

Comparación del comportamiento de la trayectoria de los deslizamientos entre modelos geométricos y empíricos para el mapeo de zonificación de amenaza por movimientos en masa de la vía Bolombolo – Amagá sector Sinifaná Km 57.

Autor:

Adriana Carolina Coronado Navarro

Trabajo de grado presentando para optar el título de

Geóloga

Asesor:

Marco Fidel Gamboa Ramírez

Asesor Externo:

Juan Pablo Castañeda Gutiérrez

Universidad EAFIT

Departamento de Ciencias de la Tierra

Pregrado de Geología

Medellín, Colombia

Mayo de 2022

Contenido

1. Introducción	8
2. Generalidades	9
2.1 Pregunta de investigación	9
2.2 Hipótesis	9
2.3 Planteamiento del problema	9
2.4 Objetivo General.....	10
2.5 Objetivos Específicos	10
3. Zona de estudio.....	10
3.1 Localización.....	10
3.2 Clima.....	12
3.2.1 Hidrología y cuencas hidrográficas	12
3.3 Geología Regional	13
3.3.1 Geología Local	13
3.4 Geología estructural.....	14
3.4.1 Falla geológica La Cascajosa	14
3.4.2 Falla geológica Sabanalarga y falla geológica del Cauca.....	14
3.5 Geomorfología Regional	14
3.5.1 Geomorfología Local.....	15
3.5.1.1 Ambiente Fluvial.....	15
3.5.1.2 Llanura de inundación.....	15
3.5.2 Ambiente Denudacional.....	15
3.5.2.1 Ladera escarpada con alta incisión.....	15
3.5.2.2 Ladera larga de longitud alta.....	16
3.5.2.3 Loma denudada	16
3.5.2.4 Zona de acumulación	16
4 Marco conceptual	16
4.1 Zonificación	16
4.2 Vulnerabilidad (V).....	16

4.3	Geomorfología de un movimiento en masa.....	16
4.4	Distancia de viaje (Runout)	17
4.5	Modelo Flow R	17
4.5.1	Identificación del área de origen	18
4.5.2	Evaluación de la propagación	18
4.5.2.1	Algoritmos de dirección de flujo.....	18
4.5.2.1.1	Algoritmo de Holmgren (1994):	19
5	Metodología.....	24
5.1	Recopilación y revisión de información secundaria.....	25
5.2	Procesamiento de datos	26
5.3	Variables Morfométricas	26
5.3.1	Pendiente.....	26
5.3.2	Curvatura.....	27
5.4	Fotointerpretación.....	28
5.5	Modelamiento de datos.....	31
6.	Resultados	31
6.1	Flow R	31
6.2	Modelo T	34
7.	Discusión	36
8.	Conclusiones.....	36
9.	Bibliografía.....	38

Tabla de figuras

Figura 1.	Mapa de localización del municipio de Titiribí. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).....	11
Figura 2.	Diagrama metodológico.....	25
figura 3.	fotografías aéreas del área de estudio. fuente: gobernación de Medellín, 2006.	28
Figura 4.	Fotointerpretación del área de influencia del deslizamiento, sector Sinifaná. Fuente: Gobernación de Antioquía, 2006. Escala 1:100.000.....	29
Figura 5.	Interpretación de fotografía aérea tomada de Google Earth..	31

Figura 6. Resultados del análisis de propagación del flujo de escombros del movimiento en masa vía Bolombolo-Amagá sector Sinifaná. 34

Figura 7. Mapa de isocontornos del gradiente modificado del movimiento en masa vía Bolombolo-Amagá sector Sinifaná..... 35

Lista de tablas

Tabla 1. Unidades geomorfológicas del municipio de Titiribí. Fuente: Elaboración propia..... 15

Tabla 2. Modelos de los algoritmos incerciales 20

Tabla 3. Reclasificación de la pendiente del área de estudio..... 26

Tabla 4. Reclasificación de la pendiente del área de estudio..... 27

Tabla 5. Información de la parametrización para casa caso..... 32

Tabla 6. Valores de coincidencia para cada caso analizado..... 33

Anexos

Anexo #1. Ubicación del movimiento en masa, sector Sinifaná. Kilómetro 57. Elaboración: El Colombiano, 2019.

Anexo # 2. Geología regional del municipio de Titiribí. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).

Anexo # 3. Geología local del municipio de Titiribí. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).

Anexo # 4. Geomorfología regional del municipio de Titiribí. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).

Anexo # 6. Geomorfología de un movimiento en masa. (Información tomado de Varnes,1978).

Anexo # 7. Partes de la trayectoria de los movimiento en masa. (Información tomado de Varnes,1978).

Anexo # 8. Representación de la dirección y propagación del volumen de masa. (Imagen tomado de Horton et al., 2013).

Anexo # 9. Angulo de viaje (Imagen tomada de Horton et al., 2013).

Anexo # 10. Gráfico de log F Vs V (Imagen tomada de Finlay et al., 1999).

Anexo # 11. Variables del modelo T (Imagen tomada de Martínez et al., 2018).

Anexo # 12. Procesamiento del gradiente Z. Elaboración propia.

Anexo # 13. Mapa de pendiente de la zona de estudio. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).

Anexo # 14. Mapa de curvatura de la zona de estudio. Elaboración propia. (Información tomado del IGAC).

Resumen

Los deslizamientos en masa son eventos que pueden llegar a causar destrucción de viviendas, pérdidas de vidas humanas y afectación de la infraestructura. El presente estudio fue llevado a cabo en la vía Bolombolo – Amaga en el sector de Sinifaná, kilómetro 57, dejando incomunicado al Suroeste antioqueño por 6 meses. Estos eventos, por sus características, pueden llegar a recorrer largas distancias, con altas velocidades causando afectaciones como las anteriormente mencionadas. Varios estudios analizan la propagación de los deslizamientos empleando un enfoque empírico y geométrico como lo son Flow R y el Modelo T modelos basados en SIG. Estos modelos, tienen la ventaja de que son de libre acceso y los parámetros de entradas son fáciles de obtener. El modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 10 m junto con las áreas de origen fueron los insumos bases para cada uno de los modelos. Los resultados obtenidos se validaron comparándolos con el análisis fotogeológico detallado de la zona de estudio. Mediante este proyecto, se logró comparar los modelos mencionados para la determinación de la zonificación de amenaza y determinar los comportamientos de la trayectoria generada por el movimiento en masa. El modelo empírico Flow R arrojó mejores resultados que el modelo T, ajustándose mejor al movimiento en masa de la zona de estudio.

Palabras Clave: Propagación, Flow R, Modelo T, Modelo de elevación digital, parámetros.

Abstract

Mass landslides are events that can cause the destruction of homes, loss of human life and damage to infrastructure. This study was carried out on the Bolombolo – Amaga road in the Sinifaná sector, kilometer 57, leaving Southwest Antioquia cut off for 6 months. These events, due to their characteristics, can travel long distances, with high speeds that cause effects such as those mentioned above. Several studies analyze landslide propagation using an empirical and geometric approach such as Flow R and Model T based on GIS models. These models have the advantage that they are freely accessible and the input parameters are easy to obtain. The digital elevation model (DEM) with a resolution of 10 m along with the source areas were the base inputs for each of the models. The results obtained were validated by comparing them with the detailed photogeological analysis of the study area. Through this project, it will be prepared to compare the models mentioned for the determination of the hazard zoning and to determine the behaviors of the trajectory generated by the mass movement. The Flow R empirical model yielded better results than the T model, adjusting better to the mass movement of the study area.

Keywords: Propagation, Flow R, Model T, Digital Elevation Model, parameters.

1. Introducción

Los movimientos en masa son fenómenos naturales de tipo geológico potencialmente peligrosos en la cual, ocurren movimientos de un material a lo largo de una ladera por acción de la fuerza de gravedad, ligados a las fuertes lluvias, cambios en el clima, sismos y a las constantes actividades antrópicas. (SGC, 2016). A nivel mundial, ocurren miles de muertes cada año causadas por los deslizamientos, un ejemplo de este fue el ocurrido en Oso, Washington, en marzo de 2014 (Keaton et al., 2014).

En Colombia, los movimientos en masa han ocasionado grandes catástrofes, generando enormes pérdidas económicas e impactos negativos de tipo social y político, creando el interés por analizar y estudiar estos eventos (DNP, 2015). Adicionalmente, nuestro país queda ubicado sobre la cadena montañosa Cordillera de los Andes, con más del 70% de su población concentrada dentro de este sistema montañoso, aumentando la susceptibilidad de la afectación asociados a este tipo de movimientos en masa (SGC, 2016).

Según el Banco mundial (2012), en Colombia se tienen registros de más de diez mil deslizamientos que han ocurrido en los diferentes departamentos del país, y que han causado aproximadamente siete mil muertes entre 1921 y 2017. Estos eventos son los que han provocado más pérdidas de vida humana con un 36% y el tercer evento que ha generado más viviendas destruidas con 10%, respecto a los eventos estudiados por el Banco Mundial 2012, convirtiéndose estos eventos en un riesgo potencial.

El Departamento Nacional de Planeación del país, indica que el departamento de Antioquia ocupa el primer lugar en afectaciones por desastres naturales. Entre los años 2006 a 2014 la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre (UNGRD) ha estimado alrededor de 888 eventos, de los cuales 283 corresponden a deslizamientos (DNP, 2015).

Gran parte de las muertes mencionadas anteriormente, ocurrieron porque los deslizamientos pueden viajar a velocidades muy altas, pudiendo llegar a distancias muy lejanas de sus fuentes. Por consiguiente, los planes de ordenamiento territorial se están concentrando en el estudio de la mitigación del riesgo por eventos de remoción en masa (Jaboyedoff et al., 2010).

Considerando lo anterior, se necesita de nuevos softwares y diferentes modelos como los geométricos y los empíricos para estudiar y predecir el comportamiento de la cinemática de los deslizamientos y una adecuada evaluación del riesgo (Chen et al., 2002). Estos modelos tienen como objetivo determinar y evaluar la distribución del material a lo largo del recorrido, su intensidad y la zona de impacto de los elementos (Horton et al., 2013).

Por otra parte, Colombia no cuenta con gran cantidad de estudios sobre estos modelos, debido a que son pocos conocidos y utilizados. Por ende, Colombia presenta vacíos significativos sobre ciertos temas. Este proyecto pretende realizar una comparación entre los resultados de los diferentes modelos geométricos y empíricos como lo son Flow-R y el modelo T. Esta comparación se realizará con los datos e información del deslizamiento ocurrido en la vía Bolombolo-Amagá km 57 que obstruyó la quebrada Sinifaná, dicho movimiento será la principal área de estudio para desarrollar los modelos mencionados.

