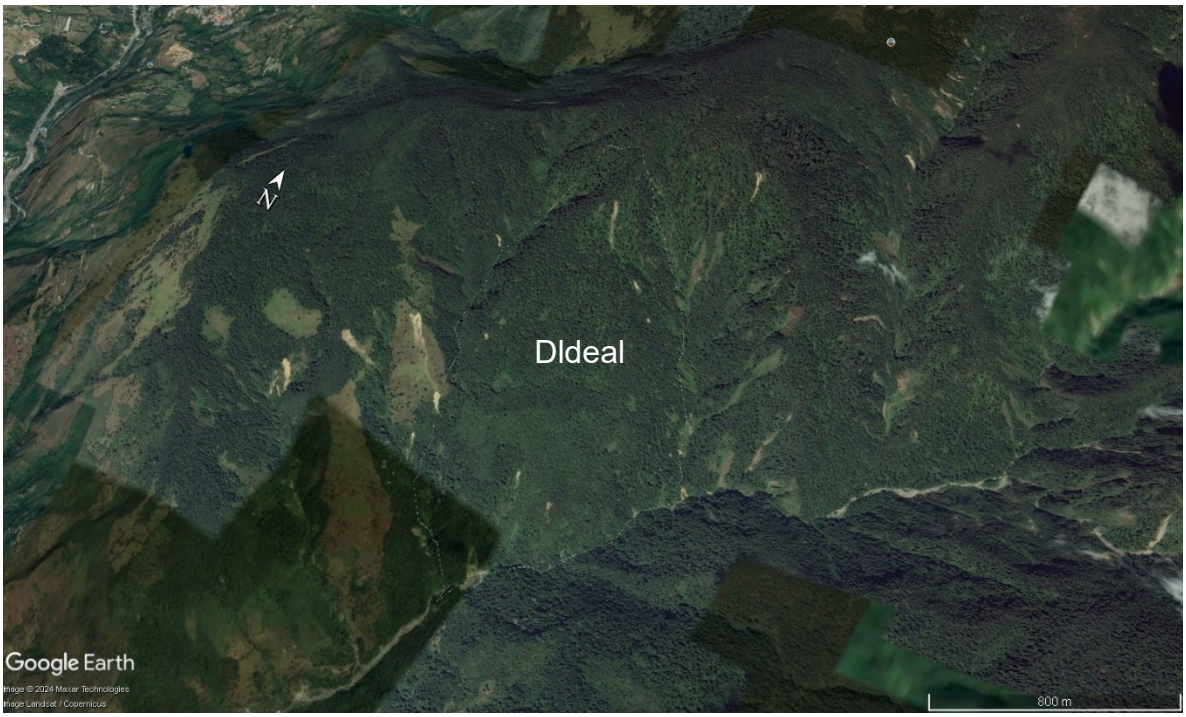


Figura 6 Lomo denudado alto de longitud larga Fuente: Google Earth Ubicada al margen izquierdo de la cuenca

Superficie de erosión o aplanamiento

Área extensa y plana, elevada o basculada. La topografía plana horizontal recorta las capas del basamento geológico. Su origen es relacionado a intensos procesos denudaciones y degradaciones (meteorización) bajo condiciones climáticas y tectónicas estables antiguas. (SGC, 2012) Las unidades geomorfológicas denotadas se encuentran al margen derecho de la cuenca rodeada por ladera ondulado y lomo denudad. Estas unidades no presentan movimientos en masa.

Ambiente fluvial

El ambiente fluvial se origina a partir de las de procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las zonas aledañas a las corrientes., tanto en épocas invernales como en panoramas normal de corrientes permanentes en épocas secas (SGC, 2012). En la cuenca Naranjal las unidades fluviales ocupan un 0.2% del área total de la cuenca.

Plano de inundación: Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza (SGC, 2012). En la cuenca esta unidad se presenta como superficies estrechas La constituyen sedimentos tipo canto rodado producto de la sedimentación durante eventos de inundación fluvial.

CALCULO MORFOMÉTRICO DE LA CUENCA.

La cuenca de la quebrada Naranjal tiene un área de 32.8 km^2, con un perímetro de 27.19 km , una longitud de 9.47 km El análisis factor forma muestra que la cuenca tiene una geometría ligeramente alargada este tipo de morfología son característicos de cuencas que presentan una respuesta hidrológica lenta favoreciendo la acumulación de grandes volúmenes de agua y la generación de escorrentía intensa. El orden de trasmisión describe el cambio de cada orden de drenaje (Tarboton, Bras, & I. Rodriguez, 1991) según la metodología la cuenca naranjal tiene un orden de 4.

