

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Trabajo de investigación para el análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000

Karen Lisbeth Castillo Vásquez

Ana María Quintero Peña

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Joaquín Andrés Valencia Ortiz  
Geólogo, MSc en Geología Ambiental

Codirector

Leonardo Palmera Sánchez  
Geólogo, MSc en Geociencias

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Geología  
Bucaramanga  
2023

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mi tía y abuelita por su apoyo, esfuerzo y amor, ustedes son mi principal motor en la vida, ejemplo e inspiración. A mi mamá y hermano, cuyo recuerdo mantengo vivo en el corazón. Le agradezco a Karen por ser la mejor compañera, la más dedicada, paciente y comprensiva que puede existir. A David, cuyo amor y apoyo incondicional fue fundamental para mí en el desarrollo de este proyecto. Gracias a Kath, Carlos, Julián, Juan Camilo y demás personas que me acompañaron y brindaron su amistad durante los últimos años en esta etapa.

Agradezco a Dios por fortalecer e iluminar mi mente, por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. A mi familia, por ser los principales promotores de mis sueños, por su apoyo incondicional, esfuerzo, confianza, amor, dedicación y paciencia. A Anita, mi compañera de tesis, quiero expresar mi gratitud por haber compartido conmigo esta importante etapa de nuestras vidas. Desde el primer semestre hasta la culminación de esta etapa, hemos enfrentado el entendimiento mutuo, las noches de traspasar, el estrés, las risas y los momentos de chismecito. A Gary Fernando, que me acompañó en más de una noche durante este proceso ronroneando al lado del computador, acompañados de buena música.

A mis profesores, Joaquín Valencia y Leonardo Palmera, personas de gran sabiduría que fueron partícipes de este proceso, por su apoyo para realizar este trabajo de grado bajo su dirección. Agradecemos al equipo del Seminario de Investigación de Geoamenazas que fue el inicio de este trabajo y sus contribuciones fueron fundamentales en el desarrollo de nuestra investigación.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	11
1.1. Objetivo General .....	11
1.2. Objetivos específicos .....	11
2. Justificación .....	12
3. Localización .....	14
4. Antecedentes .....	15
5. Marco Geológico .....	20
5.1. Geología .....	21
5.2. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) .....	24
5.3. Geología estructural .....	24
5.4. Geomorfología .....	25
5.4.1. Geoformas de origen estructural .....	25
5.4.2. Geoformas de origen denudacional .....	26
5.4.3. Geoformas de origen fluvial .....	26
5.4.4. Geoformas de origen volcánico .....	26
5.4.5. Geoformas de origen glacial .....	27
6. Marco Teórico .....	27
6.1. Morfodinámica .....	27
6.2. Clasificación de movimientos en masa .....	28
6.3. Inventario de Movimientos en masa .....	29
6.4. Morfometría .....	29
7. Metodología .....	30

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

7.1.	Trabajo Pre-Campo.....	30
7.1.1.	Cartografía preliminar.....	30
7.1.2.	Clasificación del inventario de procesos morfodinámicos .....	31
7.2.	Trabajo de campo.....	31
7.3.	Trabajo Post Campo.....	32
7.4.	Análisis morfométrico .....	32
7.5.	Mapa de UGS.....	33
7.6.	Elaboración documento final .....	33
8.	Resultados .....	35
8.1.	Inventario de procesos morfodinámicos .....	35
8.2.	Análisis morfodinámico.....	37
8.2.1.	Flujo de tierra.....	37
8.2.2.	Deslizamientos.....	39
8.2.3.	Caída de roca.....	43
8.2.4.	Enjambre.....	44
8.2.5.	Análisis morfodinámico para las cuencas.....	45
8.3.	Análisis Multitemporal .....	48
8.4.	Factores Detonantes .....	49
8.4.1.	Detonante Precipitación .....	49
8.4.2.	Detonante sismo.....	50
8.5.	Análisis morfométricos.....	50
9.	Conclusiones .....	61
10.	Recomendaciones .....	63
	Referencias Bibliográficas .....	65

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Geología generalizada de la zona de estudio .....	23
Tabla 2 Métodos de cálculo de parámetros morfométricos .....	34
Tabla 3 Total de puntos y polígonos incorporados en el inventario morfodinámico .....	35
Tabla 4 Registro total de movimientos en masa .....	36
Tabla 5 Cantidad de movimientos en masa según la Unidad Geológica Superficial .....	47
Tabla 6 Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Red de drenaje.....	54
Tabla 7 Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Caracterización del relieve .....	54
Tabla 8 Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Textura y flujo del drenaje - Análisis de movilidad. ....	55

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Mapa de localización de la zona de estudio .....	15
Figura 2 Línea de tiempo antecedentes.....	19
Figura 3 Geología de la Plancha 206 de Herveo, Tolima escala 1:25000 .....	22
Figura 4 Porcentaje de movimientos en masa según el tipo de registro .....	36
Figura 5 Porcentaje de los tipos de movimientos en masa presentes en la zona de estudio .....	37
Figura 6 Flujos de tierra.....	38
Figura 7 Flujos de tierra.....	38
Figura 8 Movimiento en masa compuesto .....	39
Figura 9 Deslizamiento tomado en campo.....	40
Figura 10 Deslizamiento tomado en campo.....	41
Figura 11 Deslizamiento en cuña.....	42
Figura 12 Caída de roca. ....	43
Figura 13 Movimientos en enjambre .....	44
Figura 14 Porcentaje de movimientos en masa presentados en las cuencas del río Perrillo, Gualí y Azufrado .....	46
Figura 15 Distribución de los movimientos en masa según la UGS.....	46
Figura 16 Diagrama con el número de Movimientos en Masa Registrados (1962-2022) .....	49
Figura 17 Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	51
Figura 18 Mapa de curvatura del plano .....	52
Figura 19 Mapa de orientación .....	53
Figura 20 Curvas hipsométricas de las cuencas estudiadas .....	57
Figura 21 Índice de gradiente de longitud de corriente (SL) para cada cuenca hidrográfica .....	58

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **Lista de Anexos**

Ver anexos adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Anexo A. Mapa de Geología.

Anexo B. Descripción Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

Anexo C. Formato Modificado Para Inventario de Movimientos en Masa.

Anexo D. Inventario de procesos morfodinámicos.

Anexo E. Mapa de Inventario de procesos morfodinámicos.

Anexo F. Leyenda Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

Anexo G. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

Anexo H. Mapa de Unidades Hidrográficas (Cuencas).

Anexo I. Mapa de Pendientes.

Anexo J. Mapa de Curvatura.

Anexo K. Mapa de Orientación.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Resumen**

**Título:** Análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000\*

**Autor:** Karen Lisbeth Castillo Vásquez, Ana María Quintero\*\*

**Palabras Clave:** Morfodinámica, Factor detonante, Cuenca hidrográfica, Geomorfología.

Los movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima representan un factor de amenaza importante que puede desencadenar una serie de efectos negativos que van desde daños materiales y afectaciones económicas hasta la pérdida de vidas humanas, por tal motivo, el presente trabajo de investigación buscó realizar un análisis multitemporal de estos movimientos y una caracterización morfométrica de cada cuenca hidrográfica que permitiese identificar los factores contribuyentes y condicionantes mediante parámetros morfométricos como el relieve, forma y textura del drenaje y la movilidad del flujo en la cuenca. Estos parámetros brindan información acerca de las afectaciones realizadas por aspectos como las estructuras geológicas, variación litológica, el potencial de degradación de la cuenca y la resistencia de la roca.

El análisis morfodinámico revela que la topografía, erosión, morfología de las laderas y control estructural del sistema de fallas de Palestina son determinantes para la susceptibilidad a movimientos en masa, a su vez, es posible identificar que el deslizamiento de subtipo traslacional es el tipo de movimiento más recurrente representando un total de 195 eventos registrados y la mayoría de estos, se encuentra actualmente activos, por tal motivo, estos análisis aportan una base para generar conocimiento sobre la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa en la región.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geólogo MSc en Geología Ambiental. Codirector: Leonardo Palmera Sánchez. Geólogo MSc en Geociencias.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Abstract**

**Title:** Multitemporal analysis of mass movements and morphometric description for a sector of the municipality of Herveo, Tolima at 1:25,000 scale\*

**Author(s):** Karen Lisbeth Castillo, Ana Maria Quintero\*\*

**Key Words:** Morphodynamic, Triggering Factor, Watershed, Geomorphology.

Mass movements in Herveo, Tolima represent an important hazard factor that can trigger a series of negative effects ranging from material damages to loss of human lives. Therefore, the present research work seeks to perform a multi-temporal analysis of these movements and a morphometric characterization of each basin to identify contributing and conditioning factors through morphometric parameters such as relief, shape and texture of the drainage and flow mobility in the basin. These parameters provide information about the effects of geological structures, lithological variation, basin degradation potential and identification and rock strength.

The morphodynamic analysis reveals that topography, erosion, slope morphology, and structural control of the Palestine fault system are crucial in assessing susceptibility to mass movements. Additionally, it was possible to identify translational landslides as the most recurrent subtype, totaling 195 recorded events, with most of them currently active. Therefore, these analyses provide a basis for generating knowledge about the zoning of areas susceptible to landslides in the region.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Industrial University of Santander. Faculty of Physicochemical Engineering. Geology School. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz. Geologist, MSc in Environmental Geology. Codirector: Leonardo Palmera Sánchez. Geologist, MSc in Geosciences.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### Introducción

Los movimientos en masa se caracterizan por el desplazamiento descendente de masas de roca, suelo o detritos en una ladera bajo la influencia de la fuerza de gravedad (Cruden & Varnes, 1996). En Colombia, entre los años 1921 a 2021 ocurrieron más de 14.150 eventos, la zona del país que más movimientos en masa tiene registro es la región Andina con un total de 93%, seguida de las regiones Pacífico y Caribe con menos del 5%, y el Amazonas y Orinoquía con datos cercanos al 2% (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2021).

La zona de estudio está ubicada en un sector del municipio de Herveo en el departamento del Tolima, esta área se caracteriza por sus empinadas pendientes y terrenos poco consolidados, altamente susceptibles a las variaciones climáticas. Adicionalmente, la región experimenta una precipitación elevada, lo que contribuye al aumento en la frecuencia de movimientos en masa. (Consejo Municipal Para la Gestión de Riesgo de Desastres (CMGRD), 2021). Estos eventos generan una serie de efectos negativos que van desde la pérdida de vidas y daños materiales hasta impactos en la salud mental y la economía de la comunidad (Schuster, 1996; Sidle & Ochiai, 2006). En estadísticas realizadas por la secretaría de planeación e infraestructura, consignadas en el informe del primer trimestre de gestión del riesgo de desastres del año 2022, se identificó que los eventos más recurrentes son los deslizamientos con un 92%, seguido de las inundaciones 4%, incendios 2% y vendavales 2% (Secretaría de planeación e infraestructura, 2022). Sin embargo, la descripción morfológica y el análisis multitemporal de los movimientos en masa presentes en Herveo, ha sido poco estudiado para la zonificación de áreas susceptibles a este tipo de amenaza geológica.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **1. Objetivos**

#### **1.1. Objetivo General**

Elaborar un análisis multitemporal relacionado a los movimientos en masa y generar una caracterización morfométrica para un sector del municipio de Herveo (Tolima), tomando como base la “Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia del Servicio Geológico Colombiano -SGC, 2017”.

#### **1.2. Objetivos específicos**

Recopilar información de los registros históricos de movimientos en masa para un sector del municipio de Herveo, Tolima a partir de fuentes secundarias como reportes del estado de las vías (INVIAS), del Sistemas de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), DesInventar, imágenes Satelitales (Google Earth), fotografías aéreas (IGAC) y artículos en periódicos locales.

Estimar la fecha de generación de cada movimiento en masa y la fuente causante (multitemporal).

Calcular los parámetros morfométricos para un sector del municipio de Herveo, Tolima a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución espacial de 12,5 m utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Determinar las características morfodinámicas a partir del documento “Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia del Servicio Geológico Colombiano -SGC, 2017”.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 2. Justificación

Los movimientos en masa son una de las amenazas geológicas más comunes y recurrentes (Sánchez Gomez & Berrio Morales, 2019). Según la Organización Mundial de la Salud entre 1998 y 2017 los movimientos en masa afectaron a 4,8 millones de personas y causaron más de 18.000 muertes (World Health Organization [WHO], 2019). Se prevé que el cambio climático y el aumento de las temperaturas desencadenen más problemas asociados a movimientos en masa, especialmente en zonas montañosas donde los factores climáticos (lluvias y temperatura) influyen en las causas externas que pueden activar la inestabilidad de una ladera, debido a cambios sobre la superficie del terreno (WHO, 2019).