2. Generalidades

2.1 Pregunta de investigación

¿Cuál de los modelos geométricos y empíricos del presente trabajo permite obtener mejores resultados para conocer el comportamiento de la trayectoria y zonas de amenazas por movimientos en masa?

2.2 Hipótesis

Los modelos geométricos y empíricos están desarrollados para evaluar e identificar el comportamiento de la trayectoria, aproximaciones o valores confiables de la amenaza por movimiento en masa. Se cree que el modelo empírico por requerir un mínimo de datos y por su fácil personalización y elección de parámetros permitir mejores y rápidos resultados de la posible trayectoria del movimiento en masa ocurrido en el kilómetro 57 en el sector de la Sinifaná.

2.3 Planteamiento del problema

Las metodologías utilizadas para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa son un área importante de investigación potenciadas por el uso de tecnologías tales como los sistemas de información geográfica (SIG), datos e imágenes satelitales y la incorporación de los diferentes modelos de análisis (Bonham, 1994).

En la actualidad en Colombia existen diversas metodologías para abordar los estudios para el análisis y zonificación de amenaza a diferentes escalas. Básicamente todos estos estudios como por ejemplo la Guía Metodológica para la zonificación en masa por movimiento en masa escala 1:25.000 solo estudian o predicen las áreas fuentes, es decir se centran en las zonas de despegue de los movimientos en masa, pero no identifica la distancia de viaje. Los modelos *runout* son pocos conocidos y tienen como objetivo determinar hasta donde se podrían propagar los movimientos en masa. Es de suma importancia estudiar estos modelos ya que el mayor impacto de los movimientos no está en las zonas de despegue, si no en la zona donde se depositan. Dichos impactos son los que producen las pérdidas humanas y grandes daños en las infraestructuras.

Por lo mencionado anteriormente, se necesita complementar la información generada por los modelos de despegue con los modelos de distancia de viaje para así obtener un estudio más detallado y completo de los movimientos en masa.

2.4 Objetivo General

Comparar los métodos geométricos y empíricos para la determinación de la zonificación de amenaza y comportamientos de la trayectoria generada por los movimientos en masa en la vía Bolombolo – Antioquia.

2.5 Objetivos Específicos

- Determinar el área alcanzada por el movimiento en masa a partir de la fotointerpretación de la zona de estudio.
- Aplicar el modelo Flow R y Modelo T en el movimiento en masa de la zona de estudio.
- Validar los resultados obtenidos por medio del modelo Flow R y Modelo T para discutir a la luz de los resultados el comportamiento de cada uno.

3. Zona de estudio

3.1 Localización

Titiribí es un municipio del departamento de Antioquia (Colombia) localizado en la región del suroeste de Antioquia, con un territorio montañoso correspondiente a la cordillera Central de los Andes; su latitud norte es 06° 04' 04" y su longitud oeste es 75° 47' 38", con una extensión de 142

km², su altura sobre el nivel del mar en la cabecera es de 1550 m, y en todo el municipio presenta alturas desde los 600 hasta los 2200 msnm (EMRE, 2016).

Titiribí limita al norte con el municipio de Armenia Mantequilla, por el sur con el municipio de Venecia; por el oriente, con los municipios de Angelópolis y Amaga, y por el occidente con el municipio de Concordia (PDM, 2020) (Figura 1).

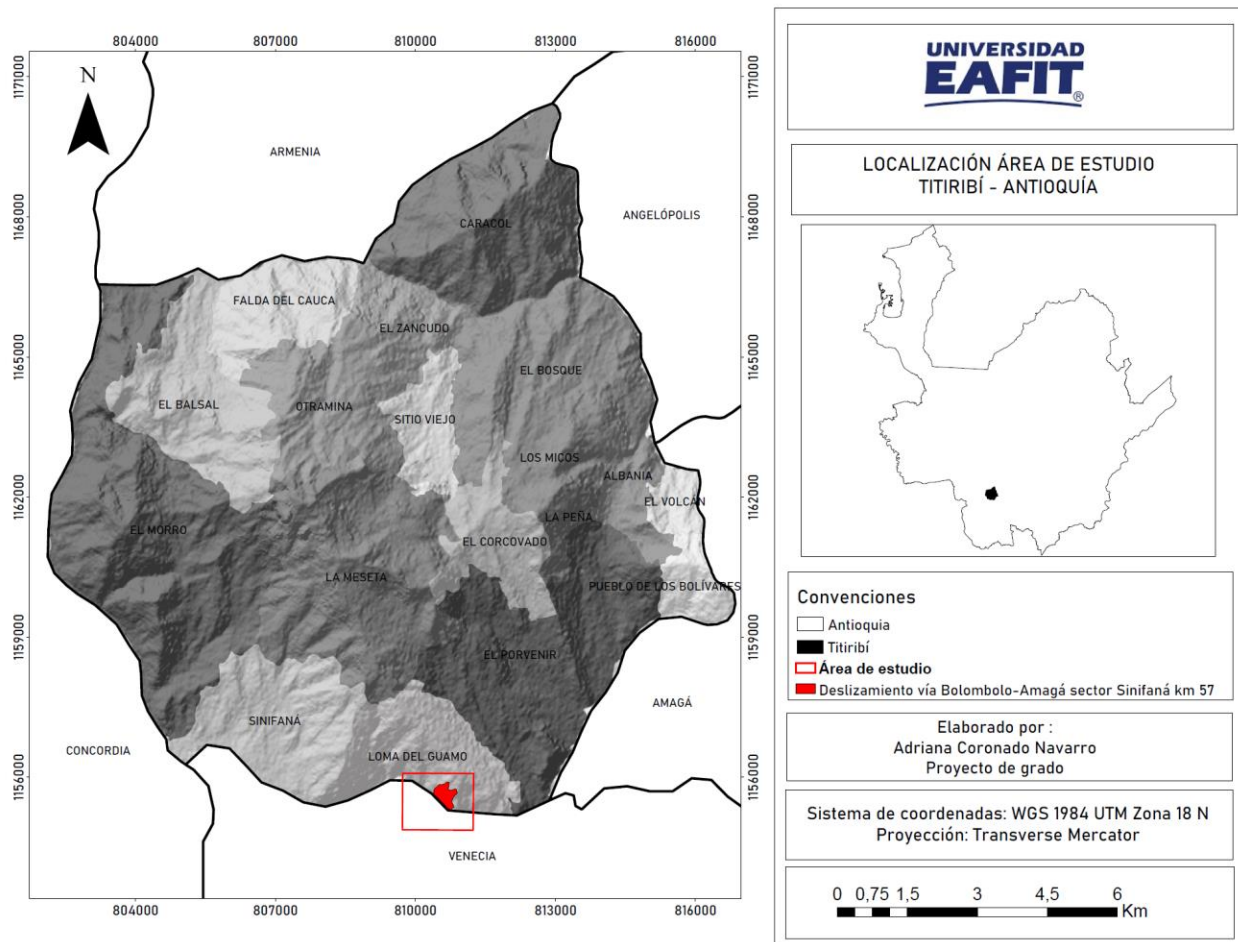


Figura 1. Mapa de localización del municipio de Titiribí. Elaboración propia. (Información tomado del SGC).

La zona de estudio está ubicada en el área de influencia del proyecto Conexión Vial Pacífico 1, que hace parte de uno de los proyectos de carreteras de cuarta generación, 4G doble calzada entre los kilómetros 56 y 62 de la vía Amagá – Bolombolo. Sobre el corte del talud a orillas de la quebrada

Sinifaná, ocurrió un movimiento en masa que destruyó la carretera Troncal del café específicamente en el kilómetro 57, lo cual obligó al cierre total y por un tiempo de alrededor de 6 meses, dejando incomunicando al suroeste Antioqueño. (Anexo # 1).

3.2 Clima

Las características climáticas de Titiribí y en general de la zona cafetera central están determinadas por la ubicación geográfica, por su relieve, pendiente, exposición de laderas, altura sobre el nivel del mar, y por las circulaciones atmosférica generales y locales. Tiene una temperatura promedio de 21°C, aunque existen sectores más cálidos cercano a la cuenca del río Cauca donde los valores pueden alcanzar los 25°C. Justamente la zona de la cuenca del río Cauca o zona baja del territorio, tiene un clima más seco. En el municipio se presentan tres regímenes de lluvia que son régimen seco (noviembre, diciembre, enero y febrero), régimen intermedio (julio, agosto, septiembre y octubre) y régimen lluvioso (abril, mayo y junio) (Corantioquia, 2007).

3.2.1 Hidrología y cuencas hidrográficas

El municipio de Titiribí pertenece a la cuenca hidrográfica del río Cauca y está rodeado por dos subcuencas del suroeste que son; la subcuenca de la quebrada Sinifaná y la subcuenca de la quebrada Amagá.

3.2.1.1 Cuenca del Río Cauca: Esta cuenca sirve de límite con el municipio de Concordia en una extensión de 11 km, entre las desembocaduras de las quebradas de Amagá y Sinifaná. En esta parte de la cuenca se encuentran las veredas El Morro y parte de la vereda El Basal; el río Cauca recibe la quebrada El Algarrobo con sus afluentes La Florcita y El Morro, la quebrada Campanas y la quebrada La Sucia. (PSMV, 2008).

3.2.1.2 Subcuenca Quebrada Sinifaná: La quebrada Sinifaná es el límite con el municipio de Venecia. Tiene un área de aproximada de 44 km². En esta subcuenca se encuentran localizadas las veredas Pueblito de los Bolívares, El Porvenir, Puerto Escondido, Loma del Guamo, La Meseta y Sinifaná. En este trayecto la quebrada obtiene las aguas de las quebradas: Sabaletas, que sirve de límite con el municipio de Amagá, estos afluentes de agua tienen pendientes muy fuertes, y son torrenciales en épocas de invierno (PSMV, 2008).

3.2.1.3 Subcuenca Quebrada Amagá: Esta subcuenca sirve de límite con esta población y con el municipio de Angelópolis en el trayecto de 21 Km. Tiene un área aproximada de 67 km². Desde la desembocadura de la quebrada el Volcán, hasta el río Cauca, en esta subcuenca se

encuentran ubicadas las veredas El volcán, La Albania, Corcovado, La Peña, El Bosque, Los Micos, Sitio Viejo, El Zancudo, Falda del Cauca, Caracol y parte de la vereda El Basal (PSMV, 2008).