La densidad de drenaje describe la capacidad de una cuenca para evacuar el agua que fluye por la superficie (Verdugo, 2017) , el resultado muestra que la cuenca tiene una densidad de drenaje baja lo que indica un suelo pobremente drenado. Además, tiene relación con movimientos en masa tipo deslizamientos de detritos traslacionales, deslizamientos de tierra tras flujos de detritos (Valencia & Martinez, 2024) .

El coeficiente de circularidad y compacidad muestran la forma de la cuenca, es decir que tan ovalado o circular es, así como la capacidad para evacuar volúmenes de agua tras precipitaciones intensas. La cuenca presenta una geometría alargada y rectangular – oblonga y compacidad mayor a 1, lo que indica que el tiempo requerido para evacuar agua después de eventos de lluvia es relativamente alto, concentrando grandes volúmenes de agua por escorrentía superficial y teniendo menos eficiencia para drenar agua rápidamente. El análisis factor asimetría tiene como objetivo determinar qué superficies de la cuenca son más susceptibles a generar movimientos en masa (MM). Las áreas inclinadas desarrollarán una red de drenaje que puede aumentar la erosión del suelo, especialmente durante eventos de alta escorrentía superficial. Los resultados obtenidos muestran que la cuenca presenta una inclinación hacia la izquierda comportamiento espero debido al trazo de la falla Naranjal, y

es ligeramente asimétrica. Al correlacionar este resultad con la fotointerpretación, se puede observar en la margen izquierda se registra una alta densidad de deslizamientos y flujos asociados al ambiente denudacional

La curva hipsométrica de la cuenca Naranjal indica una fase de desarrollo juvenil, lo cual favorece tanto la producción como la acumulación de sedimentos (ver Figura 7). Esta fase de evolución geomorfológica es coherente con su forma alargada, ya que ambas características refuerzan la tendencia de la cuenca a retener sedimentos en vez de evacuarlos de inmediato.

El coeficiente de torrencialidad indica un régimen hídrico moderadamente torrencial, lo cual sugiere escorrentías rápidas y aumentos abruptos en el nivel del agua durante lluvias intensas. El tiempo de concentración estimado de 45 minutos, en combinación con el coeficiente de torrencialidad, señalan que la cuenca favorece procesos de erosión tanto vertical como lateral, desarrollando superficies propensas a procesos erosivos en busca de un equilibrio geomorfológico.

Finalmente, el coeficiente de masividad describe a la cuenca como una formación pequeña y montañosa (ver Tabla 4), con un relieve abrupto y escarpado, lo que favorece la formación de movimientos en masa. Comparando este hallazgo con la curva hipsométrica (en fase juvenil-madurez), se observa que las características geomorfológicas y la acumulación de sedimentos incrementan su susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

Tabla 4 Resultados cálculos morfométricos.

Área	32.8 km^2
Perímetro	27.19 km
longitud	9.6 km
longitud cauce principal	10.39 km
Factor Forma	0.30
Relación de circularidad	0.55
Relación compacidad	1.32
Densidad del drenaje	2.53

Factor de asimetría	59.26
Coeficiente de torrencialidad	3.658537
coeficiente de masividad	77.02977
Tiempo de concentración	0.76