Este escenario no es ajeno para Colombia donde por condiciones geológicas, geomorfológicas, tectónicas y estructurales de las cordilleras de los andes permiten que esta región sea muy propensa a condiciones inestables de las laderas (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2021). Estas condiciones favorecen la ocurrencia de eventos como la actividad sísmica, erupciones volcánicas y movimientos en masa, estos últimos detonados por lluvias intensas, pendientes fuertes, materiales fracturados y meteorizados, y en muchas ocasiones por el uso inadecuado del territorio (SGC, 2017). El Servicio Geológico Colombiano en el año 2015 desarrolló el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000, en el cual identificó que aproximadamente el 50% del territorio nacional se encuentra categorizado en amenaza baja por movimientos en masa, 22% amenaza media, 20% amenaza alta y 4 % en amenaza muy alta (IDIGER, 2022). Teniendo en cuenta las metas propuestas en el Marco de Sendai junto con los datos expuestos del Servicio Geológico Colombiano, el presente trabajo busca enfatizar en las siguientes metas: reducir el número de personas afectadas y los daños causados

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

por estos desastres, en las infraestructuras vitales y la interrupción de los servicios básicos, e incrementar la disponibilidad de los sistemas de alerta temprana sobre amenazas múltiples.

En el caso del municipio de Herveo, Tolima debido a su localización se encuentra bajo la influencia de fenómenos geológicos que significan una amenaza potencial para los asentamientos humanos (Mullet Baracaldo & Ortiz Galvis, 2014), algunas de las amenazas se desarrollan por eventos sísmicos y actividad volcánica, esto debido a su cercanía a los volcanes Ruiz y Cerro Bravo.

El municipio de Herveo presenta un 29,38% de su área total bajo amenaza muy alta por movimientos en masa, afectando a la población como también el factor socioeconómico (SGC, 2017). Por lo anterior, se contrasta por ser un punto clave para realizar una caracterización morfométrica y un análisis de los procesos morfodinámicos (movimiento en masa y rasgos geomorfológicos), desde un análisis multitemporal, que permita identificar los factores contribuyentes y condicionantes que generan los diferentes eventos para los movimientos en masa. Por medio de este trabajo de investigación se aportará una base para generar conocimiento sobre la zonificación de áreas susceptibles a movimientos en masa, una adecuada gestión del riesgo y planes que mitiguen y prevengan las afectaciones producidas por esta amenaza a la población. Por último, los productos obtenidos en esta investigación son realizados con insumos de libre adquisición, brindando la oportunidad de crear herramientas de bajo coste en la evaluación de escenarios de amenazas en la gestión del riesgo de desastres.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 3. Localización

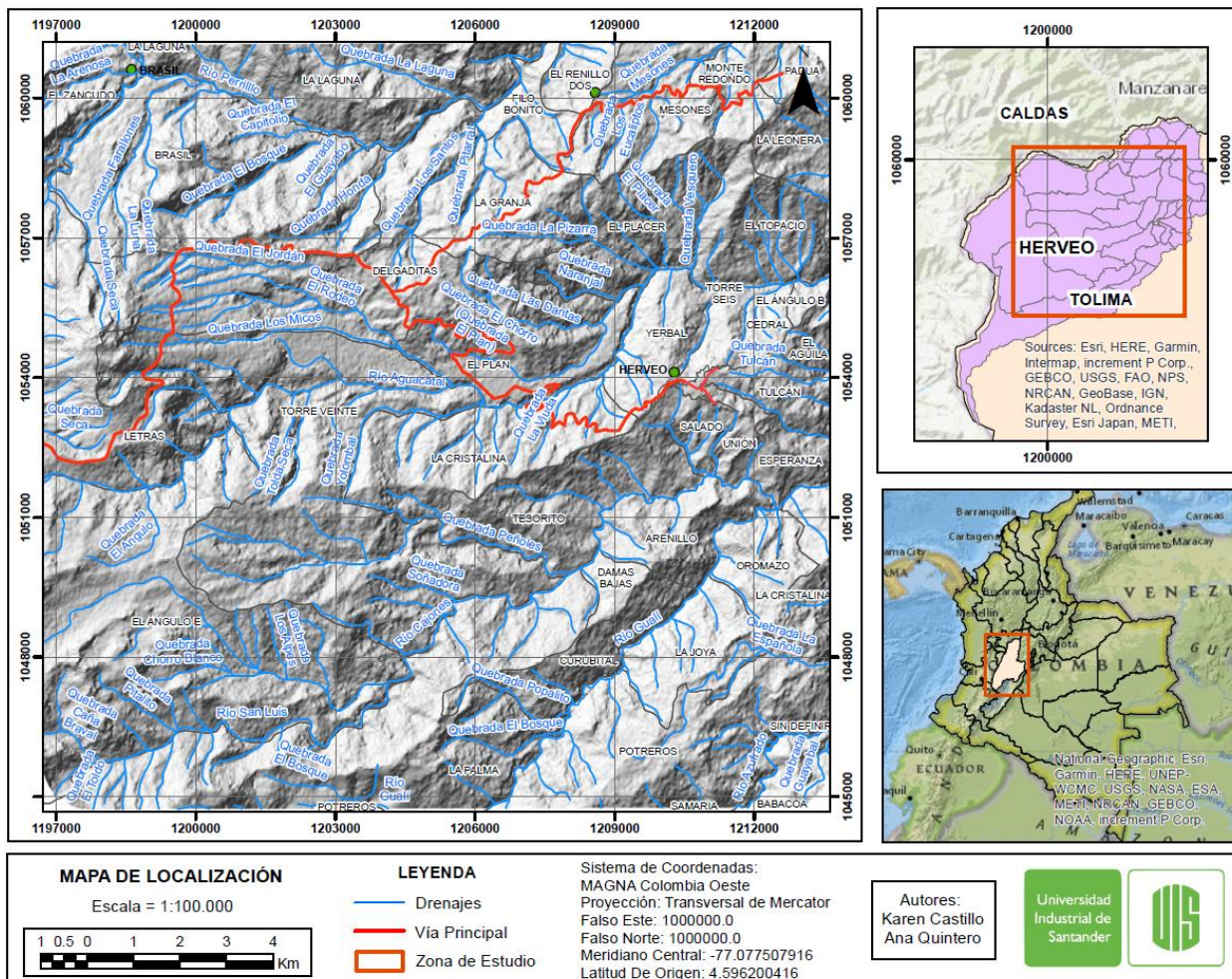
El Municipio de Herveo, se encuentra ubicado entre el piedemonte Oriental de la Cordillera Central y el Valle interandino del Rio Magdalena (Mullet Baracaldo & Ortiz Galvis, 2014). Limita al norte con los municipios de Marulanda y Manzanares del Departamento de Caldas, al oeste con los municipios Villamaría y Manizales, al oriente con el municipio de Fresno – Tolima y al sur con municipio de Casabianca – Tolima (Figura 1).

Se encuentra constituido por la Cabecera Municipal y los Centros Poblados Rurales de Padua, Letras y el Brasil, la inspección de Padua y 32 veredas, con un área de 216.68  $km^2$ . Presenta cuatro grandes paisajes fisiográficos (Lomerío, Montaña, Piedemonte y Valle) y los accidentes orográficos más importantes son los Cerros de Bosque, La Perdida, Morrón y los altos Cerro Bravo, Contrabando, Cruz Gorda, Farallones y el Grito. El casco urbano de Herveo está ubicado a 2250 ms.n.m, con una temperatura media de 16°C, presenta precipitaciones medias anuales entre 2000 y 2500 mm y se ubica sobre la divisoria de aguas de la quebrada Aguacatal, al norte y río Gualí al sur (SGC, 1993).

TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Figura 1

Mapa de localización de la zona de estudio.



4. Antecedentes

Para la elaboración de este trabajo de investigación, los estudios se efectuarán teniendo en cuenta las regulaciones definidas en la normativa legal vigente; la Ley 1523 del 2012 en la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de desastres y la creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) como instrumento para el desarrollo en cuanto al

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo del desastre. Con respecto a los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos se estipula el decreto 1640 de 2012 y para la reglamentación del ordenamiento territorial se estipula el decreto 1807 de 2014, el decreto 1077 de 2015, y el decreto 1232 de 2020.

Las clasificaciones de movimientos en masa son numerosas, depende del criterio de clasificación que adopta cada autor; el sistema de clasificación de los movimientos en masa de [\(Cruden & Varnes, 1996\)](#) acoge en gran parte la clasificación de [\(Varnes D. , 1978\)](#), que propone los cinco tipos básicos de movimientos conocidos: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral, flujo, y se anexan las reptaciones. Se complementa introduciendo una terminología que considera factores tales como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, propone la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos; por ejemplo, caída de rocas-flujo de detritos [\(Cruden & Varnes, 1996\)](#).

Teniendo en cuenta la complejidad de este tipo de amenaza, este trabajo se realiza en base a la información descrita en el documento del Proyecto Multinacional Andino [\(Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas \(PMA\), 2007\)](#), donde su razón principal es contribuir al mejoramiento de la calidad de vida y a la reducción de los desastres por estos eventos en los países andinos. Este proyecto trata sobre los distintos tipos de movimientos en masa, y sus clasificaciones, de acuerdo con lo expresado por la comunidad científica a nivel mundial y regional.

Esta información se compila en una guía metodológica para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, consecuentemente propone un procedimiento para planificar los estudios, establecer el alcance y seleccionar el método de evaluación y zonificación. Por otra parte, explica y presenta plantillas para la descripción morfométrica y cualitativa de los movimientos en

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

que intenta involucrar de manera unificada todos los aspectos de interés común. A su vez, como un referente para Colombia, el SGC creó la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, donde se describe el proceso metodológico para el análisis de amenaza por movimientos en masa, el cual consta de tres etapas (la caracterización geoambiental, análisis de susceptibilidad y caracterización de la amenaza) que permiten analizar tanto los movimientos en masa que actualmente ocurren, como los que pueden potencialmente ocurrir, además de sus características y factores detonantes (SGC, 2017).

Referente al objeto de estudio, el municipio de Herveo (Tolima) es uno de los municipios que se mantiene en alerta debido a la propagación de estos fenómenos en épocas de lluvia; se conoce que en el municipio se generan constantes movimientos en masa a lo largo de sus vías (Alcaldía Herveo Tolima, 2022). Sin embargo, se desconoce la importancia de llevar un registro de cada uno de estos eventos en la zona. Según el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), para el municipio de Herveo se tiene reportado un total de 9 eventos en el inventario y 40 en el catálogo (SIMMA - SGC, 2022). Por otro lado, en el sistema de inventario de desastres de toda América Latina-DesInventar, se reportan 38 movimientos en masa para el municipio, registrados por medio de instituciones como la Defensa Civil, Bomberos, y periódicos (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), 2022).

En el año 2005 la alcaldía municipal de Herveo elaboró el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), donde se hace una recopilación detallada de información geológica del territorio e identifica las amenazas a las que se puede estar enfrentando. En el área rural se identificaron múltiples zonas con presencia de amenaza por movimientos en masa, y una de las vías principales dentro del municipio que presenta abundancia de este tipo de fenómenos (vía Bogotá – Manizales, en el segmento Padua – Delgaditas) (Alcaldía Municipal de Herveo, 2005).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Así mismo, el Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Herveo Tolima (PMGRD) elaborado en el año 2021, identifica que los movimientos en masa han sido ocasionados en gran parte por el impacto generado por las temporadas invernales, sumada a esto, el manejo inadecuado del suelo y aguas, y la construcción de viviendas en laderas de alto riesgo ([Concejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres \(CMGRD\), 2021](#)).