3.3 Geología Regional

Las rocas del basamento de esta porción de la Cordillera Central, están conformadas por los Complejo Arquía y Quebradagrande. Los esquistos del Complejo Arquía del Jurásico tardío al Cretácico temprano son de color verde oscuro, con intervalos de esquistos grafiticos. La Formación Quebradagrande está compuesta por rocas volcánicas basálticas a andesíticas y rocas meta-sedimentarias. Forman gran parte del basamento en la parte occidental del área del proyecto y en su mayoría son del Cretácico (González, 2001). Este basamento está intruido el Stock de Amagá, la Diorita Cerro Veta y la Diorita de Pueblito, esta última tiene forma alargada y tabular controlada gran parte por el sistema de fallas Romeral (Anexo # 2). A lo largo del Terciario, sobre todas estas rocas se depositó la Formación Amagá, que se divide en 3 miembros: inferior, medio y superior. Los miembros que afloran en el municipio de Titiribí son el medio y superior datadas del Oligoceno Superior al Mioceno Superior por Van de Hammen (1958) (González, 2001). El miembro medio regionalmente tiene un espesor de aproximadamente 200 a 250 metros y consiste en arenisca blanca, arcillosa y ferruginosa expuesto al este de Titiribí. El miembro superior consta de areniscas color crema, verde y marrón bien cementadas. Durante el Terciario tardío dicho conjunto de rocas fue afectado por la actividad magmática, dando lugar a la formación de cuerpos porfídicos andesíticos correspondiente a la Formación Combia datadas del Mioceno tardío al Plioceno (González, 2001).

3.3.1 Geología Local

La geología que presenta el área de estudio está constituida por el Complejo Quebradagrande, caracterizado por intercalaciones de rocas volcánicas basálticas a andesíticas y rocas sedimentarias, presentando variaciones litoestratigráficas. Las rocas volcánicas se caracterizan por el color verdoso producido por la alteración de los minerales máficos originales a minerales secundarios, factor que genera la coloración clásica a estas rocas (González, 2001; PSMV, 2008). Son masivas y compactas con una amplia variación petrográfica datadas del Periodo Cretácico. Son muy resistentes a los procesos de erosión; y también a la meteorización lo que se refleja en la geomorfología abrupta y escarpada. Esta unidad aflora al este del municipio en una franja Norte-

Sur limitada por la falla Sabanalarga, colocándola en contacto con la Formación Amagá (Anexo #3). Al oeste está limitada por la falla Cauca Almaguer colocándose en contacto con el Complejo Cajamarca ((González, 2001; PSMV, 2008).

3.4 Geología estructural

En cuanto a la geología estructural, el municipio de Titiribí se encuentra enmarcada por el denominado sistema de Fallas Cauca – Romeral. En esta zona el fallamiento está representado por las siguientes fallas:

3.4.1 Falla geológica La Cascajosa

Está ubicada en los límites con el municipio de Angelópolis, atraviesa la vereda La Albania, El Porvenir y la Loma del Guamo, esta falla pertenece al sector carbonífero Venecia – Fredonia ((González, 2001; PSMV, 2008).

3.4.2 Falla geológica Sabanalarga y falla geológica del Cauca

Estas fallas se encuentran localizadas en las veredas El Balsal, El Morro y Sinifaná, van prácticamente paralelas al río Cauca. La primera pasa por la parte superior y la otra por la parte media del municipio de Titiribí. Estas fallas hacen parte del sistema de fallas Romeral donde se presentan terminación brusca de pliegues y zonas de deslizamiento alineados (PSMV, 2008) (Anexo # 2).

3.5 Geomorfología Regional

Según el Plan de Ordenación y Manejo Cuenca de la Quebrada Sinifaná de Corantioquia, el municipio de Titiribí se encuentra dentro de la gran unidad de relieve denominada Cañón del Río Cauca (C1) (Corantioquia, 2007) donde, geográficamente forman una franja alargada en sentido norte-sur.

Desde el punto de vista regional el municipio agrupa grandes macrounidades, de las cuales, se encuentran las siguientes: **Vertientes medias y bajas** que son formadas por factores erosivos. **Vertientes con influencia volcánica** que están controlados por la estructura geológica de origen volcánico y la última se denomina **vertientes con influencia tectónica** que se caracteriza por presentar depresiones alargadas con dirección N-S, correspondientes a cuencas sedimentarias (Corantioquia, 2007) (Anexo # 4). A continuación, se mencionan las unidades geomorfológicas del municipio de Titiribí (Tabla 1):

Tabla 1. Unidades geomorfológicas del municipio de Titiribí. Fuente: Elaboración propia

UNIDAD DE RELIEVE CAÑÓN DEL RIO CAUCA (C1)		
MACROUNIDADES	UNIDADES GEOMORFOLOGICAS	CÓDIGOS
VERTIENTES CON INFLUENCIA TECTONICA	Abanicos aluviales y vertientes onduladas	C1-VITaavo
	Vertientes Irregulares a Colinadas	C1-VITVIC
VERTIENTES MEDIAS MARGEN ESTE	Filos este oeste con flancos de fuerte inclinación	C1-VMEfewfi
VERTIENTES BAJAS MARGEN ESTE	Vertientes de fuerte inclinación	C1-lvvlfi
VERTIENTES CON INFLUENCIA VOLCÁNICA	Escarpes Cortos	C1-lvec
	Cerros Alargados de Topes Agudos en Dirección Norte – Sur	C1-lvcaans
	Cerros Alargados	C1-lvcal
	Cerros Volcánicos	C1-lvcv
	Vertientes Colinadas Cortas	C1-lvcc
	Vertiente Estructurales	C1-lvve
	Vertientes Irregulares	C1-lvvi
	Vertientes Largas de Fuerte Inclinación	C1-lvvlfi
	Vertientes onduladas de baja inclinación	C1-lvvobi
Vertiente ondulada de media inclinación	C1-lvvomi	

3.5.1 Geomorfología Local

Para la elaboración del mapa geomorfológico local se utilizaron, ortofotos, el mapa de pendientes y curvatura. Donde, se identificaron dos ambientes geomorfológicos: fluvial debido a la quebrada Sinifaná y denudacional. Para esta clasificación se usó el estudio denominado “Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial de la Región Carbonífera del Suroeste Antioqueño”.

3.5.1.1 Ambiente Fluvial

3.5.1.2 Llanura de inundación

Esta unidad se caracteriza por presentar superficies planas de bajo relieve adyacente al curso activo de la quebrada Sinifana, con pendientes planas a suavemente inclinadas con rangos entre 0 a 10°. Son áreas eventualmente inundables por el desborde y acumulación de la quebrada durante los periodos de lluvia.

3.5.2 Ambiente Denudacional

3.5.2.1 Ladera escarpada con alta incisión

Unidad que se encuentra en el área de estudio, estas geoformas presentan curvatura convexa a muy convexa y con pendientes fuertemente inclinadas a abruptas. Relieve irregular, montañoso y con carácter denudacional, dado por los cuerpos de agua con cauces profundos como la quebrada Sinifaná.

3.5.2.2 Ladera larga de longitud alta

Esta geoforma presenta forma alargada y curvatura convexa. Predominan las pendientes muy fuertes por eso tienen longitudes altas.

3.5.2.3 Loma denudada

Loma con una altura menor a 200 metros con geomorfología alomada, relieve moderadamente bajo, laderas cortas y convexas. Con pendientes muy fuertes (40-60%) según el mapa de pendientes (Anexo # 13) y con formas redondeadas. Posiblemente su origen sea producto de erosión o intensos procesos de meteorización.

3.5.2.4 Zona de acumulación

Se forman en las partes bajas de las laderas con longitud moderadamente larga, con pendientes moderadamente inclinadas, producto de la acumulación de material provenientes de las partes altas de las laderas, transportados posiblemente por erosión laminar.

4 Marco conceptual

4.1 Zonificación: Varnes (1984) define zonificación como la división de la superficie del terreno en áreas y la clasifica de acuerdo con el grado actual o potencial de amenaza por deslizamientos u otros movimientos en masa en las laderas (SGC, 2013).

4.2 Vulnerabilidad (V): grado de pérdida en un elemento o conjunto de elementos en riesgo resultado de la ocurrencia de un fenómeno natural con una determinada magnitud, expresado en una escala de 0 (sin daño) a 1 (pérdida total) (Varnes, 1984).

4.3 Geomorfología de un movimiento en masa:

En un movimiento en masa se definen los siguientes elementos, cabe resaltar que todos los movimientos no presentan la misma simetría, pero sí presentan muchas de los elementos que se observan (Anexo # 6) (Varnes, 1978):

- **Escarpe principal:** zona muy inclinada no perturbada en el borde superior del deslizamiento, donde se empieza a moverse y despegar el material del terreno.

- Escarpe secundario: superficie producida por los movimientos diferenciales dentro de la masa desplazada, esta zona presenta una alta inclinación y dentro de ella se pueden formar varios escarpes secundarios.
- Superficie de falla: Área debajo del movimiento que delimita el volumen del material desplazado, en esta zona se desarrollan estrías paralelas a la dirección del movimiento.
- Cabeza: Parte superior de la masa del material que se mueve, con forma semicircular adyacente a la línea límite entre la parte superior del terreno falla y el terreno intacto.
- Cuerpo: corresponde al material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. El material es homogéneo (ondulada) con zonas pantanosas.
- Pie: línea de intersección entre la superficie de falla y el terreno intacto.
- Base: Área cubierta por el material desplazado que reposa sobre el terreno in situ. Caracterizada por su forma de lengua o abanico.

4.4 Distancia de viaje (*Runout*): Es la distancia horizontal en planta, medida desde la corona del talud hasta la base del deslizamiento. La trayectoria del movimiento se divide en: una zona de arranque, área de transporte o propagación y por último una zona de acumulación (Castañeda, 2022) (Anexo # 7). Se empezó a hablar de runout aproximadamente desde de los años 70's cuando Varnes (1978) saco la clasificación de los movimientos en masa (Landslide classification). Por medio de ese estudio, documento alrededor de 32 movimientos en masa donde realizo una descripción completa de cada movimiento con sus componentes geomecánicas hasta la componente de propagación. (Castañeda, 2022).