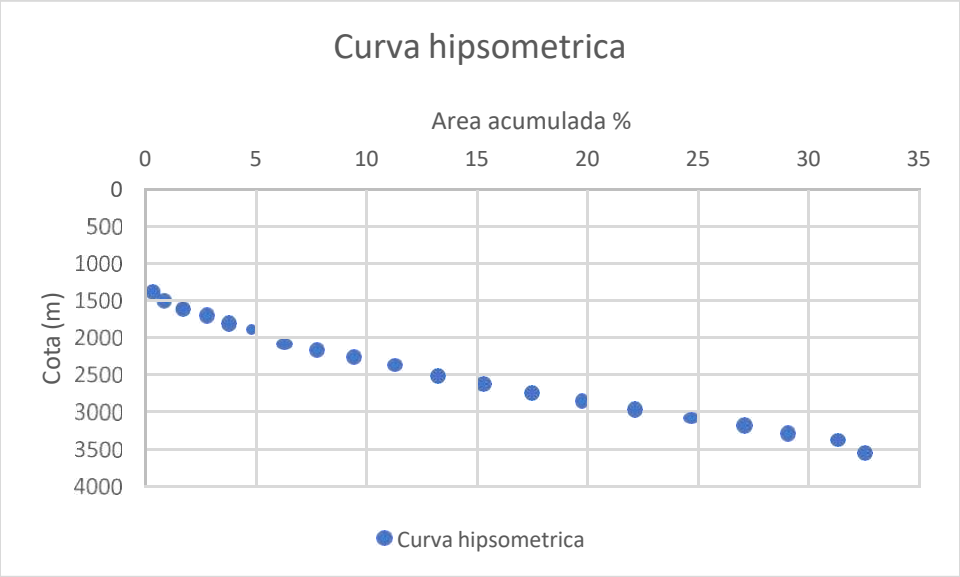


Figura 7 Curva Hipsométrica

8) DISCUSIÓN

Los resultados sugieren que el ambiente denudacional de la cuenca Naranjal es dinámico, caracterizado por deslizamientos y flujos activos que impactan de manera significativa en la estabilidad de las superficies y en la configuración del paisaje. La presencia de pendientes escarpadas y el control de la erosión acelerada indican que estos procesos son determinantes en la morfología y evolución del relieve. El ambiente fluvial, a su vez, resalta la importancia de la red de drenaje, que opera bajo un fuerte control de la meteorización y la erosión.

El análisis del factor de asimetría muestra una inclinación de la cuenca hacia el margen derecho, donde se correlaciona una alta densidad de deslizamientos y flujos. En contexto con otro estudio la cuenca tiene una similitud con el estudio realizado por (Valencia & Martinez, 2024) donde cuencas ligeramente asimetrías desarrollan una alta densidad de deslizamientos de tipo Traslacional Esta inclinación y la distribución de pendientes desde abruptas a escarpadas con grado alto de inestabilidad aumentan la susceptibilidad a la erosión y al desprendimiento de material en eventos de lluvia intensa.

La geometría alargada de la cuenca, en combinación con un coeficiente de compacidad superior a 1 y un elevado coeficiente de torrencialidad, indicando que el tiempo necesario para la evacuación de aguas pluviales es considerablemente alto. Esto, sumado a una baja densidad de drenaje, mostrando una red de drenaje moderadamente desarrollada, y en eventos de precipitación intensa puede presentar un caudal incrementado y, por lo tanto, generar una respuesta de escorrentía rápida. Esta condición crea una situación crítica para la cuenca, en la cual la acumulación de agua y la amenaza por avenidas torrenciales o inundaciones es alto debido a la capacidad limitada del sistema de drenaje para evacuar el exceso de agua eficientemente.

La curva hipsométrica señala que la cuenca se encuentra en una fase juvenil los procesos de meteorización y erosión son especialmente activos y favorecen la acumulación de sedimentos. Además, la sedimentación se provoca también a partir de los lechos de los cauces tal como lo menciona (Garcin , Poisson, & Pouget, 2005) Esta fase evolutiva es clave para entender el comportamiento actual de la cuenca, ya que una mayor acumulación de

sedimentos podría predisponerla a eventos de deslizamientos y flujos de detritos en períodos de alta precipitación.

La interacción entre los factores geomorfológicos y la dinámica hídrica promueve la acumulación de sedimentos en las zonas de pendiente, aumentando la probabilidad de deslizamientos, particularmente en áreas de relieve abrupto y expuesto. Además, el coeficiente de masividad confirma el carácter montañoso y relativamente pequeño de la cuenca, lo que agrava el riesgo de eventos torrenciales y deslizamientos en respuesta a precipitaciones intensas. Al integrar estos factores, se observa que la cuenca Naranjal es susceptible a avenidas torrenciales, relacionado por el aporte de sedimentos desde las laderas adyacentes como deslizamientos traslacionales y flujos de escombros, estos materiales se transportan a través de afluentes, terminado en la quebrada Naranjal, aumentando la carga sedimentaria en el cauce y colocando una alta resistencia a la evacuación del agua.

La correlación de, las ambientes denudaciones, fluviales y los parámetros morfométricos sugieren que la cuenca Naranjal es un entorno propenso a flujos densos de sedimentos, con un tiempo de evacuación elevado y un perfil de riesgo considerable frente a eventos de lluvia intensa y escorrentía.