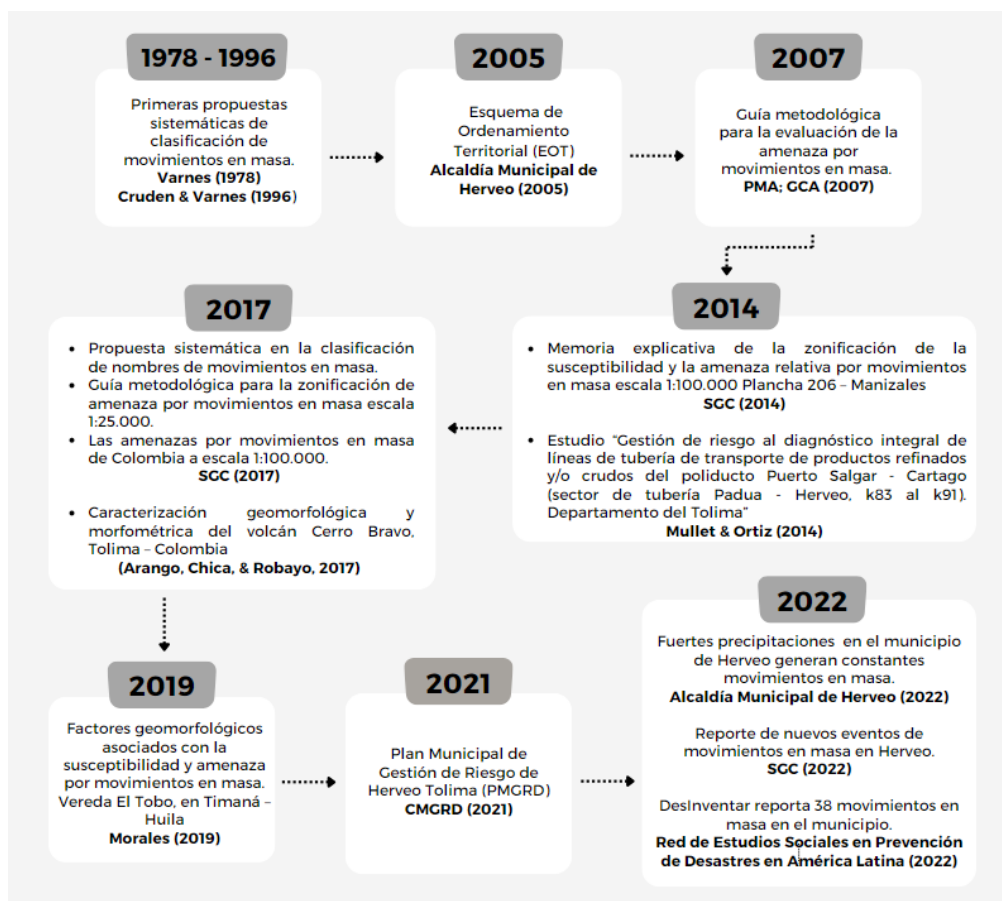
En el libro las amenazas por movimientos en masa de Colombia a escala 1:100.000 realizado por el Servicio Geológico Colombiano, para el departamento de Tolima, dentro de la categoría de amenaza muy alta por movimientos en masa, los municipios que presentan mayor área son Villa Hermosa (37,48%), Fresno (35%), Herveo (29,38%) y Casabianca (23%) ([SGC, 2017](#)).

Se han realizado investigaciones relacionadas con el estudio de los movimientos en masa (Figura 2), uno de ellos es la “*Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 Plancha 206 – Manizales*”, que incluye los aspectos metodológicos y los resultados obtenidos en la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos en masa por los componentes de geología, geomorfología, cobertura vegetal, detonante sismo, y detonante lluvia, esta plancha cubre parte de los departamentos de Caldas y Tolima, el cual incluye al municipio de Herveo ([SGC, 2014](#)).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Figura 2**

*Línea de tiempo antecedentes.*



El estudio "*Gestión de riesgo al diagnóstico integral de líneas de tubería de transporte de productos refinados y/o crudos del poliducto Puerto Salgar - Cartago (sector de tubería Padua - Herveo, k83 al k91). Departamento del Tolima*", realizado por Martha Liliana Mullet Baracaldo y Juan Carlos Ortiz Galvis, para optar el título de especialista en Geotecnia Ambiental, realizaron la zonificación de Amenaza por movimiento en masa y por avalanchas o inundaciones, por ser los dos procesos con mayor influencia directa sobre la cuenca (Mullet Baracaldo & Ortiz Galvis, 2014).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

El trabajo de investigación “*Caracterización geomorfológica y morfométrica del volcán Cerro Bravo, Tolima – Colombia*” realizado por Eliana Arango Palacio, Pablo Andrés Chica Martínez y Carlos Felipe Robayo Jara, para optar el título de especialista en Información Geográfica, utilizaron los parámetros morfométricos como objeto para establecer y diferenciar el estado de evolución y degradación del paisaje volcánico (Arango Palacio, Chica Martínez, & Robayo Jara, 2017). Por último, Camilo Alexander Morales Alvis (2019), elaboró un estudio para optar el título de Ingeniero Civil, denominado “*Factores geomorfológicos asociados con la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Vereda El Tobo, en Timaná – Huila*” donde analiza los principales factores geomorfológicos (morfogénesis, morfodinámica, morfología y morfometría (Morales Alvis, 2019).

### 5. Marco Geológico

La geología regional del municipio de Herveo se encuentra ubicada al norte del departamento de Tolima, documentada y representada en la Memoria explicativa del mapa geológico de las planchas 206 (Manizales) y 225 (Nevado del Ruiz), a una escala de 1:100.000, elaborada por el (INGEOMINAS, 2001).

Herveo se localiza en la vertiente oriental de la Cordillera Central de los Andes, la cual se formó como resultado de la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica. Esta convergencia ha dado origen a diversas estructuras geológicas, entre las que destacan las fallas y pliegues, características distintivas de la región.

Desde una perspectiva regional a una escala 1:25.000 y teniendo en cuenta las principales unidades litoestratigráficas, la zona de estudio está constituida por rocas sedimentarias,

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas de época Carbonífero Superior hasta el Holoceno (SGC, 1993). Por otra parte, el rasgo estructural más prominente y definido en el área está condicionada por el sistema de Fallas Palestina, presenta una orientación noreste y se encuentra ubicada en la parte media alta de la Cordillera Central, esta falla ejerce una influencia significativa en la morfología y estructura de la región. En cuanto a las subunidades geomorfológicas presentes, estas incluyen geformas de origen estructural, denudacional, fluvial, volcánico y glacial (**Anexo A**).

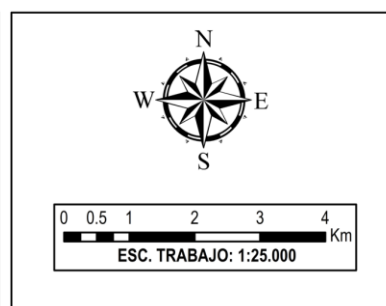
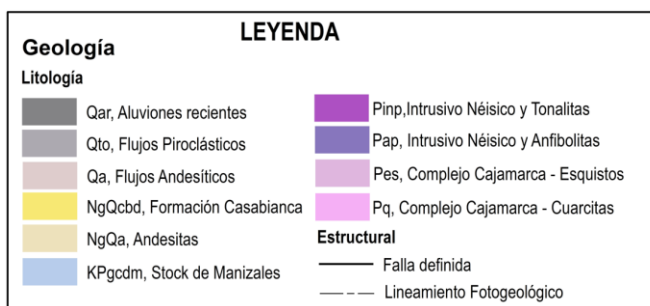
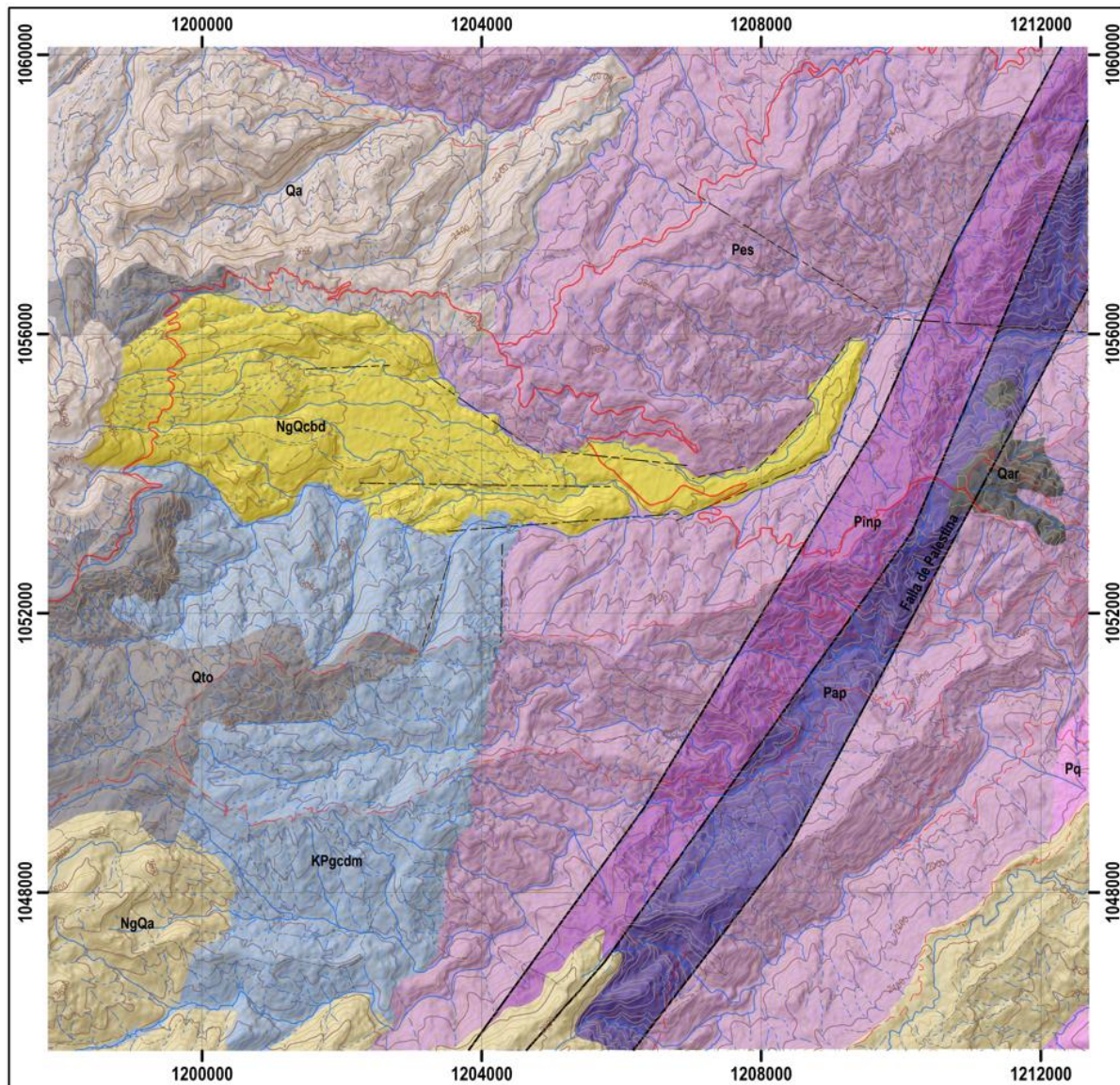
### 5.1. Geología

La geología del municipio de Herveo está constituida por rocas que van desde el Carbonífero-Pérmico (312 Ma) hasta el Holoceno (Figura 3). En la zona de estudio afloran principalmente rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca, representadas por esquistos cuarzo-sericíticos, clorítico-sericíticos, moscovíticos y filitas. Así mismo, afloran rocas ígneas intrusivas como las anfibolitas de Padua y tonalitas de Padua, y el Stock de Manizales. Adicionalmente, se presentan depósitos sedimentarios cuaternarios de origen coluvial, coluvio-aluvial y aluvial, los cuales se disponen bordeando los principales cauces.

TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Figura 3**

*Geología de la Plancha 206 de Herveo, Tolima escala 1:25000.*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

En conjunto, estas unidades litológicas generan condiciones favorables para el desarrollo de meteorización y erosión, propiciando la ocurrencia de movimientos en masa, contribuyendo a su degradación (SGC, 1993). En la Tabla 1 se describen las unidades de edad reciente a antigua.