4.5 Modelo Flow R

Flow R (Evaluación de flujos a escala regional) es un modelo empírico desarrollado bajo Matlab por la universidad de Lausana. Este modelo se desarrolló con el fin de realizar los mapeos regionales de susceptibilidad de los procesos gravitacionales, utilizando principalmente un DEM (Horton et al., 2008).

Es de gran importancia que el DEM tenga una buena calidad para así, obtener precisión y buenos resultados. Este modelo se usó por primera vez en Suiza para el estudio de flujos de detritos, pero ha demostrado ser relevantes para analizar otros peligros naturales como desprendimientos de

rocas, inundaciones y avalanchas de nieves (Horton et al., 2013). El modelo se subdivide en dos pasos:

- (1) la delimitación del área de la fuente o área de origen.
- (2) la evaluación de la extensión de propagación, que utiliza un enfoque probabilístico y energético (Horton et al., 2008). Estos dos pasos no tienen en cuenta los volúmenes y la masa de los fenómenos, ya que son parámetros muy difíciles de evaluar (Iverson et al., 2001).

Es apropiado que una vez obtenido los resultados del modelo sea comparado con otros estudios realizados en la zona, para analizar la precisión de los resultados y ajustar los parámetros del modelo. La parametrización de este modelo se realiza acorde al tipo de movimiento (Horton et al., 2008).

4.5.1 Identificación del área de origen

Las áreas de origen se determinan por criterios morfológicos definidos por el usuario, o también se pueden definir por medio de áreas de origen que han sido creadas por otros enfoques (basados en SIG) como, por ejemplo, el mapa pendiente o curvas de nivel que puede ayudar a definir las características topográficas del terreno. El valor de susceptibilidad de las celdas del área de origen es de 1 de forma predeterminada (Horton et al., 2013). Las áreas de origen para este proyecto fueron polígonos con valores de 1 y el Modelo de Elevación Digital con resolución de 10m.

4.5.2 Evaluación de la propagación

El modelo para realizar la evaluación de la propagación se basa en dos algoritmos, que controlan la trayectoria y la dispersión del flujo respectivamente.

4.5.2.1 Algoritmos de dirección de flujo

La trayectoria y la dispersión del flujo se pueden evaluar mediante varios algoritmos en el software, y la elección de estos es totalmente abierta al usuario. Todos estos algoritmos distribuyen el flujo de una celda a sus ocho vecinas, de tal forma que siempre haya al menos una celda en que pueda correr el flujo (Jaboyedoff et al., 2011).

4.5.2.1.1 Algoritmo de Holmgren (1994):

El algoritmo de Holmgren y su versión modifica permite una parametrización de la dispersión basado en la siguiente ecuación:

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^8 (\tan \beta_j)^x} \quad \forall \begin{cases} \tan \beta > 0 \\ x \in [1; +\infty [\end{cases}$$

Donde i y j son la dirección del flujo; p_i^{fd} proporción de susceptibilidad en la dirección i , $\tan \beta_i$ gradiente de la pendiente entre la celda central y la celda en la dirección i , y x la variable exponente.

Este algoritmo consiste en calcular los costos de energía dependiendo de la dirección en la que vaya el flujo y la diferencia de pendiente que tiene la celda fuente con respecto a las celdas vecinas (Anexo # 8). Esa diferencia de altura de una celda a otra es el parámetro β . Si β es un valor muy grande, el costo de energía va a ser menor, mientras que si la pendiente es menor el costo de energía va a ser mayor (Horton et al., 2013).

El anexo # 8 representa la energía remanente cuando pasa el flujo de la celda central p_o hasta las demás celdas (w_{45} y w_0).

La celda W_0 tiene mayor β es decir, que presenta mayor diferencia de altura por lo tanto, requiere menor costo de energía, pero la energía remanente (representada por la magnitud de la flecha) es mayor (Anexo # 8), mientras que para la celda W_{45} la pendiente es menor, por lo tanto, el costo de energía es mayor y la energía remanente es menor (Castañeda, 2022). De modo que, este algoritmo distribuye la energía a partir de las pendientes, es decir de las diferencias de alturas. En cuanto al exponente en la ecuación, este controla la convergencia del flujo, por consiguiente, cuanto mayor es el exponente más convergente se vuelve el flujo (Horton et al., 2013).

Luego, se modificó el algoritmo y es llamado Holmgren modificado, en la cual, se introdujo el factor dh . Este factor permite reconocer las diferencias de alturas. En zonas con altas pendientes, fácilmente se pueden tener estas diferencias de alturas, pero para el modelo era difícil reconocer que era una condición natural de la topografía y una particularidad del tamaño del pixel, por consiguiente, lo que hacía el modelo era un salto y empezaba a perder energía (Castañeda, 2022) Otro error que el autor evidenciaba, era que si la celda vecina tenía mayor pendiente que la celda

frente al material no podía pasar. Entonces, con el factor dh reconoce cuanto es el umbral permitido para que el movimiento en masa sobrepase el obstáculo. Por consiguiente, a medida que dh aumenta crecen las áreas de afectación (Castañeda, 2022; Blahut et al., 2010).

4.5.3 Algoritmo Inercial:

A las direcciones del flujo se les incluye una ponderación para tener en cuenta la persistencia del flujo que representa su inercia (Horton et al., 2011). Los valores dados por el algoritmo de dirección del flujo y la ponderación mencionada anteriormente se combinan generando la siguiente ecuación:

$$p_i = \frac{p_i^{fd} p_i^p}{\sum_{j=1}^8 p_j^{fd} p_j^p} p_0$$

Donde i, j son la dirección del flujo, p_i es el valor de susceptibilidad en la dirección i , p_i^{fd} es la porción del flujo según la persistencia y p_0 es el valor de la susceptibilidad de la celda central (Horton et al., 2013). La función de esta ecuación es hacer una afectación a la energía que pasa de una celda a otra. El costo de energía aumenta o disminuye cuando pasa de una celda a otra, dependiendo de la dirección del desplazamiento (Horton et al., 2013).

Esta ecuación está controlada por los siguientes modelos: Proporcional, Coseno y Gamma (2000) como se evidencia en la siguiente tabla:

Tabla 2. Modelos de los algoritmos inerciales

	w_0	w_{45}	w_{90}	w_{135}	w_{180}
Proporcional	1	0.8	0.4	0	0
Cosines	1	0.707	0	0	0
Gamma (2000)	1.5	1	1	1	0

El modelo proporcional consiste en dejar pasar alrededor del 100% del volumen de energía de la celda central (W_0) a las celdas vecinas, al llegar a la celda W_{45} el volumen que pasa es alrededor de 80% hasta llegar a W_{135} donde el modelo reconoce que no puede pasar.

4.5.4 Cálculo de la distancia de salida

Estos algoritmos son cálculos basados en energía, que definen si una parte del flujo puede potencialmente llegar a la siguiente celda. De esta manera se controla la distancia que alcanza el flujo y, puede reducir el esparcimiento lateral (Horton et al., 2013).

La pérdida de energía se expresa mediante 4 algoritmos: Perla et al., 1980, Perla et al., 1980 no corregido, Angulo de viaje y Angulo de viaje variable.

4.5.4.1 Angulo de viaje:

El ángulo de viaje es el modelo Corominas (1996) y consiste en calcular la distancia máxima de viaje del deslizamiento a partir del volumen del deslizamiento. Corominas (1996) retomo el trabajo realizado por (Finlay et al., 1999). Ellos inicialmente lo que hicieron fue graficar el volumen del material desplazado de cada uno de los movimientos en masa que habían estudiado contra una variable que llaman F, esta variable es la tangente del ángulo que forma la horizontal con respecto a la recta que conecta el punto más alto del deslizamiento con el punto más alejado, ese ángulo es llamado ángulo de viaje o fricción equivalente (Anexo #9) (Corominas, 1996), y se expresa mediante la siguiente ecuación (Finlay et al., 1999):

$$\Theta_a = \text{Tan}^{-1}(F) = \text{Tan}^{-1}(H/L)$$

Θ_a : Angulo de fricción equivalente

H: Altura del deslizamiento

L: Distancia de viaje

Corominas retomo el trabajo anterior añadiendo más datos de deslizamientos y evidencio que había cierta tendencia, y estableció una recta media (Anexo # 10). Una vez que se identifica el volumen del deslizamiento se plotea en el diagrama del anexo # 10 cortando en la recta media y se obtiene la variable F. Luego se proyecta el resultado definiendo el punto más alejado del deslizamiento (Finlay et al., 1999).

4.5.4.2 Limitación de energía:

Este parámetro está relacionado con la velocidad del deslizamiento, y se refiere a la magnitud que relaciona la distancia de viaje con el tiempo que tarda en llevarse a cabo el deslizamiento. En otras palabras, hasta que se detenga el movimiento de la masa deslizada. De este parámetro depende el poder destructivo de los deslizamientos influyendo su intensidad (Horton et al., 2013).

Dentro del modelo Flow R esta variable se calcula por medio de la siguiente ecuación, donde la velocidad del flujo va a ser el mínimo entre, la velocidad que el modelo calcula y la velocidad máxima que el usuario introduce (Horton et al., 2013).

Esta velocidad máxima garantiza que no se excedan las velocidades realistas, es decir, que una vez que el usuario selecciona un valor, el modelo no puede trabajar con una velocidad mayor a la que se le está colocando, aunque calcule en cualquier momento una mayor velocidad (Castañeda, 2022)

$$V_i = \min \left\{ \sqrt{V_0^2 + 2g\Delta h - 2g\Delta x \tan \varphi}, V_{\max} \right\}$$

V₀: Velocidad al comienzo del segmento.

Δh: Diferencia de elevación entre la celda centra y la celda en la dirección i.

g: Gravedad

V_{max}: Límite de velocidad dado.

La velocidad de los movimientos puede ser uno de los mejores parámetros para describir el potencial de daño de un deslizamiento, sin embargo, es un parámetro muy difícil de predecir (Horton et al., 2013).

4.6 Modelo T

Según Varnes (1984) un elemento fundamental para la estimación del riesgo es la vulnerabilidad para los elementos que se encuentran expuestos a deslizamientos; para la evaluación de la vulnerabilidad se necesita un entendimiento de la interacción entre el peligro y los elementos de riesgo.

El concepto de vulnerabilidad según el glosario de términos de evaluación de riesgo de la Sociedad Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE) se refiere al grado de pérdidas de un elemento o conjunto de elementos dentro de un área afectada, por la amenaza del deslizamiento sufriendo daño durante la interacción con una fuerza externa.