9) CONCLUSIÓN

- La interpretación geomorfológica de la cuenca Naranjal indica que su configuración está dominada por el ambiente denudacional, el cual cubre casi la totalidad del área, siendo afectado intensamente por procesos de meteorización y erosión. La cuenca presenta un relieve abrupto y escarpado con predominancia de unidades como laderas onduladas y lomos denudados altos de variada longitud, los cuales son particularmente susceptibles a movimientos de masa.
- La estructura alargada de la cuenca, junto a un coeficiente de compacidad elevado y baja densidad de drenaje, señala que tiene una capacidad restringida para evacuar aguas provenientes de precipitaciones intensas, incrementando el riesgo de eventos de escorrentía rápida y avenidas torrenciales.

- Los valores obtenidos en el análisis morfométrico mostraron que la cuenca Naranjal tiene una respuesta hidrológica lenta, lo cual, sumado a una curva hipsométrica en fase de transición de juventud a madurez, favorece la acumulación de sedimentos en las zonas bajas de la cuenca. Esto, en combinación con el régimen hídrico moderadamente torrencial y los procesos erosivos activos, sugiere que la cuenca está en un estado geomorfológico de equilibrio dinámico, donde la acumulación de sedimentos y los deslizamientos son constantes. Estos factores subrayan la importancia de considerar el ambiente geomorfológico en la gestión de riesgos, ya que los procesos de movimientos en masa son significativos y representan un factor crítico de inestabilidad, especialmente durante eventos de precipitaciónintensa.

10) BIBLIOGRAFÍA

Aristizabal, E., Arango Carmona, M. I., & Garcia Lopez, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales. *Cuaderno de Geografia* , 242-258.

Bedoya, K. N., Aristizabal, E., & Morales, J. A. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacia y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvia ern la region Andina Colombiana . *Ingeneria Y ciencia*.

Carvajal, J. H. (2011). PROPUESTA DE ESTANDARIZACION DE LA CARTOGRAFÍA. *INGEOMINAS*.

Duran , J., Elizarga, E., Garzon , G., Lamas , J., Lendinez , A., & Prieto, C. (1985). Geologo y prevencion de daños . *Servivio Geologico de España*.

Garcin , M., Poisson, B., & Pouget, R. (2005). High rates of geomorphological processes in a tropical area: the Remparts River case study (Réunion Island, Indian Ocean). *Geomorphology*, 335-350.

Gravelius, H. (1914). *Flubkunde.*

Horton. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach toquantitative morphology.* Geological Society of America Bulletin. U.S.A.

INGEOMINAS. (2011). *Cartografia Geologica de la plancha 247 Caqueza escala 1:10000.* Bogota.

Jaramillo, O., Gavidia, A., Oscar, A., Cruz, A., & Rincón, R. (2016). ANEXOS DE LA MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 PLANCHA 247 - BOGOTÁ SURESTE. *INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM.*

Keller, E., & Nicholas, P. (1996). *Tectonica Activa* . Prentice Hall.

Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 362.

López García, J. D., Carvajal Escobar, Y., & Enciso Arango, A. (2017). Sistemas de alerta temprana con enfoque participativo: un desafío para la gestión del riesgo en Colombia. *Luna Azul* , 231-246.

Loro, M. (2012). CÁLCULO DE CUENCA VERTIENTE A PARTIR DE UN DTM. *Archivo digital UPM*. Obtenido de https://www.cursosgis.com/delimitar-una-cuenca-hidrografica-con-la-herramienta-hydrology-de-arcgis/

Luinoa, F., Turconi, L., Paliaga, G., Faccin, F., & Marincioni, F. (2018). Torrential floods in the upper Soana Valley (NW Italian Alps). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 343-354.

Martonne, E. (1940). *Traite de geographie physique.* Paris: Armand Colin .

Michel, H., & Gonzales, G. (2004). Desastre de origen Natural en Colombia 1970-2004. *Universidad Eafit* .

Miller, V. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Varginia and Tennessee. *Universidad de Columbia* .

Mora, A., & Kammer, A. (1999). Comparacion de los estilos estructurales en la sección entre Bogotá y los Farallones de Medina. Cordillera Oriental de Colombia.

Quetame, A. d. (2020). *Esquema de Ordenamiento Territorial de Quetame.* Quetame .

Ramos, A. M. (2021). *Guía metodológica para zonificación deamenaza por avenidas torrenciales. ServicioGeológico Colombiano y Pontificia Universidad Javeriana.* Bogota: Ceditorial .

Rendo Valencia, G. (1997). Hidraulica Torrencial. *DYNA*, 23-31.