**Tabla 1**

### Geología generalizada de la zona de estudio

Litología	Edad	Nombre de la unidad	Descripción	Ubicación Geográfica	Fuente Bibliográfica
	Holoceno	Aluviones Recientes (Qar)	Depósitos no consolidados de material aluvial y coluvial, está compuesto por bloques y gravas de diferente tamaño y composición, en una matriz arcillo-arenosa con diversos grados de cementación o compactación.	Alrededor del casco urbano de Herveo	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág.59
	Pleistoceno tardío - Holoceno	Flujos piroclásticos (Qto)	Depósitos no consolidados compuestos de cenizas, lapilli, cantos de pumita y ocasionalmente bombas volcánicas. Los depósitos o capas de pómez o lapilli pumítico corresponden a depósitos plinianos de caída asociados a la actividad del Cerro Bravo en los últimos 14.000 años	Sector Letras - El Doce de la carretera hacia Fresno	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág.58
	(1,9 Ma) Pleistoceno	Flujos Andesíticos (Qa)	Son lavas masivas en coladas de pocos metros de espesor, de color gris claro a oscuro, ligeramente porfíricas. La composición predominante es andesítica, con textura porfírica constituida por matriz vítrea. Asociada al volcán Cerro Bravo.	Alrededor del volcán Cerro Bravo, vereda Brasil	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág.53
	(4,0 a 1,1 Ma) Pleistoceno Temprano	Plioceno Tardío - Formación Casabianca (NgQcb)	Se encuentra subyaciendo los depósitos de caída más recientes, corresponde a una toba lítica y flujo lahárico no diferenciado, consolidado. La toba lítica consta de fragmentos angulares de lavas andesíticas y pumitas embebidas en una matriz arenosa arcillosa con importante contenido de ceniza. Los flujos laháricos están formados por bloques de lavas andesíticas, anfíbolitas, gneiss y esquistos.	Sector de Delgaditas, y en la Meseta de Herveo	Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). <i>Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Informe técnico de estudios biofísicos</i> . Diagnóstico Técnico, Herveo, Tolima. Pág. 67
	Mioceno Tardío - Plioceno	Andesitas (NgQa)	Flujos o coladas de lava de composición Basáltica y Andesítica encontrándose de manera discordante sobre rocas Ígneas y Metamórficas del Basamento de la Cordillera Central. Geomorfológicamente se presentan a manera de lenguas que se extienden hacia las estribaciones de los cuellos volcánicos.	Aflora en la zona sur del área de estudio en las veredas Poteros, La Palma y El Angulo E	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág. 53-54
	(62,4 ± 3,6 Ma) Cretácico superior - Paleoceno	Stock de Manizales (KPaqcdm)	Es un cuerpo de rocas granitoides, en gran parte se encuentra cubierto por depósitos piroclásticos, presenta un intenso diaclazamiento, su composición predominante granodioritonalita, con facies ocasionales un poco más ácidas.	Aflora alrededor del Volcán Cerro Bravo en las veredas Torre 20, Letras y El Angulo E	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág. 46
	(205 ± 7 Ma) Triásico Superior	Intrusivo Néisico y Anfíbolitas (Pinp - Pap)	Comprende un cuerpo de roca granítica de características néisicas con alto contenido de cuarzo y anfíbolitas asociadas, roca de composición tonalítica (Pinp), textura hipidioblástica inequigranular, de grano fino a medio y con foliación definida por orientación de micas. Estas rocas se encuentran altamente fracturadas con direcciones de diaclazamiento. (Pap) es un gneis cuarzo feldespático algunos con sillimanita, cordierita, y hornblenda; anfíbolitas, migmatitas, esquistos y marmoles Al este el contacto es fallado y está marcado por la Falla Palestina, las rocas predominantes en esta unidad son granoblásticas de grano medio a fino, equigranulares.	W del casco urbano de Herveo y en las veredas El Arenillo, El Topacio, Yerbal, Tesorito, y en la carretera Mesones - Padua	Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). <i>Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Informe técnico de estudios biofísicos</i> . Diagnóstico Técnico, Herveo, Tolima. Pág. 65. Mullet Baracaldo, M. L., & Ortiz Galvis, J. C. (2014). <i>Gestión del riesgo al diagnóstico integral de líneas de tubería de transporte de productos refinados y/o crudo del poliducto Puerto Salgar - Cartago (Sector de tubería Padua - Herveo, K83 al K91)</i> . Departamento de Tolima. Bucaramanga, Colombia: Tesis. Esp. Geotecnia Ambiental, Universidad Industrial de Santander. pág 44
	(312±15 Ma hasta 61±10 Ma) Carbonífero - Paleoceno	Complejo Cajamarca (Pq - Pes)	Constituido por esquistos grafíticos, cuarzosomocovitos, cloríticos y anfíbolíticos; filitas, cuarcitas, marmoles y serpeninitas, constituye un complejo polimetamórfico.  Grupo cuarzosos (Pq) cuarcitas y cuarcitas micáceas con transición local a esquistos cuarzosos y neises cuarzo-feldespáticos	En la zona de estudio esta unidad se extiende a lo largo de una franja con dirección N35E, (carretera que conduce del suelo urbano de Herveo al sector de Delgaditas y la vía principal al centro poblado de Padua)	INGEOMINAS. (2001). <i>Memoria explicativa de las planchas 206 - 225, Manizales - Nevado del Ruiz</i> . Bogotá D.C., Colombia, pág. 23-24. Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). <i>Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Informe técnico de estudios biofísicos</i> . Diagnóstico Técnico, Herveo, Tolima. Pág. 64.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 5.2. Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Una unidad geológica superficial corresponde al conjunto de materiales que aflora a la superficie, que proviene del mismo origen y conserva en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánico. Estas unidades son un insumo de gran importancia para el cálculo de susceptibilidad de amenaza por movimientos en masa, debido a la información que aporta sobre las propiedades físicas de las unidades aflorantes, lo que permite determinar zonas de mayor o menor susceptibilidad. Las UGS encontradas en la zona de estudio pueden consultarse en el **Anexo B** del presente documento.

### 5.3. Geología estructural

El marco tectónico regional en el que se encuentra la zona de estudio presenta un extenso sistema de fallas asociados a la historia evolutiva de la cordillera central (SGC, 2014). Existen manifestaciones de movimientos recientes de algunas fallas las cuales afectan la cubierta volcánica.

- Sistema de Fallas de Palestina: Presenta una dirección aproximada N10-20°E, constituido por la falla Salento y algunos lineamientos del complejo volcánico Ruiz-Tolima; presenta un rasgo estructural de rumbo dextralateral que atraviesa la cordillera central sobre 350 km de longitud desde el río Quindío (Mullet Baracaldo & Ortiz Galvis, 2014). En términos regionales el trazo de este sistema de fallas se comporta de forma paralela a subparalela, sin embargo, sobre el flanco Este del municipio estas fallas se observan con trazos sinuosos sobre un rumbo de N10-30°E. Este sistema afecta rocas del intrusivo néisico (Pinp – Pap) y al Complejo Cajamarca (Pes – Pq).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

- **Lineamientos:** Estos se encuentran a lo largo de la zona de estudio, fácilmente identificables en las fotografías aéreas, pueden estar relacionados a fallas menores asociadas a los sistemas de fallas de Palestina, o contactos entre unidades geológicas. Las direcciones predominantes de algunos lineamientos identificados son N-S, E-W, N10-30E y N45W. Estos lineamientos se identifican principalmente en la Formación Casabianca en contacto con el Complejo Cajamarca – esquistos (Pes) y con el Stock de Manizales, se observan en la [Figura 3](#).

### **5.4. Geomorfología**

El municipio se ubica en un territorio montañoso y su relieve corresponde al flanco oriental de la Cordillera Central, el casco urbano de Herveo se ubica sobre una altillanura de origen volcanoclástico, muy disectada en diferentes direcciones (SGC, 1993). Según el Esquema de Ordenamiento Territorial de Herveo, para la región de estudio se determinó las siguientes unidades geomorfológicas:

#### ***5.4.1. Geoformas de origen estructural***

Los lomos de falla se sitúan en las veredas Delgaditas y El Placer, mientras que el escarpe de línea de falla se formó debido a movimientos tectónicos, como la Falla Palestina, y se localiza en el límite de los municipios de Herveo y Casabianca, específicamente en la vereda La Palma, en la margen izquierda del río Gualí. La ladera de contrapendiente de sierra homoclinal se caracteriza por la disposición de las capas del Complejo Cajamarca en sentido contrario a la inclinación natural del terreno y se presenta en la vereda El Placer, el sector La Granja, la vereda La Damas y Curubital, en la margen derecha del río Cajones. Por otro lado, en las sierras y lomos de presión

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

su origen se debe a levantamientos asociados a zonas de compresión, donde la combinación de movimientos verticales y de rumbo generan fallamientos intensos dando lugar a este tipo de geoformas, estas geoformas reflejan procesos de inestabilidad, como deslizamientos rotacionales, caída de rocas, caída de detritos y flujo de detritos, se encuentran en la parte noreste y suroeste de la cabecera municipal de Herveo, abarcando las veredas El Placer y El Salado.

### ***5.4.2. Geoformas de origen denudacional***

Las unidades geomorfológicas del ambiente denudacional son generadas procesos de erosión y meteorización moderados a intensos, producidos por los diferentes agentes erosivos, en el área de estudio se observan sierra residual sobre la margen derecha del río Aguacatal.

### ***5.4.3. Geoformas de origen fluvial***

Los drenajes que se incluyen como contribuyentes en el desarrollo de estas geoformas son el río Aguacatal, Gualí, y otros drenajes menores. La geoforma presente es el cauce aluvial, el cual se caracteriza por su tipo de relieve plano, con índice de relieve muy plano, esta geoforma corresponde a un canal irregular, el cual ha sido generado por excavaciones de corrientes perennes o estacionales dentro del macizo rocoso y/o sedimentación aluvial. En su recorrido dichos cauces transportan grandes cantidades de sedimentos que se depositan sobre zonas de menor pendiente formando otro tipo de geoformas. El plano o llanura de inundación están constituidas por aluviones y fragmentos de las rocas circundantes que han sido erosionados y depositados en el sector (Qar).

### ***5.4.4. Geoformas de origen volcánico***

Específicamente en el municipio de Herveo-Tolima, se localiza el volcán de Cerro Bravo, que es la principal geoforma volcánica referente, con actividad durante el Pleistoceno Superior-Holoceno. Estas unidades geomorfológicas fueron originadas como resultado de la actividad volcánica, la cual incluye erupciones explosivas y/o efusivas, además de aquellas geoformas

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

generadas por acumulación de la remoción de productos volcánicos. Las geoformas de origen volcánico en el área de estudio son: Caldera, domo volcánico, volcán o edificio volcánico, flujo de lava, escarpe de flujo de lava, flujo piroclástico aterrazado y Manto Piroclástico.

### ***5.4.5. Geoformas de origen glacial***

Este ambiente se desarrolló en la zona de manera intermitente con el ambiente volcánico y estructural, entonces es posible observar que estas geoformas se desarrollaron sobre antiguas geoformas de tipo estructural, y que posteriormente han sido enmascaradas por depósitos piroclásticos y a su vez afectadas por tectonismo. Se identifica la Morrena de fondo en la vereda El Angulo E la unidad del Stock de Manizales.

## **6. Marco Teórico**

### **6.1. Morfodinámica**

La morfodinámica es uno de los aspectos más importantes que engloba la geomorfología, se basa en estudiar los procesos activos en el presente o aquellos que se pueden activar en el futuro. Se refiere a los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando la superficie terrestre con diferentes grados de intensidad, imprimiendo al terreno características propias de cada ambiente, es decir, hace referencia a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre que modifica las geoformas preexistentes (SGC, 2017). Además, la morfodinámica permite identificar y describir la evolución de los procesos erosivos y los movimientos en masa, así como su distribución espacial.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 6.2. Clasificación de movimientos en masa

En la literatura científica, se encuentran diversas clasificaciones de movimientos en masa, la mayoría se fundamentan principalmente en el tipo de materiales involucrados, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación. La Clasificación de (Cruden & Varnes, 1996), se acoge en gran parte a la clasificación de Varnes (1978). En la Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) se compila esta clasificación en la que se proponen los cinco tipos básicos de movimientos conocidos: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral, flujo y reptación (creep), y se complementa introduciendo una terminología que considera factores tales como actividad (estado, distribución, estilo), tasa de movimiento y contenido de agua; además, propone la combinación de nombres según el orden en que se presentan los movimientos; por ejemplo, caída de rocas-flujo de detritos.

El concepto de actividad asociada a los movimientos en masa abarca su evolución temporal y se articula a través de tres condiciones espaciotemporales fundamentales, las cuales contribuyen a visualizar la tendencia de los movimientos: estado, distribución y estilo (Cruden & Varnes, 1996). El "estado de la actividad" se conecta con la fase temporal del movimiento, pudiendo ser categorizado como activo, interrumpido, reactivado o inactivo (latente, abandonado, estabilizado o relicto), lo que implica una disminución de su peligrosidad con el tiempo. Por otro lado, la "distribución de la actividad" tiene como objetivo establecer la ubicación espacial de la porción de masa en movimiento en relación con la superficie de falla, presentando situaciones como avanzado, retrogresivo, creciente, decreciente, confinado, móvil y ensanchado, lo cual ilustra la extensión y dirección del movimiento. Asimismo, el "estilo de la actividad" se refiere a la forma

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

en que distintos movimientos relacionados contribuyen a la inestabilidad, siendo categorizados como complejos, compuestos, sucesivos, individuales o únicos, y múltiples, según su impacto en la estabilidad general.

### **6.3. Inventario de Movimientos en masa**

Un inventario de movimientos en masa es un registro ordenado de la localización y las características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área dada; la utilidad de los inventarios radica en los análisis de frecuencia de deslizamientos, en los cuales se basan algunos métodos de evaluación de la amenaza (PMA, 2007). Igualmente, los inventarios son necesarios para establecer correlaciones tales como lluvia-deslizamiento, o sismo-deslizamiento.

### **6.4. Morfometría**

La morfometría es un conjunto de herramientas de medición cuantitativa de la superficie, cuyo fin se basa en explicar a partir de datos numéricos los cambios del relieve, su origen y ambiente de formación (Ramírez Calderón & Tejada Vanegas, 2020). El análisis morfométrico permite interpretar y predecir los comportamientos hidrológicos y de torrencialidad de una cuenca hidrográfica; este análisis es realizado mediante la obtención de índices morfométricos, a partir de la forma de la cuenca, red de drenaje y relieve.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 7. Metodología

El desarrollo de este proyecto se desarrollará por medio de las fases secuenciales descritas a continuación:

#### 7.1. Trabajo Pre-Campo

En esta fase se hará una búsqueda de información relacionada con la temática, utilizando diversas fuentes como la plancha geológica 206, así como la memoria explicativa. Además, serán revisados los antecedentes de estudios relacionados con la caracterización y clasificación de movimientos en masa, análisis morfométricos y estudios geomorfológicos.