Un concepto moderno de vulnerabilidad, considera no solo la intensidad de la amenaza sino también, la resistencia estructural de las infraestructuras expuestas en la zona afectada, siendo lo

anterior vulnerabilidad física (Guimarães, 2015). Esta vulnerabilidad se expresa en una escala de 0 (sin pérdidas o daño) a 1 (perdida o daño total).

Li et al., (2010) expresa que para poder evaluar la vulnerabilidad se necesita de la interacción entre la intensidad del deslizamiento y los elementos que serán afectados por la amenaza.

La intensidad puede expresarse en cualquiera de las siguientes variables: energía, volumen, velocidad de deslizamientos de la masa y la profundidad de los detritos movilizados (Martínez et al., 2018), como se evidencia en la siguiente ecuación:

$$I = I_{dyn} * I_{dpt}$$

Donde I_{dyn} es el factor de intensidad dinámica teniendo como principal variable la velocidad del deslizamiento; y I_{dpt} es el factor de profundidad de los escombros en metros.

$$I_{dpt} = 0.1 * D_{dpt}$$

Como se evidencia, para calcular la vulnerabilidad de estructuras por medio del modelo Li, se necesita de las variables D_{dpt} que corresponde al volumen de los escombros (en metros) y la velocidad de llegada del deslizamiento; calcular algunos de estos parámetros no es fácil; ya que se debe de tener avanzadas herramientas de simulación de eventos de deslizamiento para hacer la predicción (Martínez et al., 2018).

Por lo anterior, se desarrolló una metodología para calcular la vulnerabilidad de las estructuras con parámetros de fácil manejo que son aplicados a una ecuación matemática que simula el comportamiento de los deslizamientos con su intensidad real (Guimarães, 2015).

Guimarães (2015) introduce una nueva variable matemática llamada variable T. Esta variable considera no solo la intensidad del deslizamiento, sino que también, tiene en cuenta la resistencia estructural de los edificios. Para el estudio de la vulnerabilidad física por medio del modelo T, la intensidad será medida por medio del gradiente modificado Z, y la resistencia de los elementos expuestos a deslizamiento de tierra R (Guimarães, 2015). Expresado en la siguiente ecuación:

$$Z = H/d$$

La variable H es la altura entre la cota máxima del deslizamiento y la cota de la estructura expuesta y d la distancia a lo largo del terreno desde el punto del desprendimiento del material hasta un pixel con un valor de cota mínimo determinada (Anexo # 11) (Guimarães, 2015).

Ahora bien, como el modelo T relaciona el gradiente modificado y la resistencia de las estructuras, se obtiene de la siguiente forma (Guimarães, 2015):

$$T = Z/R$$

Donde R es la resistencia de las estructuras y Z representa la intensidad del proceso del deslizamiento. Esta última variable relaciona la energía potencial y cinética (Guimarães, 2015).

Este modelo se ha evaluado y calibrado a partir de muchos datos observados en campo en el municipio de Nova Friburgo, Brasil y también en trabajos realizados en la ciudad de Medellín.

Para el presente trabajo este modelo ha sido ajustado para analizar la distancia y la trayectoria del movimiento en masa del km 57 en el sector de la Sinifaná, de acuerdo a los puntos críticos identificados.

Procesamiento del gradiente modificado (Z) en ArcGis

El siguiente modelo se obtiene mediante las herramientas del software ArcGis. Inicialmente se necesitan los dos parámetros de entrada que son el DEM de la zona de estudio (ráster) y los puntos de entradas. Para el cálculo de la distancia D, se utilizó la herramienta Path Distance, esta tiene como función el análisis de distancia, determinando el costo del movimiento de un punto inicial a otro con base en las pendientes (Guimarães, 2015). Por otra parte, se extraen y se obtienen los valores de los puntos de entrada del DEM, utilizando la calculadora ráster, se realizó la resta entre los valores de los puntos y el modelo de elevación digital, obteniéndose así las diferencias de elevación H. Seguido de esto, por medio de una división entre las variables d y H se adquiere el gradiente modificado Z en formato ráster. Una vez realizado este proceso se obtiene como resultado la generación de un mapa con diferentes valores de isocontornos (Anexo # 12).

5 Metodología

Se explicará detalladamente los procesos que se llevaron a cabo durante el desarrollo del proyecto (Figura 2).

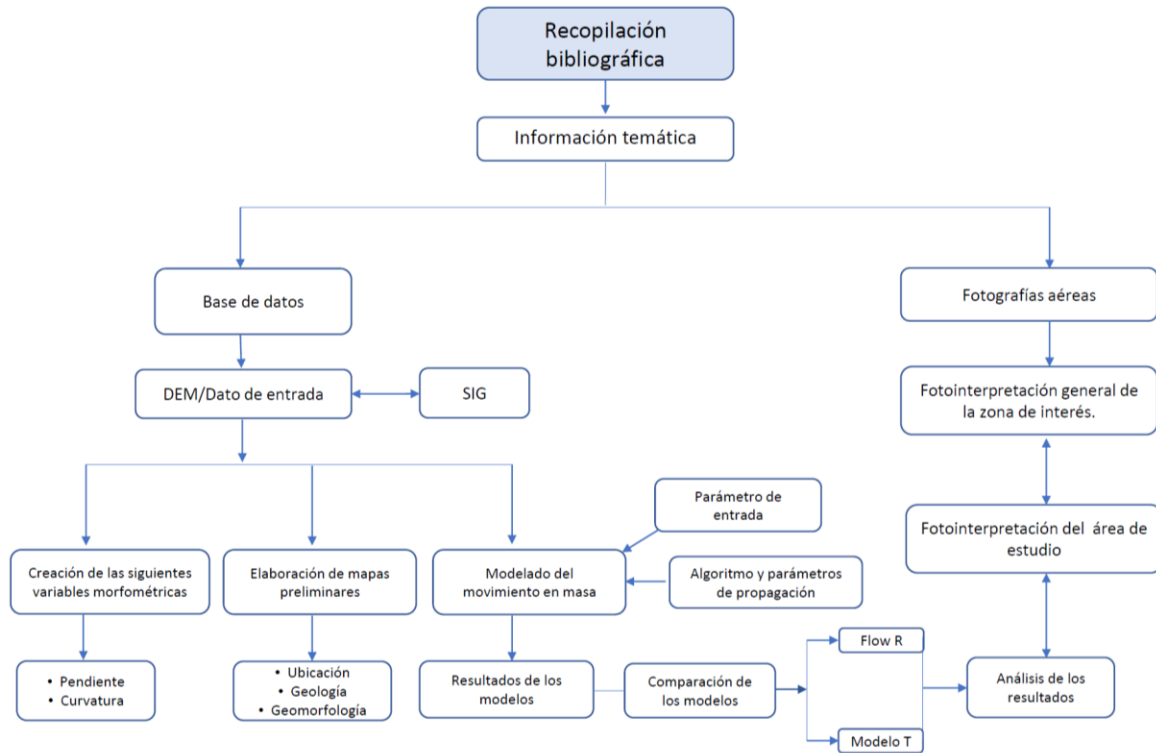


Figura 2. Diagrama metodológico.

5.1 Recopilación y revisión de información secundaria

La primera etapa consiste en la recopilación y revisión de la información bibliográfica, geológica y geomorfológica para el área de estudio. Se consultó informes técnicos por entidades del orden local y regional, como el plan de desarrollo municipal del municipio de Titiribí (PDM), Esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio, plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, del municipio de Titiribí elaborado por el CIA (Centro de información ambiental de Corantioquia), informes de las memorias explicativas de la zona (146 -III-D y 166 I-B) de la plataforma del Servicio Geológico Colombiano y documentos elaborado por Corantioquia de las cuales, se extrajo información relacionada con estudios geológicos, geomorfológicos, usos de suelo y climatología.

Adicionalmente, se realizó una búsqueda detallada de cada uno de los modelos empleados en este proyecto, con el fin de entender cada uno de sus parámetros y seleccionar de forma adecuada cada valor de las variables de entrada. Los documentos bases del presente trabajo son (Horton et al., 2013 y Martínez et al., 2018) y se obtuvieron de forma gratuita.

En cuanto al DEM (modelo de elevación digital) utilizado en este proyecto, fue realizado con las curvas de nivel con una resolución de 10 m por pixel. Por medio del DEM se elaboró el mapa de pendientes y el de curvaturas. Además de esto, es el parámetro principal de entrada en los dos modelos a utilizar.

5.2 Procesamiento de datos

La información presente en las bases de datos cartográficas del municipio de Titiribí a escala 1:100.000 brindadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) fueron los insumos principales para crear los mapas correspondientes a la ubicación del área de estudio, la geología y la geomorfología. Toda esta información fue procesadas y almacenadas en el software ArcGis 10.5.

5.3 Variables Morfométricas

Son insumos importantes para analizar el área de estudio, tienen que ver con aspectos cuantitativos como la pendiente y la curvatura. Estas variables se obtienen a partir del modelo de elevación digital (DEM).

5.3.1 Pendiente

Este parámetro representa la inclinación entre la superficie del terreno y la horizontal, los valores de la pendiente se expresan en términos de grados o porcentaje. Para la generación del mapa (Anexo # 13) se reclasifico el ráster de acuerdo a los estándares del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en el cual se establecieron siete (7) categorías de clasificación de las pendientes ver tabla 2.

Tabla 3. Reclasificación de la pendiente del área de estudio.

Pendiente (%)	Clasificación	Descripción
0 - 3	1	Plano
3-10	2	Suave
10-25	3	Moderado
25 - 40	4	Fuerte
40 - 60	5	Muy fuerte
60 - 100	6	Abrupta
> 100	7	Escarpada

Como ya se mencionó, la zona de estudio se encuentra sobre la gran unidad Cañón del río Cauca, particularmente en la unidad geomorfológica vertientes largas con fuerte inclinación.

Por lo anterior, domina en esta zona los rangos correspondientes a superficies con inclinaciones muy fuertes a abruptas con rangos de 40 a 100%; gráficamente estos resultados se evidencian en el anexo # 13. Esto se relaciona con los movimientos en masa de manera que, a mayor grado de pendiente, aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013)

Por otra parte, la litología juega también un papel fundamental en el modelado de la pendiente, ya que, las rocas con alta resistencia a procesos destructivos presentan morfologías muy inclinadas, a pesar de considerarse lo anterior, posiblemente la roca del área de estudio ha sido afectada intensamente por procesos químicos y dinámicos, provocando inestabilidad en el terreno generando la ocurrencia del movimiento en masa (SGC, 2013).