Romero, A., & Francisco, L. (1987). Morfometria de redesfluviales : revision critica de los parametros mas utilizados y aplicacion al alto Guadaquiver . *Papeles de geografia fisica* , 47-62.

Salcedo, E., Gomez, A., & Mora, H. (2008). Análisis complementario entre parámetros instrumentales y macrosísmicos: terremoto de mayo 24, 2008 en Quetame, Colombia. *Boletin de geologia*. doi:https://doi.org/10.18273/revbol.v43n2-2021009

Schumm, S. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY. *GSA Bulletin*, 597-646.

SGC. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental.* Bogota : Servicio Geologico Colombiano .

SIMMA. (23 de 09 de 2024). *Sistema de Informacion de movimientos en masa* . Obtenido de https://simma.sgc.gov.co/#/

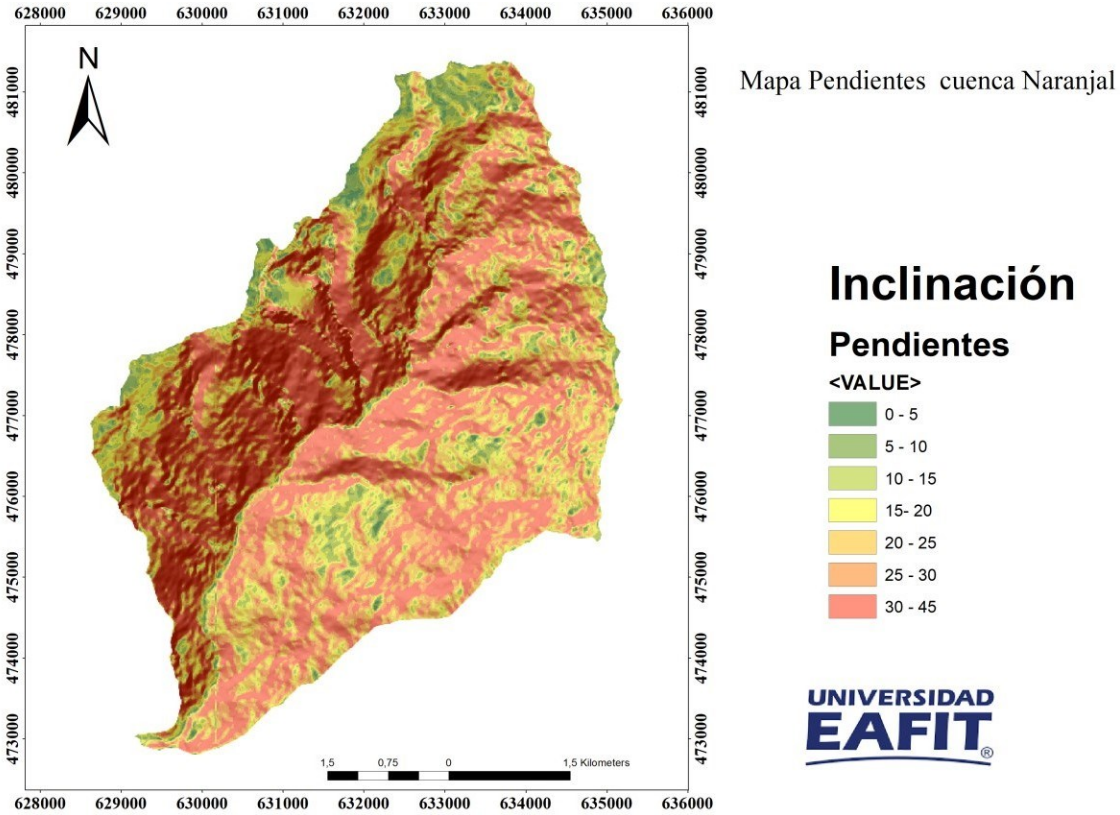
Tarboton, D. G., Bras, R. L., & I. Rodriguez, I. (1991). On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 81-100.

Valencia, J., & Martinez, A. (2024). Análisis morfométrico y morfoestructural como herramienta de modelación en escenarios de movimientos en masa (Bucaramanga, Colombia). *Geomatica peligros naturales y riesgos* .

Valencia, O. J., & Martinez, G. A. (2023). Evaluación morfométrica y su incidencia en los movimientos en masa presentes en el Cañón del Chicamocha, Colombia. *Sostenibilidad* , 15.

Verdugo, C. M. (2017). Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico. *Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana*.

ANEXOS



Mapa de pendientes Fuente: Elaboración propia