##### 7.1.1. Cartografía preliminar

Para delimitar la zona en que se va a realizar el estudio se seleccionó un área de aproximadamente  $216.68 \text{ km}^2$  que contenga el área urbana del municipio de Herveo y el volcán Cerro Bravo. Una vez delimitada la zona, se obtiene el Modelo Digital de Elevación (MED) del portal ASF-ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m, y la cartografía base a partir de los datos gratuitos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a una escala de 1:25,000. Para realizar el mapa preliminar a la salida de campo, se tuvo en cuenta el mapa de pendientes, el mapa de sombras, el mapa de orientaciones y el mapa topográfico de la plancha 206 de Manizales de Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2014).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### *7.1.2. Clasificación del inventario de procesos morfodinámicos*

El proceso de recopilación de la información necesaria para el desarrollo del inventario será dividido de la siguiente manera:

- Catálogo: Base de datos con información de ocurrencia histórica de movimientos en masa, cuya información se obtiene de fuentes secundarias (Comunicados de prensa, reportes de la cruz roja, la Defensa civil, Bomberos, etc.). El catálogo se extraerá principalmente de la base de datos SIMMA, la cual recopila toda la información reportada sobre movimientos en masa en Colombia. Algunos de estos datos no presentan información temporal, únicamente información espacial.

- Inventario de información Secundaria: Es la información obtenida a partir de noticias u otros tipos de reportes, y cualquier base de datos o fuente externa de las cuales se puedan extraer registros sobre movimientos en masa.

### **7.2. Trabajo de campo**

El trabajo de campo subdivide en dos partes, en la primera se busca hacer un reconocimiento y una caracterización de los movimientos en masa presentes en la zona haciendo uso del formato modificado para inventario de movimientos en masa (**Anexo C**) (SGC, 2012). Los términos y la clasificación utilizada para este documento son tomados de la guía metodológica (SGC, 2017), las cuales a su vez fueron tomadas y adaptadas de (Guzzetti , et al., 2012) y (Zieher, et al., 2016).

En la segunda se usarán los drones Phantom 4 RKT DJI y DJI Mavic 2 Pro para tomar diferentes fotografías de otros deslizamientos o flujos presentes en la zona pero que corresponden a áreas de difícil acceso.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

En la tercera etapa serán descritas y cartografiadas las UGS presentes en la zona de estudio según los parámetros propuestos en la guía metodológica (SGC, 2017) que toman las definiciones de (Selby, 1993) en donde se considera roca a un material compuesto de granos minerales y cristales estrechamente unidos entre sí mediante sustancias cementantes y al suelo como un depósito suelto o blando de origen natural formado en la superficie de la tierra, el cual se debilita o ablanda por inmersión en el agua. Además, se realizó caracterizaciones de los elementos estructurales, como fallas, pliegues, lineamientos y discontinuidades menores con la colaboración y el apoyo de los tesisistas Katherin Basto, Sara Moyano y Yessid Zabala.

### **7.3. Trabajo Post Campo**

Finalmente, se realizó un análisis complementario añadiendo la verificación en campo e interpretación visual de sensores remotos. Estos datos estarán relacionados a algún factor detonante específico como lluvias o sismos, de tal manera que se pueda determinar de forma más precisa la información temporal y espacial de estos eventos. Estos datos serán representados dentro del inventario como polígonos dentro de lo posible ya que en caso de no tenerse un apoyo para la conversión a polígono será representada como punto.

### **7.4. Análisis morfométrico**

Los factores morfométricos que se incluyen en el trabajo de investigación se construyen a partir de las variables obtenidas del MDE tales como la textura, flujo y sistema de drenaje y la caracterización del relieve (Valencia Ortiz & Martínez, 2018).

Utilizando el software QGIS v. 3.28.11 LTR se estudió y caracterizó tres cuencas hidrográficas (Río Perrillo, Río Gualí y Río Azufrado) en base al sistema y textura de drenaje, análisis de movilidad

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

y características del relieve. Con estos parámetros se busca identificar las afectaciones por estructuras geológicas y las anomalías litológicas en los patrones de drenaje, la tendencia de la cuenca de concentrar el escurrimiento de una lluvia, el potencial de degradación de una cuenca, entre otros (Keller & Pinter, 2002). La información específica de cada parámetro evaluado junto con su respectiva ecuación utilizada se encuentra en la Tabla 2.

### **7.5. Mapa de UGS**

Con el objetivo de complementar el análisis morfodinámico, se elaboró un mapa de UGS en función de su resistencia mediante la caracterización basada en pendientes. Este proceso implicará la utilización del software QGis para fusionar el mapa geológico y el mapa de pendientes. De esta manera se pueden identificar los grados de resistencia y clasificarlos de acuerdo con la clasificación de tipos de UGS según el origen propuesta en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimiento en Masa Escala 1:25.000 (SGC, 2017).

### **7.6. Elaboración documento final**

Organizar y estructurar toda la información recopilada en el presente trabajo, incluyendo los datos, interpretación de los resultados y conclusiones obtenidas durante todo el proceso.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Tabla 2

*Métodos de cálculo de parámetros morfométricos*

Métodos de cálculo de parámetros morfométricos				
Parámetro morfométrico	Método	Referencia		
Red de drenaje	Área (km <sup>2</sup> ) (A)	Software SIG	Procesamiento GIS	
	Perímetro (km) (P)	Software SIG	Procesamiento GIS	
	Perímetro Relativo (Pr)	$Pr = A/P$	Schumm (1956)	
	Longitud de la cuenca (km) (Lb)	Software SIG	Schumm (1956)	
	Relación Longitud-área (Lar)	$Lar = 1.4 \times A^{0.6}$	Hack (1957)	
	Orden de drenaje	Rango Jerárquico	Strahler (1952)	
	Número de drenaje (Nu)	$Nu = N1 + N2 + \dots + Nn$	Horton (1945)	
	Orden de drenaje total	Suma Orden de drenaje	Procesamiento GIS	
	Longitud total del drenaje (Lu) (km)	$Lu = L1 + L2 + \dots + Ln$	Strahler (1964)	
	Radio de Bifurcación (Rb)	$Rb = Nn / Nn + 1$	Strahler (1964)	
Factor de forma (Rf)	$Rf = A / Lb^2$	Horton (1932)		
Textura y flujo del drenaje - Análisis de movilidad	Densidad de drenaje (Dd)	$Dd = Lu/A$	Horton (1932)	
	Frecuencia de flujo (Fs)	$Fs = Nu/A$	Horton (1932)	
	Textura de drenaje (T)	$T = Dd \times Fs$	Smith (1950)	
	Tiempo de concentración (Tc)	Coficiente de torrencialidad (Ct)	$Ct = \text{orden de corriente} / A$	Diaz (1987)
			$Tc = 0.97K^{(0.385)}$ , $K = Lc^3 / H$	USDA-SCS (1986)
			$Tc = [0.87Lc^3 / H]^{0.385}$	California Highways and Public Works (1955)
			$Tc = 0.066[(L/\sqrt{So})^{0.77}]$	Kirpich (1940)
			$Tc = 0.3[(Lc/So^{0.25})^{0.76}]$	Témez (1978)
			$Tc = (4\sqrt{A} + 1.5Lc) / (25.3\sqrt{LcSo})$	Giandotti (1934)
			$Tc = 0.8873[Lc^{1.5} / \sqrt{(CM - Cmc)}]^{0.64}$	Chow et al. (1994)
	$Tc = 0.335[A / (So^{0.5})]^{0.593}$	Clark (1945)		
	$Tc = 0.3 [Lc / (So^{0.25})]^{0.75}$	Enderson y Wooding (1964)		
	$Tc = 0.108 \times [ALc^{(1/3)} / \sqrt{So}]$	Salimi et al. 2017		
Caracterización del Relieve	Altura media de la cuenca (Hm)	Software SIG	Procesamiento GIS	
	Pendiente media (o)	Software SIG	Procesamiento GIS	
	Pendiente media (%)	Software SIG	Procesamiento GIS	
	Relieve total de la cuenca (H) (m)	$H = Z - z$	Strahler (1964)	
	Relación de relieve (Rhl) (m)	$Rhl = H / Lb$	Schumm (1956)	
	Factor de asimetría (Af)	$Af = 100 \times (Ar/A)$	Keller y Pinter (1966)	
	Curva hipsimétrica	Área - altitud relativa	Strahler (1964)	
	Coficiente de Compacidad (Kc)	$Kc = 0.28 \times (P/\sqrt{A})$	Gravelius (1914)	
	Coficiente de masividad (Cm)	$Cm = Hm/A$	Martonne (1940)	
	Coficiente orográfico (Co)	$Co = ((Hm/1000)^2) / A$	Fournier (1960)	
	Relación de elongación (Re)	$Re = 1.128 \times \sqrt{A} / L$	Schumm (1956)	
	Relación de circularidad (Rc)	$Rc = 4\pi \times A / P^2$	Miller (1953)	
	Sinuosidad del frente montañoso (Smf)	$Smf = Lmf / Ls$	Bull y McFadden (1977)	
	Numero de rugosidad (Rn)	$Rn = Dd \times (H/1000)$	Patton y Baker (1976)	
	Numero de rugosidad de meltón (MRn)	$MRn = H/A^{0.5}$	Melton (1965)	
Índice de gradiente de longitud de la corriente (SL)	GIS Toolbox (SLiX)	Piacentini et al. (2020)		

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**8. Resultados****8.1. Inventario de procesos morfodinámicos**

En el inventario de procesos morfodinámicos (**Anexo D**) fueron analizados un total de 291 puntos. Dentro de estos 47 fueron generados preliminarmente a partir de Interpretación de imágenes de sensores remotos; 53 puntos fueron reportados por el Inventario del Sistema de información de Movimientos en Masa (SIMMA) y reportes de información primaria o secundaria; 28 provenientes de las imágenes tomadas por el dron, y finalmente, 52 puntos registrados en el trabajo de campo (**Tabla 3**). En la Figura 4 se refleja la distribución en datos porcentuales de los datos obtenidos según el tipo de registro.

Los procesos morfodinámicos identificados fueron representados como polígonos, sin embargo, muchos de estos fueron representados como puntos debido a que por su tamaño no eran cartografiables a la escala de presentación. El mapa de inventario de procesos morfodinámicos puede verse en el **Anexo E** del presente documento.

**Tabla 3**

*Total de puntos y polígonos incorporados en el inventario morfodinámico.*

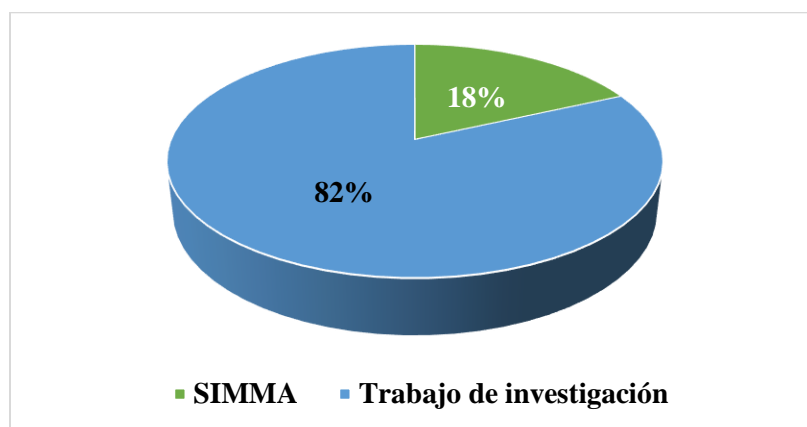
<b>FUENTE</b>	<b>TIPO MM</b>	<b>PUNTOS</b>	<b>POLIGONOS</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Fotointerpretación</b>	Deslizamientos	0	33	<b>47</b>
	Flujo	0	10	
	Caídas	0	4	
<b>Sistema de información de Movimientos en Masa SIMMA (Inventario) - Eventos Históricos</b>	Caídas	5	0	<b>53</b>
	Flujo	4	0	
	Deslizamientos	30	14	
<b>Dron</b>	Deslizamientos	44	21	<b>28</b>
	Flujos	42	4	
	Caída	4	3	
<b>Trabajo de campo</b>	Caída de roca	0	5	<b>52</b>
	Caída detritos	1	0	
	Deslizamiento en cuña	0	2	
	Deslizamiento traslacional	17	34	

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

FUENTE	TIPO MM	PUNTOS	POLIGONOS	TOTAL
	Flujo de detritos	2	6	
	Flujo de tierra	1	5	
<b>TOTAL</b>		<b>150</b>	<b>141</b>	<b>291</b>

**Figura 4**

*Porcentaje de movimientos en masa según el tipo de registro*



La distribución de los movimientos en masa registrados en el municipio de Herveo es la siguiente (Tabla 4): 195 son de tipo deslizamiento, 74 corresponden a flujo y 22 se clasifican como caídas. Es importante resaltar que, de estos eventos un 84.54% presentan actividad.