5.3.2 Curvatura

Variable asociada a la tasa de cambio en la convexidad o concavidad de la superficie. Matemáticamente está relacionada a las derivadas de segundo grado de la altitud, en la cual, los resultados se interpretan en valores negativos o positivos de la superficie calculado, lo que se interpreta en tendencias hacia la concavidad o convexidad de la superficie (Londoño, 2006).

Se usó la curvatura de perfil, la cual es paralela a la pendiente máxima, afectando la aceleración y desaceleración del flujo de drenaje, por ende, esta variable se relaciona con los movimientos en masa ya que afecta la escorrentía, la velocidad del flujo y la capacidad de infiltración (IDEAM, 2013).

Para obtener esta variable se reclasifico el ráster de acuerdo a la cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en el cual se establecieron cinco (5) categorías de clasificación como se evidencia en la tabla 3.

Tabla 4. Reclasificación de la pendiente del área de estudio.

Rangos	Clasificación	Descripción
>-5	1	Muy convexo
-4,999	2	Convexo
-0,001 - 0,001	3	Plano
0,001 - 5	4	Cóncavo
>5	5	Muy Cóncavo

El mapa obtenido (Anexo # 14) expresa la variación entre valores negativos y positivos. Un valor negativo indica que la superficie es convexa mientras que un valor positivo especifica que la superficie es cóncava y los valores cercanos a cero indican pendiente plana.

Se evidencia que en el área de estudio predominan las pendientes muy convexas y planas. Las pendientes muy convexas tienden a acelerar el flujo del drenaje provocando procesos de erosión más rápidos por lo que genera mayor cantidad de sedimentos, siendo esto un posible factor desencadenante en la generación del movimiento en masa.

5.4 Fotointerpretación

Para la fotointerpretación se han utilizado dos (2) fotografías aéreas (075 y 099) a escala 1:100.000 pertenecientes a la faja 06 y 08 del municipio de Titiribí del año 2006, dando una visión general del área (figura 3). Esta metodología implica la identificación geológica y geomorfológica de la zona de estudio, describiendo las características del terreno como textura, patrón de drenaje, cobertura vegetal, tipo de pendiente, litología de las rocas, estructuras geológicas y actividades antrópicas. Siendo toda esta información de interés, para estudiar las condiciones del área, antes de ocurrir el movimiento en masa.



figura 3. fotografías aéreas del área de estudio. fuente: gobernación de Medellín, 2006.

Durante esta etapa se realizó una fotointerpretación con un estereoscopio de espejos e imágenes impresas donde se obtuvieron las siguientes observaciones:

El área de estudio en general presenta zonas con tonos de grises oscuros que poseen una textura ligeramente moteada producto de la abundante vegetación en el área y zonas con tonalidad gris clara con textura suavemente rugosa a lisa correspondiente a suelos desnudos o con ligera presencia de vegetación. En cuanto a la red de drenaje se observa un patrón predominante denominado subparalelo, que se caracteriza por ser homogéneo con textura media (figura 4). Con respecto al relieve se observaron pendientes moderadas a altas que van de 60-100% lo que se puede evidenciar en el mapa de pendientes realizado para la zona (Anexo # 13).

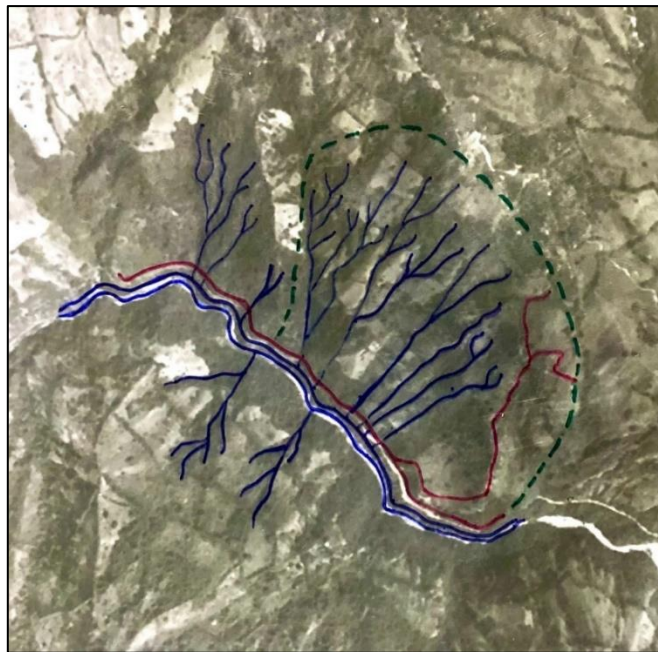


Figura 4. Fotointerpretación del área de influencia del deslizamiento, sector Sinifaná. Esta imagen refleja los principales componentes descritos en una fotointerpretación, identificadas de la siguiente manera: Azul, drenajes. Rojo, Vías. Verde, Área de influencia del deslizamiento. Fuente: Gobernación de Antioquía, 2006. Escala 1:100.000

Con base a la interpretación de imágenes satelitales de Google earth se realizó la delimitación y caracterización del deslizamiento ocurrido el 19 de mayo del 2019 que involucro un volumen de aproximadamente 300.000 metros cúbicos.

El deslizamiento sucedido sobre el corte del talud a orillas de la quebrada Sinifaná, corresponde a deslizamiento de tipo traslacional, con pendientes de muy fuertes a abruptas. El movimiento presenta una corona y un escarpe principal bien desarrollado con erosión en forma de surcos, indicando presencia de agua de escorrentía e incompetencia litológica (Figura 5). Se evidencia en

la parte central suelo no consolidado con mezcla de vegetación obstaculizando el cauce de la quebrada. Si bien, es importante establecer los posibles factores que desencadenaron el deslizamiento identificado en el área de estudio, para así, determinar la susceptibilidad de ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa. Según Corantioquia, 2007 el clima de la zona posee un régimen lluvioso para el mes de mayo, mes en que ocurrió el deslizamiento, aumentando los drenajes superficiales no tratados identificados sobre la zona, a esto se suma que el área posee de alta a mediana permeabilidad evidenciado en el patrón de drenaje identificado fotogeológicamente y que el área presenta poca cobertura vegetal, debido a que predominan suelos desnudos y herbazales, esto en conjunto pudo haber provocado que el suelo se sobre saturara y se desestabilizara.

Otro factor que está asociado son las pendientes que predominan en el área, debido a que estas son pronunciadas y abruptas como se mencionó anteriormente (60-100%), esta inclinación está condicionada por la litología (formación Quebradagrande) o por la intervención de actividades antrópicas, debido a que la vía que conecta Amaga con Bolombolo corta el talud en sentido Noreste.

Estas intervenciones antrópicas como las vías que fueron construidas para usos en las fincas aledañas y otras construidas por la empresa Pacifico 1 posiblemente no fueron hechas con especificaciones técnicas generando sobrecargas a la ladera, con deficiente manejo de drenajes, y además de esto las vibraciones de los equipos, y el uso de explosivos son también factores que provocaron el movimiento en masa.

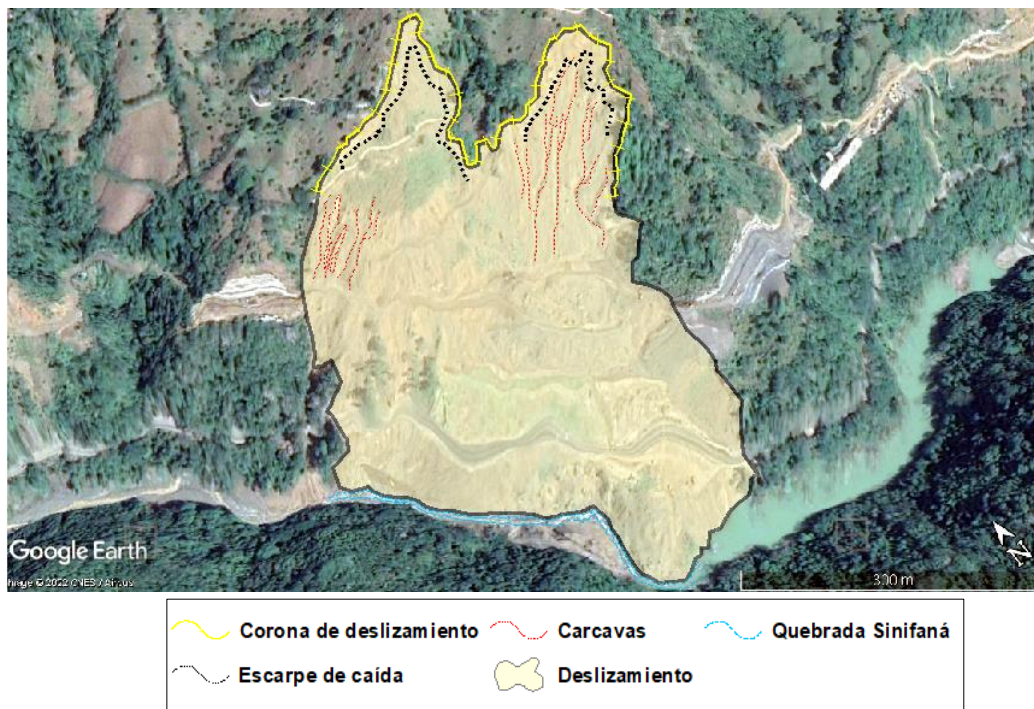


Figura 5. Interpretación de fotografía aérea tomada de Google Earth. Se observa la dinámica del deslizamiento de grandes dimensiones estrechando el cauce. Se diferencian cárcavas dentro de la masa deslizada.

5.5 Modelamiento de datos

Los modelos implementados en este proyecto están diseñados para la evaluación de la trayectoria de los movimientos a escala regional y se ha aplicado con éxitos en diferentes estudios de caso en varios países. Los modelos que se utilizaron son Flow-R y Modelo T (Horton et al., 2013).

Para la ejecución de estos modelos el insumo principal es el DEM. El modelo de elevación digital es procesado en ArcGis, y luego exportado en formato ASCII para el modelo Flow R, mientras que para el modelo T en formato ráster.

6. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

6.1 Flow R

Se realizó un análisis de sensibilidad para explorar los cambios en el algoritmo de dirección de flujo al utilizar diferentes valores en el exponente y el dh. El modelo cuenta con varias opciones en la selección de los algoritmos de dirección de flujo, pero Horton et al. (2013) recomienda el

algoritmo de Holmgren modificado ya que agrega un parámetro que permite controlar la divergencia y es el exponente x . Los demás algoritmos requieren de parámetros difíciles de definir. Además, se utilizaron el método proporcional, el método del coseno y el Gamma (2000) para las ponderaciones de la dirección. En cuanto a la función por pérdida de fricción se utilizó el ángulo de viaje de 13° , caracterizado por calcular la máxima distancia de propagación y una velocidad máxima estimada de 14 m/seg. La tabla 5 resume toda la información utilizada para cada caso.

Tabla 5. Información de la parametrización para cada caso

Caso No.	Algoritmo de dirección de flujo	Valor	Algoritmo inercial	Función de pérdida por fricción	Valor	Limitación de energía
1	Holmgren	$x = 10$ $dh = 0.8$	Proporcional	Ángulo de viaje	13°	14 m/s
2	Holmgren	$x = 25$ $dh = 10$			13°	14 m/s
3	Holmgren	$x = 0.1$ $dh = 0.5$			13°	14 m/s
1	Holmgren	$x = 0.5$ $dh = 10$	Cosenos	Ángulo de viaje	13°	14 m/s
2	Holmgren	$x = 20$ $dh = 15$			13°	14 m/s
3	Holmgren	$x = 0.2$ $dh = 0.5$			13°	14 m/s
1	Holmgren	$x = 0.2$ $dh = 0.5$	Gamma (2000)	Ángulo de viaje	13°	14 m/s
2	Holmgren	$x = 15$ $dh = 25$			13°	14 m/s
3	Holmgren	$x = 0.1$ $dh = 30$			13°	14 m/s

La figura 6 presenta los resultados del estudio según los parámetros de la tabla 4, donde los colores rojos y naranjas corresponden a una alta probabilidad de propagación y el color amarillo una probabilidad baja. Este último representa áreas con una energía mínima de propagación del movimiento en masa. Se observa que los modelos o casos N.º 2 con exponentes de 25, 20 y 15 presentan una alta probabilidad de propagación.

La tabla 6 muestra los resultados de la coincidencia para cada caso, donde las coincidencias (+) corresponde al área de probabilidad de propagación que se encuentra dentro del polígono del movimiento en masa (polígono negro) y coincidencias (-) representa el área de probabilidad de propagación que hay por fuera del polígono del movimiento en masa.

Se observa, que los modelos con valores de exponentes bajos como 0,1 y 0,2 arrojan una sobreestimación de la probabilidad de propagación, por ende presentan valores altos de coincidencia (-), ya que presentan mayor área por fuera del polígono del movimiento en masa, como lo son los casos N° 3 con valores de coincidencia (-) de (16,76 ha), (12,77 ha) y (15,78 ha) (tabla 6), mientras que los casos N° 1 con valores promedios de exponentes entre 0,5 a 10 las áreas de probabilidad de propagación se ajustan más al movimiento en masa (polígono negro) con valores de coincidencia (-) bajos de (4,09 ha) (5,26 ha) y (5,75 ha).

Tabla 6. Valores de coincidencia para cada caso analizado

Coincidencia				
Caso N°	Algoritmo inercial	Area Total de propagación (ha)	Coincidencia (+)	Coincidencia (-)
1	Proporcional	22,14 ha	18,05 ha	4.09 ha
2		23,24 ha	18,44 ha	4.80 ha
3		36,06 ha	19,30 ha	16,76 ha
1	Coseno	24,16 ha	18,90 ha	5,26 ha
2		31,60 ha	18,83 ha	12,77 ha
3		33,64 ha	19,29 ha	14,35 ha
1	Gamma	24,33 ha	18,58 ha	5,75 ha
2		30,91 ha	18,65 ha	12,26 ha
3		34,89 ha	19,11 ha	15,78 ha

Se observa que el valor de coincidencia (-) más alto se obtuvo cuando se aplicó valor de exponente de 0,1 y el método proporcional es decir el modelo o caso N°3.

En cuanto a los valores de coincidencia (+) los casos N° 1 son los que arrojaron mejores resultados, aunque los valores son los más bajos, es bastante razonable porque, al presentar más área total de propagación aumentara también los valores de coincidencia (-) por lo tanto no coincide con las condiciones reales, como son los casos N° 3.

El modelo de mejor ajuste al movimiento en masa trabajado en el presente informe es el caso N°1 con exponente de 10 y dh de 0.8. Este modelo presenta el valor más bajo de coincidencia (-) de 4.09 ha es decir, tiene un área muy baja de propagación por fuera del polígono del movimiento en masa (Figura 6).

Variación del algoritmo de la dirección del flujo

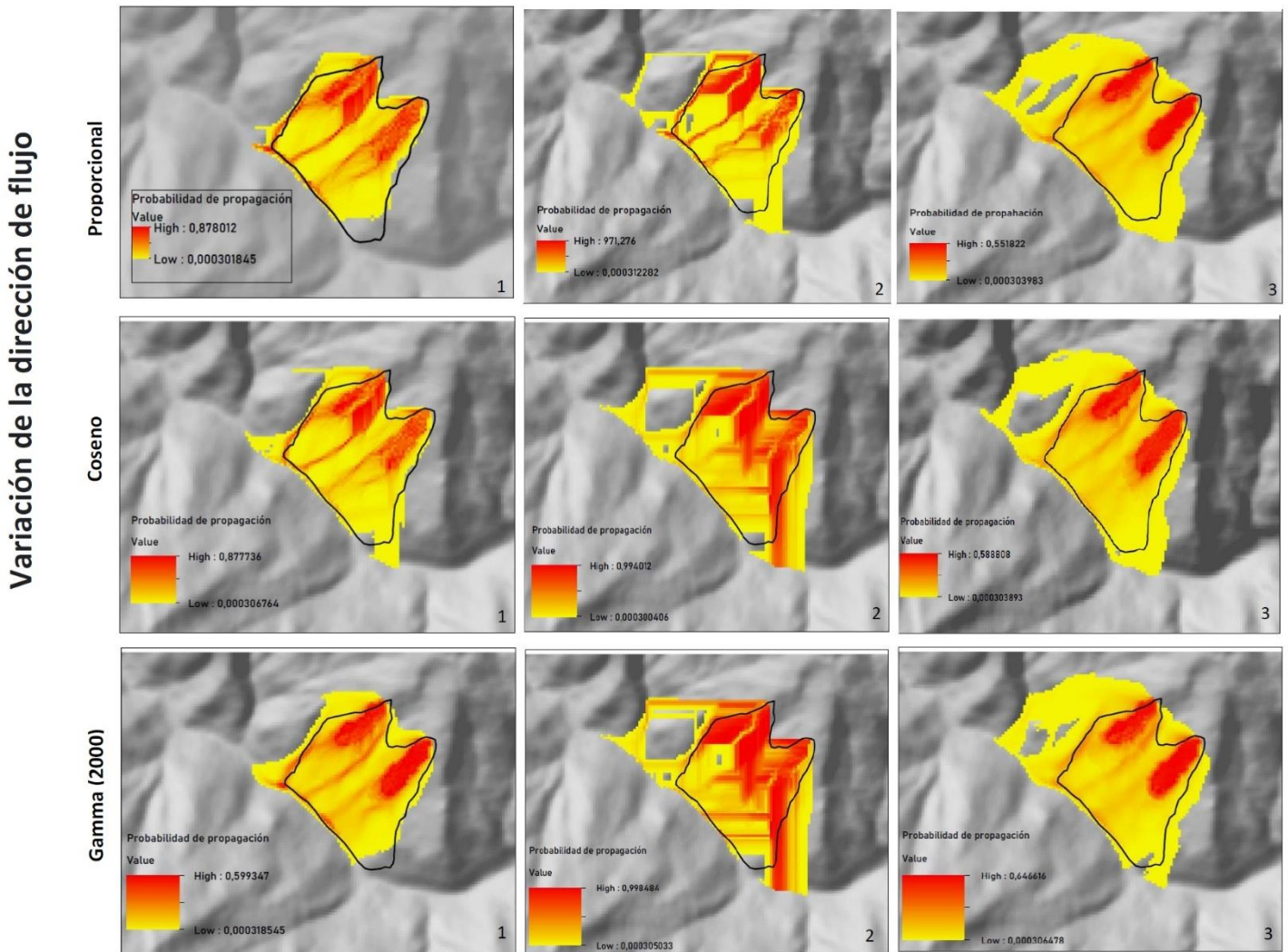


Figura 6. Resultados del análisis de propagación del flujo de escombros del movimiento en masa vía Bolombolo-Amagá sector Sinifaná.

6.2 Modelo T

La figura 7 muestra el polígono del deslizamiento del área de estudio y los isocontornos del gradiente modificado (Z), que se interpreta como una medida de la evolución espacial de la intensidad del movimiento.

En el mapa se evidencia un rango de valores del gradiente modificado, en donde se aprecia que, a mayor distancia del punto de partida del movimiento, el valor del gradiente modificado es menor, es decir el evento tiene una intensidad baja.

Además, en el mapa se observa una serie de isocontornos con diferentes valores, donde demuestra la probabilidad de la trayectoria del movimiento. Se observa que el isocontornos con valor de 0,5 delimita o abarca alrededor del 80% de probabilidad de la trayectoria del movimiento en masa trabajado en el proyecto, por ende, fue el valor seleccionado como resultado del modelo.

Si bien, es importante aclarar que este modelo no arroja como tal la trayectoria del movimiento si no que, presenta un área en la cual una masa deslizante podría realizar su recorrido.