**Tabla 4**

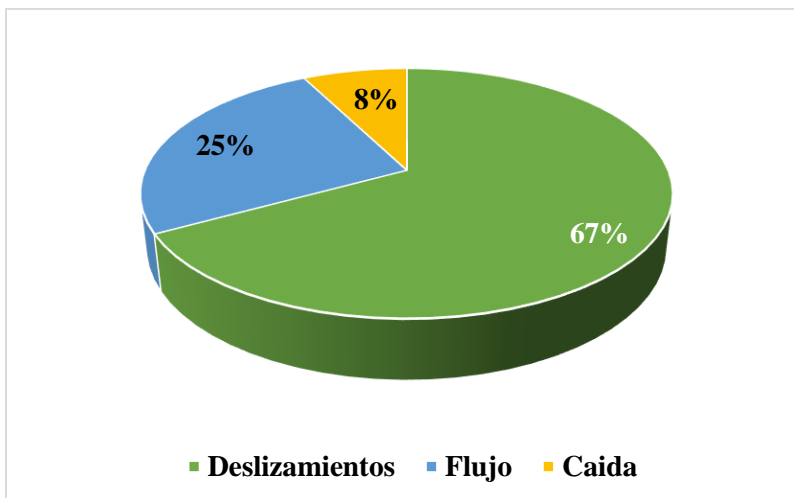
*Registro total de movimientos en masa.*

TIPO DE MOVIMIENTO EN MASA	CANTIDAD DE MOVIMIENTOS	ACTIVIDAD	
		ACTIVOS	INACTIVOS
Deslizamientos	195	154	41
Flujos	74	71	3
Caídas	22	21	1
<b>TOTAL DE EVENTOS</b>		<b>291</b>	

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Figura 5**

*Porcentaje de los tipos de movimientos en masa presentes en la zona de estudio*



## 8.2. Análisis morfodinámico

A partir de los movimientos en masa observados podemos definir que en el área de estudio se encuentran movimientos tipo deslizamiento, caída y flujo. A continuación, se presenta una breve descripción de algunos de los movimientos en masa encontrados durante el trabajo de campo.

### 8.2.1. Flujo de tierra

Las siguientes imágenes (Figura 6 y Figura 7) muestran movimientos que pueden ser clasificados según (Cruden & Varnes, 1996) como flujos de tierra, ya que dentro de la zona se pueden observar diversos movimientos con morfologías alargadas canalizadas compuestas por el material arrastrado. En la parte inferior, se pueden observar contactos más difusos.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Figura 6**

*Flujos de tierra. Imagen obtenida con dron en las coordenadas. Lat 5°04'38.7" N Lon 75°13'46.87" O*

**Figura 7**

*Flujos de tierra. Imagen obtenida con dron en las coordenadas Lat 5°08'16.76" N Lon 75°13'03.65" O*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 8.2.2. *Deslizamientos*

El movimiento en masa compuesto, ubicado en la vía Tesorito (Figura 8), hacia el casco urbano de Herveo, presenta su escarpe al margen izquierdo de la vía y el depósito finaliza en la quebrada Charco Azul, litológicamente compuesto de Suelo transportado coluvial pero adyacente se encuentra roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca y roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo de Padua, ubicado sobre un lomo de presión. Las causas inherentes de este movimiento se relacionan con la meteorización física y química del material, material fallado por corte y material fisurado o agrietado.

### Figura 8

*Movimiento en masa compuesto. Imagen obtenida con dron en las coordenadas Este: 1209754, N: 1052449, Altitud: 2176 ms.n.m*



Según la clasificación propuesta por (Cruden & Varnes, 1996) se puede identificar este movimiento en masa como dos tipos de estilo compuesto que se encuentra activo, el primero como

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

un deslizamiento traslacional y continua como un flujo de detritos. En el deslizamiento se puede observar que la forma de la corona me infiere una distribución retrogresiva y el flujo finaliza con una distribución confinada.

El Movimiento en masa ubicado en el margen derecho de la vía La Cristalina (Figura 9), hacia el casco urbano de Herveo, se encuentra litológicamente compuesto de Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca y ubicado sobre una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal. Según la clasificación propuesta por (Cruden & Varnes, 1996), se puede identificar dos tipos de movimiento en masa de estilo compuesto y estado activo, el primero como un deslizamiento traslacional de detritos con una distribución retrogresiva y ensanchada y continua como un flujo de detritos con una distribución confinada. El deslizamiento presenta un suelo arcilloso con mayor porcentaje de material tipo detritos, húmedo y plasticidad baja.

### Figura 9

*Deslizamiento tomado en campo. Ubicado en las coordenadas Lat 5 5' 12" N Lon 75 13' 16" W.*

*Altitud: 2176.4 ms.n.m.*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Movimiento en masa ubicado en el en el margen derecho de la vía El Plan (Figura 10) hacia el casco urbano de Herveo, litológicamente compuesto de Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca y ubicado sobre una ladera estructural de sierra homoclinal. De acuerdo con la clasificación propuesta por (Cruden & Varnes, 1996)), este movimiento en masa se identifica como un deslizamiento traslacional con estilo único y estado activo, y presenta una distribución retrogresiva y ensanchada. El deslizamiento presenta un origen de suelo coluvial con un material tipo detritos, ligeramente húmedo y plasticidad media.

### Figura 10

*Deslizamiento tomado en campo. Ubicado en las coordenadas Lat 5 5' 10" N Lon 75 12' 45" W.*

*Altitud: 2246.1 ms.n.m*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Movimiento en masa ubicado en el margen derecho de la vía El Plan (Figura 11) hacia el casco urbano de Herveo, litológicamente compuesto de Suelo transportado coluvial y Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca, ubicado sobre una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal. Según la clasificación propuesta por (Cruden & Varnes, 1996) se puede identificar este movimiento en masa como un deslizamiento en cuña con una distribución retrogresiva de edad entre 6 a 10 años que ha sido reactivado. Este movimiento afecta al puente Ricardo Chica Salazar y a un gasoducto.

### Figura 11

*Deslizamiento en cuña. Tomado en campo. Ubicado en las coordenadas 5° 4' 32" N -75° 12' 31" W*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 8.2.3. *Caída de roca*

Este movimiento en masa ubicado (Figura 12) en el margen derecho aguas abajo del Río Aguacatal en la vereda El Plan, litológicamente compuesto de roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca y ubicado sobre una ladera de contrapendiente de sierra homoclinal. De acuerdo con la clasificación propuesta por (Cruden & Varnes, 1996), este movimiento en masa se identifica como una caída de roca con estilo único y estado latente, en el cual las causas inherentes se relacionan con la meteorización física y química del material, material colapsible y material fisurado o agrietado, además la socavación del margen del río es un factor contribuyente. La caída de roca presenta un run up de 35 m aproximadamente.

#### **Figura 12**

*Caída de roca. Imagen obtenida con dron en las coordenadas E: 1207833.40, N: 1053757.62,*

*Altitud: 2159 ms.n.m*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 8.2.4. Enjambre

El enjambre de movimientos (Figura 13) localizado en la vereda yerbal que representa a un conjunto de movimientos en masa (Deslizamiento, flujo y reptación) que ocurrieron simultáneamente y fueron detonados por un mismo evento. Litológicamente, se compone de Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca, y ubicado sobre un lomo de presión. En la parte superior de la Figura 13 se observan dos movimientos en masa:

### Figura 13

*Movimientos en enjambre.*



1. En la Figura 13, el elemento geométrico A es un deslizamiento traslacional de estilo único y estado relicto, con una distribución ensanchada. Su material es tipo tierra con origen de suelo residual, es húmedo y con plasticidad media.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

2. En la Figura 13, el elemento geométrico B presenta dos tipos de movimiento (deslizamiento traslacional y reptación) con estilo compuesto y estado latente, con una distribución retrogresiva. Su material es tipo detritos con origen de suelo coluvial, es húmedo y con plasticidad baja.

### *8.2.5. Análisis morfodinámico para las cuencas*

En la cuenca del río Gualí se han identificado un total de 144 movimientos en masa, tal como se detalla en la Figura 14, estos eventos representan aproximadamente el 58% del total registrado en el municipio. Estas situaciones mayormente se han presentado en las veredas Letras, Tesorito, El Plan y La Cristalina. Con relación en la cuenca del río Perrillo, se han identificado 102 movimientos en masa, lo que equivale al 41% de los eventos registrados en el municipio. Estos incidentes mayoritariamente han tenido lugar en las veredas El Zancudo y La Laguna. Finalmente, se ha observado un número menor de movimientos en masa, específicamente un 1% del total, lo que corresponde a un único evento en la cuenca del río Azufrado, ubicado en la vereda Potreros **(Anexo H)**.

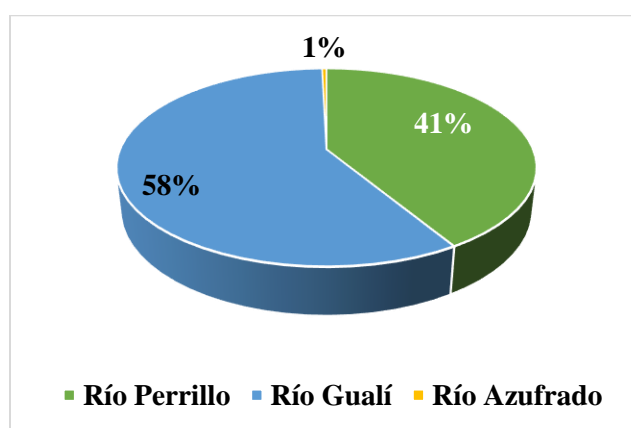
En la Figura 15 se muestra un diagrama de barras que ilustra la distribución total de movimientos en masa de acuerdo con las distintas Unidades Geológicas de Superficie **(Anexo F - G)**. Los datos indican que la Unidad denominada "Roca de moderada calidad volcánicas de la Formación Casabianca (Rmovfc)" registra un total de 35 movimientos en masa. Por otro lado, la Unidad " Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rmoeca)" registra un total de 28 movimientos en masa, mientras que la "Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca (Rmcuca) registra 27 movimientos en masa. Las rocas de moderada calidad de filitas y cuarcitas del Complejo Cajamarca, como las rocas de moderada calidad tonalitas del intrusivo

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Padua presentan una cantidad de movimientos proporcional. Finalmente, las unidades que menor presencia de movimientos en masa presentan son la Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo de Padua (Rbaip) y Roca de buena calidad de flujo lahárico aterrazado (Rbflt).

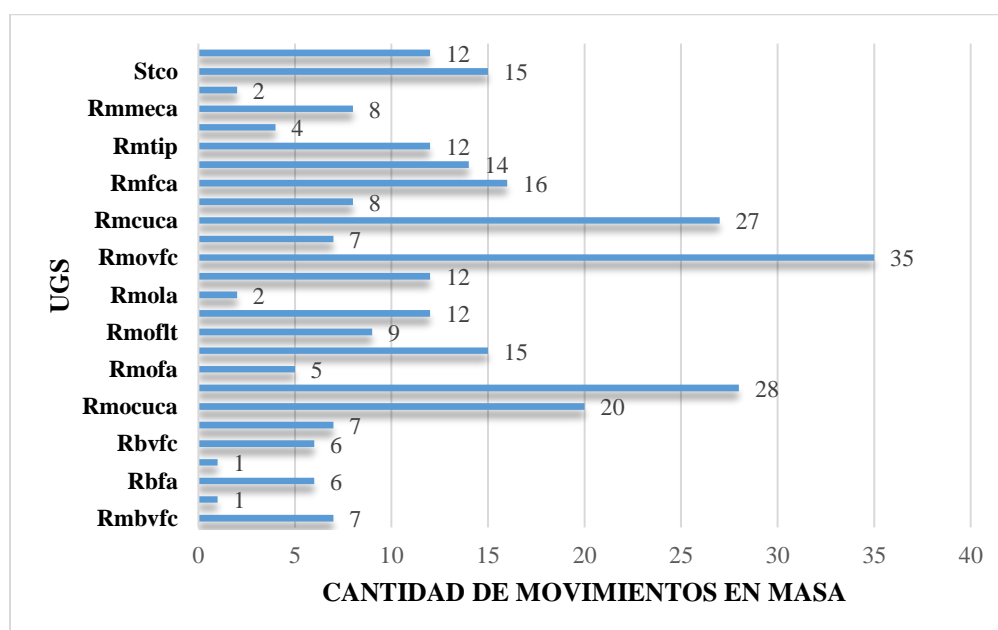
**Figura 14**

*Porcentaje de movimientos en masa presentados en las cuencas del río Perrillo, Gualí y Azufrado.*



**Figura 15**

*Distribución de los movimientos en masa según la UGS.*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Tabla 5***Cantidad de movimientos en masa según la Unidad Geológica Superficial.*

<b>CODIGO</b>	<b>NOMBRE UGS</b>	<b>CANTIDAD</b>
Rmbvfc	Roca de muy buena calidad volcánicas de la Formación Casabianca	7
Rbaip	Roca de buena calidad anfibolitas del intrusivo de Padua	1
Rbfa	Roca de buena calidad flujos andesíticos	6
Rbflt	Roca de buena calidad de flujo lahárico aterrazado	1
Rbvfc	Roca de buena calidad volcánicas de la Formación Casabianca	6
Rmoap	Roca de moderada calidad andesitas porfiríticas	7
Rmocuca	Roca de moderada calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	20
Rmoeca	Roca de moderada calidad esquistos del complejo Cajamarca	28
Rmofa	Roca de moderada calidad flujos andesíticos	5
Rmofca	Roca de moderada calidad filitas del complejo Cajamarca	15
Rmoflt	Roca de moderada calidad de flujo lahárico aterrazado	9
Rmofp	Roca de moderada calidad flujos piroclásticos	12
Rmola	Roca de moderada calidad lavas andesíticas	2
Rmotip	Roca de moderada calidad tonalitas del intrusivo de Padua	12
Rmovfc	Roca de moderada calidad volcánicas de la Formación Casabianca	35
Rmaip	Roca de mala calidad anfibolitas del intrusivo de Padua	7
Rmcuca	Roca de mala calidad cuarcitas del complejo Cajamarca	27
Rmeca	Roca de mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	8
Rmfca	Roca de mala calidad filitas del complejo Cajamarca	16
Rmfp	Roca de mala calidad flujos piroclásticos	14
Rmtip	Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo néisico de Padua	12
Rmmaip	Roca de muy mala calidad anfibolita del intrusivo de Padua	4
Rmmeca	Roca de muy mala calidad esquistos del complejo Cajamarca	8
Srfp	Suelo residual de flujo piroclástico	2
Stco	Suelo transportado coluvial	15
Sta	Suelo transportado aluvial	12
<b>TOTAL MOVIMIENTOS EN MASA</b>		<b>291</b>

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **8.3. Análisis Multitemporal**

De acuerdo con la información recolectada en el inventario de movimientos en masa, se realizó el análisis de la cantidad de eventos identificados con base a los años de ocurrencia, debido a que la mayoría de los registros maneja una precisión de dato en año. Como se puede evidenciar en la Figura 16 se destacan los datos de los años 2009, 2015, 2018 y 2022.

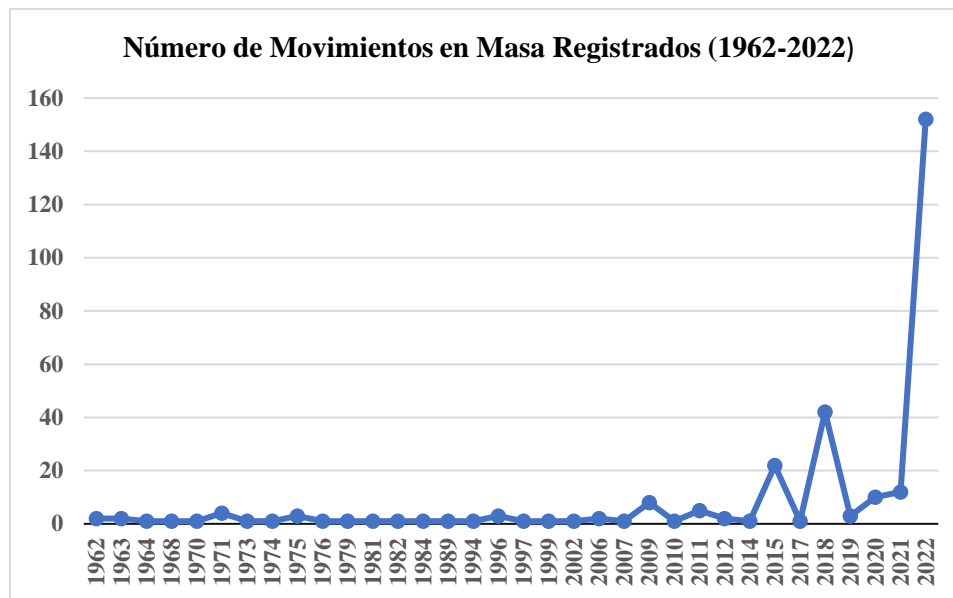
Es importante resaltar que los tres últimos años mencionados corresponden coinciden con los periodos de tiempo en los que se obtuvieron las imágenes satelitales para la fotointerpretación de la zona y el año en que se realizó la fase de campo del presente estudio.

De acuerdo con (Arenas & Benavides, 2023) se observó que entre 2020 y 2022 en Colombia se registraron precipitaciones que superaron al 20% de los promedios históricos registrados entre 1991 y 2020. De la misma forma, en el 2015 y 2018 fueron reportadas fuertes lluvias en diferentes municipios del departamento del Tolima por parte de medios locales. Por lo que podrían relacionarse la ocurrencia del fenómeno de la niña con el aumento de los patrones de precipitación, lo cual implica una mayor probabilidad de que se sature el suelo y por consiguiente aumente el riesgo de movimientos en masa, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### Figura 16

Diagrama con el número de Movimientos en Masa Registrados (1962-2022).



## 8.4. Factores Detonantes

### 8.4.1. Detonante Precipitación

Según los umbrales regionales de lluvia que establecieron (Gonzalez Yaruro & Padilla Gutierrez, 2023) para el área de estudio fueron de 45.5 para el período de los tres días previos y de 176.1 para los quince días antecedentes. Esto resalta que la acumulación de lluvia en los días anteriores ejerce una influencia más significativa en la ocurrencia de los movimientos en masa.

Dentro del inventario total de 54 movimientos en masa considerados, se identificaron 32 que excedieron estos umbrales. En consecuencia, al aplicar un modelo de Poisson a una serie de datos abarcando 47 años (1975-2021), se determinó que, para un período de retorno de 5 años, la probabilidad de que ocurra un evento es del 100%.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **8.4.2. Detonante sismo**

El estudio de investigación titulado "Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y su relación temporal-espacial con la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima" (Gonzalez Yaruro & Padilla Gutierrez, 2023) se enfocó en analizar la relación espacio-temporal de los sismos que actúan como detonantes de movimientos en masa. Esta evaluación se llevó a cabo considerando la magnitud mínima de  $M_w=4$ , según la propuesta de (Keefer, 2002), como criterio para la ocurrencia de un evento.

En el área de estudio, se identificó una correlación significativa entre un deslizamiento de tierra (denominado H\_16) que tuvo lugar el 13 de mayo de 1999 y un sismo registrado en la misma fecha con una magnitud de  $M_w=4.7$ . Este hallazgo permitió identificar la interacción de los factores detonantes, es decir, las precipitaciones y los sismos, en la generación de eventos de este tipo en el municipio de Herveo

### **8.5. Análisis morfométricos**

A partir del análisis morfométrico llevado a cabo para la región del municipio de Herveo, utilizando la metodología y ecuaciones descritas en Tabla 2, se evaluará cada parámetro morfométrico como parte de un estudio regional. Los resultados obtenidos de este análisis son los siguientes.

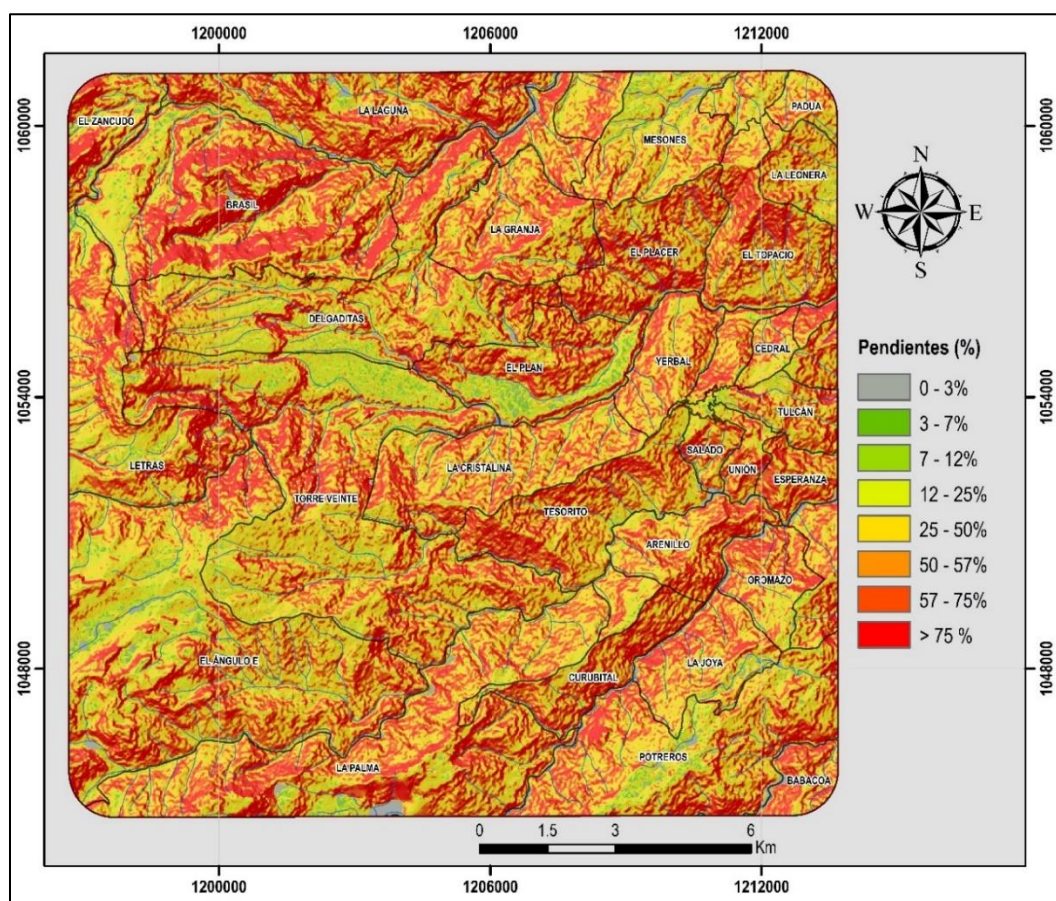
En la zona de estudio las áreas que se encuentran dentro del rango de pendientes de empinada a fuertemente escarpada (25% a >75%), suelen estar relacionadas con la ocurrencia de deslizamientos, flujos y caída de detritos y rocas; la intensa gravedad en estas pendientes puede superar la estabilidad de los materiales del suelo y la roca, desencadenando movimientos hacia abajo (**Anexo I**). Además, la erosión debilita estos materiales y reduce su cohesión, por lo tanto,

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

en áreas con pendientes pronunciadas la acumulación de material suelto en la parte superior de las laderas puede desencadenar deslizamientos cuando se vuelven inestables debido a la saturación del agua o cambios en las condiciones del suelo. En cuanto a las lluvias intensas en estas pendientes aumentan la saturación del suelo, lo que puede generar flujos de lodo y avalanchas de detritos. Los datos obtenidos muestran que predominan las pendientes empinadas a escarpadas ( $19^\circ$  a  $>40^\circ$ ) distribuidas en toda la región (Figura 17).