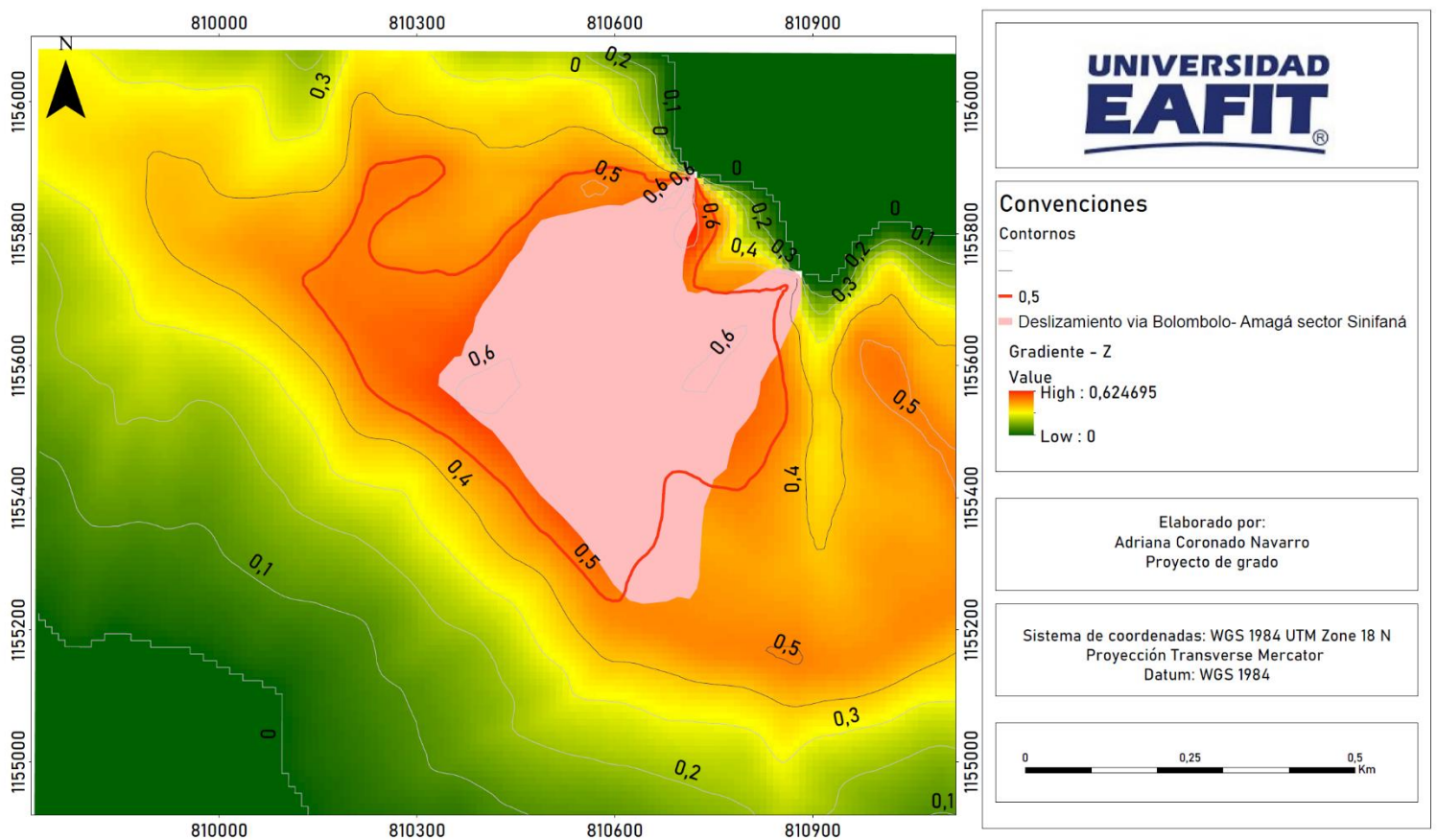


Figura 7. Mapa de isocontornos del gradiente modificado del movimiento en masa vía Bolombolo-Amagá sector Sinifaná

7. Discusión

El modelo de propagación Flow-R, dio como resultado un mapa de susceptibilidad de flujo de escombros que representa la propagación del movimiento en masa basada en la probabilidad, a partir del DEM. Al comparar los resultados con el modelo T se evidencia que el modelo Flow-R arroja mejores resultados ya que predice las fuentes potenciales del movimiento en masa, una posible trayectoria del movimiento con valores de probabilidad entre 0 a 1, mientras que el modelo T solo arroja un área o una mancha indicando que dentro de esta se puede generar el movimiento en masa y unos rangos de valores indicando la intensidad del movimiento en masa. El modelo Flow-R también predice la distancia máxima de propagación, es decir, hasta dónde puede llegar el movimiento en masa y esto se obtiene por medio del ángulo de viaje, lo cual demuestra que el ángulo utilizado en el presente proyecto de 13° es un buen parámetro de entrada, y coincide con varios casos donde el ángulo de recorrido tenía un rango de 5 a 15° , cabe resaltar que un ángulo bajo implica una extensión más amplia (Horton et al., 2013).

Por lo mencionado anteriormente, Flow-R fue el modelo que mejor se ajustó al movimiento en masa trabajado en el presente informe, arrojando resultados realistas con el caso N° 1 con un exponente de 10, dh de 0.8 y con un algoritmo inercial proporcional. Este modelo presenta el valor más bajo de coincidencia (-) de 4.09 ha es decir que tiene un área muy baja de propagación por fuera del polígono del movimiento en masa, y esto es debido a que, al aumentar el exponente el flujo converge rápidamente en trayectorias únicas.

Se observa que el valor de coincidencia (-) más alto se obtuvo cuando se aplicó valor de exponente de 0,1 y el método proporcional es decir el modelo o caso N°3. esto se debe a que el método proporcional en teoría no cobra costo de energía adicional, es decir, deja pasar alrededor del 100% del material de la celda central a las celdas vecinas, por ende, hay mayor área de probabilidad de propagación por fuera del polígono del movimiento en masa.

8. Conclusiones

- El modelo Flow-R puede contribuir significativamente en la realización de mapeos de zonificación de amenaza, debido a que arroja valores confiables con respecto a la

propagación de los movimientos en masa, usándolos como base para la modificación o actualización de los mapas existentes, lo que ayudaría a que los resultados de zonificación sean más exactos. Generando confiabilidad en el diseño de los planes de ordenamiento territorial.

- La calibración de estos modelos se debe de hacer bajo el juego del ensayo y error para obtener un resultado aproximado de lo ocurrido en el sitio de estudio y bajo las condiciones o características de cada uno de los movimientos.
- Todos los modelos arrojan resultados aproximados, no hay modelo que se ajuste en un 100% a las condiciones reales del área.
- El modelo T a pesar de que se desarrolló para el estudio de vulnerabilidad física, se puede adaptar a otros casos de estudios.
- No existen valores de referencia para los parámetros de los modelos porque algunos parámetros como (X , dh) cuantifican la calidad del DEM, pero también cuantifica todas las demás cosas que no se puede cuantificar dentro de modelo por ejemplo la reología, la topografía, el uso de suelo, la humedad etc, ya que todo debe ser condicionado a la zona de sitio.
- Los mapas generados por estos modelos permiten obtener información fiable sobre las condiciones de estabilidad de amplias regiones, lo que resulta de gran utilidad tanto en la fase de planificación de grandes obras públicas como en su fase de ejecución, a la hora de adoptar las oportunas medidas de prevención y corrección.

9. Bibliografía

- Banco Mundial., 2012. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas 1. Bogotá, Colombia.
- Bonham, G. F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*, first ed. Pergamon, Canada.
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., Jaboyedoff, M., 2010. Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di Tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 2379 – 2390. <https://doi:10.5194/nhess-10-2379-2010>.
- Chen, H., Lee, F. C., 2002. Runout Analysis of Slurry Flows with Bingham Model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128, 1032-1042. [https://doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:12\(1032\)](https://doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:12(1032)).
- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Can. Geotech. J* 33, 260–271. <https://doi:10.1139/t96-130>, 1996.
- Corantioquia. (2007). Plan de ordenamiento y manejo cuenca de la quebrada Sinifaná. Municipios de Caldas, Amagá, Fredonia, Venecia y Titiribí. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2015). Portal web DNP. Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre2006-y-2014-.aspx>
- EMRE. (2016). Consejo Municipal de Titiribí, Antioquia. Estrategia municipal de respuesta en emergencias.
- EOT. (1999). Alcaldía Municipal de Titiribí, Antioquia. Esquema de Ordenamiento Territorial.
- Finlay, P., Mostyn, G., Fell, R., 1999. Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *Can. Geotech. J* 36, 556–562.
- González, H., 2001. Memoria explicativa Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Ingeominas. Medellín.
- Guimaraes-Silva, M. T. (2015). Avaliação Quantitativa Da Vulnerabilidade de Edificações Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas. Tesis de Doctorado, Universidad de Brasilia.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Zimmermann, M., Mazotti, B., Longchamp, C., 2011. Flow-R, a model for debris flow susceptibility mapping at a regional scale – some case studies, 5th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Padua, Italy. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment* 875–884. <https://doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-095>.

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 869–885. <https://doi:10.5194>.

Horton, P., Jaboyedoff, M., 2008. Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. *Gedrisque IV geohazards*.

ISSMGE, TC32. 2004. Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms-Version 1.

IDEAM. (2013). Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1: 100.000. *Bogotá*. 88 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (octubre de 2004). Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia. Bogotá: IGAC. Subdirección de Geografía y Cartografía, División de Geodesia.

Iverson, R. M. and Denlinger, R. P.: Mechanics of debris flows and debris-laden flash floods, Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada, USA, 2001.

J. P. Castañeda, comunicacion personal, 01 de diciembre de 2021.

J.P. Castañeda, comunicacion personal, 22 de febrero de 2022.

Jaboyedoff, M., Labiouse, V., 2011. Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 819-828, 2011. <https://doi:10.5194/nhess-11-819-2011>

Keaton, J.K., Wartman, J., Anderson, S., Benoit, J., deLaChapelle, J., Gilbert, R. and Montgomery, D.R., 2014. Oso Landslide, Snohomish County, Washington. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association* 36.

Londoño, J. P. (2006). Evaluación holística de riesgo frente a deslizamientos en Áreas Urbanas. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.

Martinez, C. H., Guimarães Silva, M. T., Garcia, E. F., Aristizabal, E, F., Larios, M. A., 2018. A mathematical approach for assessing landslide vulnerability. *Earth Sciences Research Journal* 22, 251-273. <https://doi.org/10.15446/esrj.v22n4.68553>.

PDM. (2020). Alcaldía Municipal de Titiribí, Antioquia. Plan de desarrollo municipal 2020-2023.

PSMV. (2008). Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, municipio de Titiribí, Antioquia. *Acueductos y Alcantarillados Sostenibles S.A.* 12 p.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2013. Guía metodológica para la zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa Escala. 1:25.000. Bogotá D.C.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). 2016. Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C.

Varnes, D. J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards and Earth System Science* 3:1–63.

Varnes D. J., 1978. Slope movement types and processes. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.

Zhihong, Li., Nadim, f., Huang, H., Uzielli, H., Lacasse, S., 2010. Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. *Landslides* 7, 125–34. [https://DOI 10.1007/s10346-009-0190-3](https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3).