**Figura 17**

*Mapa de pendientes de la zona de estudio.*

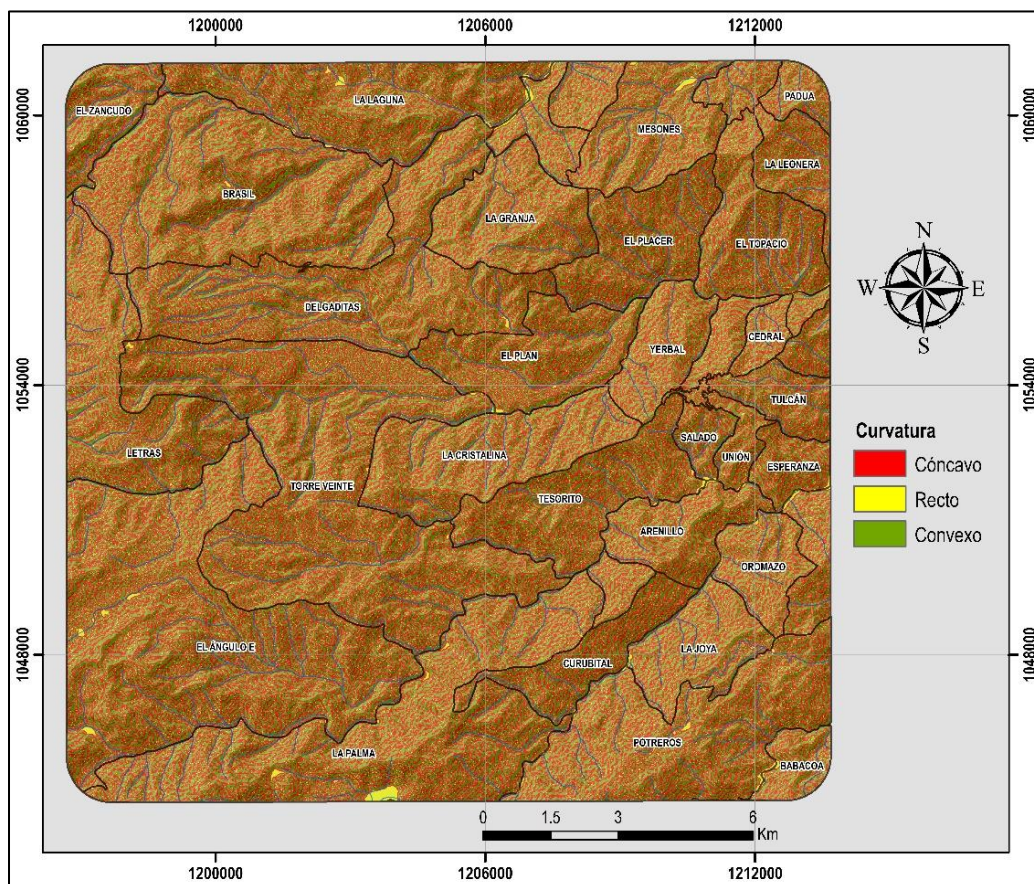


## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

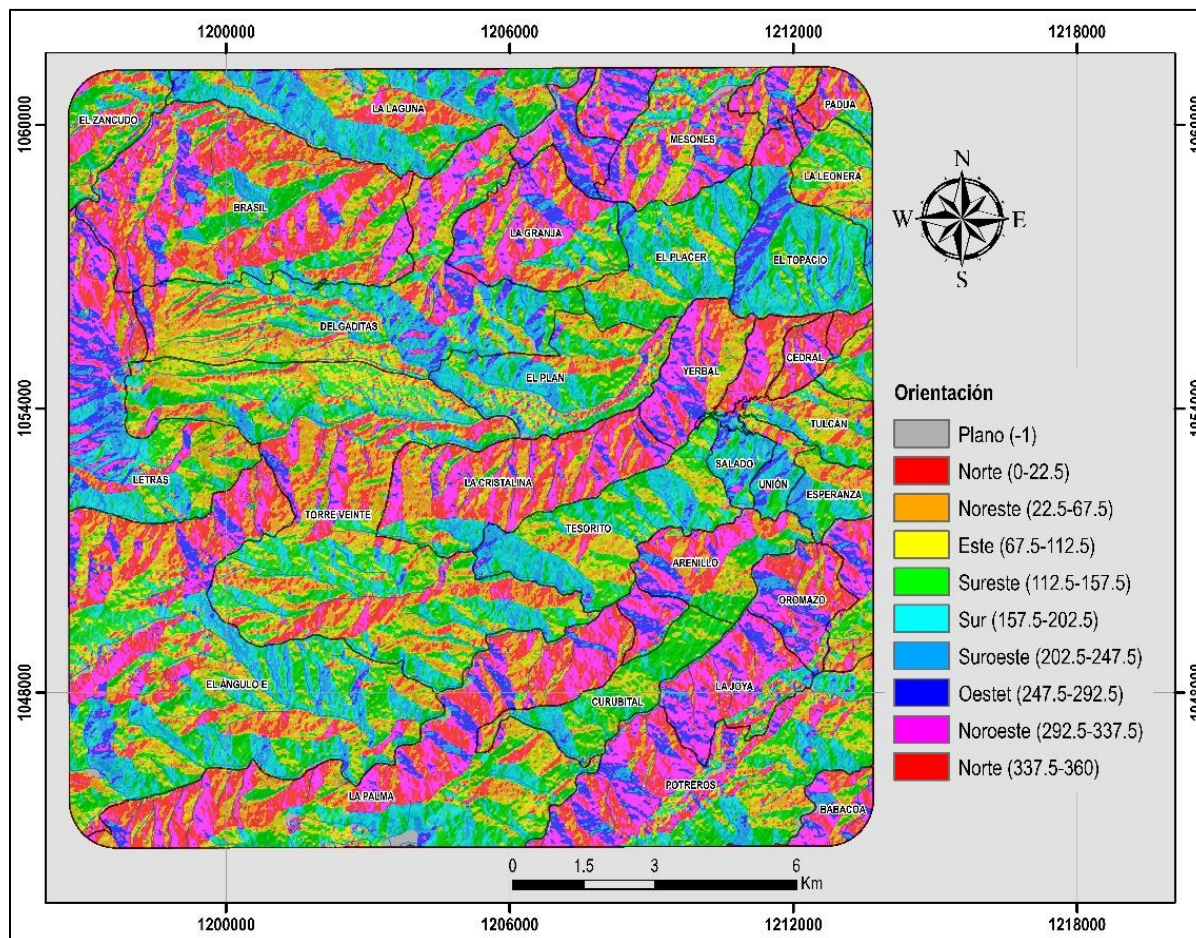
El índice de curvatura (Figura 18) ayuda a determinar la forma de las laderas, lo que permite clasificar en laderas cóncavas, rectas o convexas; las formas cóncavas concentran el líquido en la menor área posible y las formas convexas dispersan el líquido (**Anexo J**). Por lo tanto, la relación de la curvatura con la susceptibilidad por movimientos en masa consiste en la capacidad de concentración y captación de aguas lluvias, siendo un condicionante morfológico característico en la potencial generación de movimientos en masa. Según los resultados del estudio realizado, se observa que las laderas convexas predominan con un 53% del área total, las laderas cóncavas abarcan un 44%; mientras que las laderas rectas son equivalentes al 3%.

**Figura 18**

*Mapa de curvatura del plano.*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Figura 19***Mapa de orientación*

En la región, las laderas tienen una orientación similar hacia los cuatro puntos cardinales, pero en un 18% del área total, la pendiente principal se dirige hacia el sureste (**Figura 19**). Esta orientación específica expone estas laderas a una erosión más intensa debido a la combinación de la exposición solar y la dirección de la pendiente. Este proceso gradual debilita la ladera a través de la acción del agua, el viento y otros factores erosivos, lo que, a su vez, incrementa la probabilidad de que ocurran movimientos en masa (**Anexo K**).

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Tabla 6**

*Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Red de drenaje.*

Cuenca	Áreas total de la cuenca (A) (km <sup>2</sup> )	Perímetro (P) (km)	Perímetro Relativo (Pr)	Longitud del cauce principal (Km)	Longitud axial de la cuenca (Km)	Relación longitud - área (Lar)	Orden de drenaje (máx.)	Orden de drenaje total	Longitud total del drenaje (Ln) (km)	Radio de Bifurcación (Rb)					Coeficiente de forma (Rf)
										1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
<b>Río Perrillo</b>	258,09	107,47	2,40	45,23	33,43	39,19	5	836	411,47	2,04	2,55	1,93	0,42	_	0,23
<b>Río Gualí</b>	407,10	133,27	3,05	56,68	42,66	51,52	5	1311	684,67	2,44	1,63	1,04	2,40	_	0,22
<b>Río Azufrado</b>	427,99	106,60	4,01	60,92	35,11	53,09	6	1423	723,47	2,29	2,05	1,24	1,11	4,5	0,35

El parámetro de relación de bifurcación (Rb) (Tabla 6) describe la relación de cambio de cada orden de drenaje. Esta relación muestra que el río Perrillo (Rb, orden 2 y 3), el río Gualí (Rb, orden 1 y 2) y el río Azufrado (Rb, orden 5 y 6) se encuentra en el rango de coeficiente de bifurcación según flujo de detritos; en las tres cuencas los valores son bajos y se asocian con cuencas bien drenadas susceptibles a crecidas más violentas que aquellas que poseen un coeficiente de bifurcación alto. Tabla 6

**Tabla 7**

*Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Caracterización del relieve.*

Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas															
Caracterización del relieve															
Cuenca	Elevación media de la cuenca (m)	Pendiente media (o)	Pendiente media (%)	Relieve total de la Cuenca (m)	Relación de relieve (m)	Factor de asimetría (Af)	Coeficiente de Compacidad (Kc)	Coeficiente de masividad (Cm)	Coeficiente orografico (Co)	Relación de elongación (Re)	Radio circulatorio (Rc)	Simuosidad de frente montañoso (Smf)	Numero de rugosidad (Rn)	Numero de rugosidad de melón (MRn)	
<b>Río Perrillo</b>	2555,96	28,12	58,01	2894	86,57	19,47	1,87	9,90	0,03	0,54	0,28	1,64	4,61	0,18	
<b>Río Gualí</b>	2877,21	25,08	49,77	4381	102,70	44,12	1,85	7,07	0,02	0,53	0,29	1,73	7,37	0,22	
<b>Río Azufrado</b>	2972,59	23,85	47,12	4386	124,92	56,84	1,44	6,95	0,02	0,66	0,47	1,34	7,41	0,21	

Según el parámetro de factor de forma (Rf) propuesto por Horton (Horton, 1932), se determinó que tanto el río Perrillo como el río Gualí presentan una forma alargada en sus unidades

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

hidrográficas, lo que indica condiciones de baja probabilidad de ocurrencia de crecidas repentinas en los cauces (Tabla 7). En contraste, la unidad hidrográfica del río Azufrado exhibe una forma ligeramente alargada, lo cual puede aumentar su susceptibilidad a movimientos en masa debido a la concentración del flujo de agua y sedimentos en las secciones más pronunciadas de la cuenca.

Dentro de los parámetros utilizados para analizar la movilidad del flujo de drenaje en las unidades hidrográficas, se encuentra el parámetro de Densidad de Drenaje (Dd). Este parámetro se aplica a las cuencas de los ríos Perrillo, Gualí y Azufrado, y revela que presentan una baja densidad de drenaje. Esto indica que estas cuencas requieren más tiempo para desalojar el volumen de agua acumulado en su interior (Tabla 8)

**Tabla 8**

*Parámetros morfométricos calculados para todas las cuencas. Textura y flujo del drenaje - Análisis de movilidad.*

Cuenca	Densidad de drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	Frecuencia de flujo (Fs)	Textura de drenaje (T)	Coeficiente de torrencialidad (Ct)	Tiempo de concentración. Métodos (resultado en horas)									
					SCS - Ranser	California	Culvert	Practice (1942)	Kirpich (1942)	Témez (1978)	Giandotti	V.T Chow	Clark	ventura-Heron (1949)
<b>Río Perrillo</b>	1,59	3,24	5,16	1,62	2,33	3,60	0,47	3,36	0,22	2,78	4,26	3,25	0,69	2,33
<b>Río Gualí</b>	1,68	3,22	5,42	1,62	2,58	3,98	0,52	3,87	0,23	2,97	5,32	3,74	0,80	2,67
<b>Río Azufrado</b>	1,69	3,32	5,62	1,67	2,80	4,32	0,54	4,02	0,22	3,13	5,35	3,89	0,80	2,79

El coeficiente de Compacidad (Kc) significa que las tres cuencas tienen formas de cuenca oval-redonda a rectangular-oblonga, esto indica que el río Perrillo y el río Gualí al presentar índices

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

más lejanos a la unidad no concentrará fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, por otra parte, el Kc del río Azufrado indica que presenta peligros torrenciales.

El coeficiente de masividad ( $C_m$ ) revela una tendencia hacia un relieve moderadamente montañoso en las cuencas analizadas, siendo el río Perrillo la cuenca que muestra los coeficientes más altos en este parámetro. El parámetro de coeficiente orográfico ( $C_o$ ) presenta un comportamiento similar para todas las cuencas, con relieves poco accidentados, cuencas extensas, y su potencial de degradación es bajo.

La relación de elongación ( $R_e$ ) describe una tendencia hacia cuencas alargadas a muy alargadas. A su vez, este parámetro indica un retraso en la concentración de la esorrentía debido a la longitud del cauce, lo que genera una alta probabilidad de flujo torrencial cuando el cauce alcanza su nivel máximo de concentración (Valencia Ortiz & Martínez Graña, 2023). La relación de Circularidad ( $R_c$ ) proporciona información sobre la capacidad de una cuenca para evacuar el agua de esorrentía y se calcula en función del área de la cuenca. Los coeficientes obtenidos revelan una tendencia hacia cuencas de forma intermedia a ligeramente alargada. Específicamente, las cuencas de los ríos Perrillo y Gualí presentan coeficientes más bajos, lo que implica un retraso en la concentración de la esorrentía debido a la longitud del cauce.

El parámetro de Sinuosidad de frente montañoso ( $S_{mf}$ ) revela que todas las cuencas se encuentran en estado activo. Tanto las cuencas del río Perrillo como del río Gualí muestran coeficientes que indican un frente de montaña moderadamente activo. En cambio, la cuenca del río Azufrado exhibe coeficientes muy bajos, lo que sugiere una mayor actividad del frente montañoso en los procesos de meteorización y erosión.

La curva hipsométrica es un parámetro de gran importancia en la evaluación morfométrica de las cuencas, ya que está relacionada con el estado de erosión del cauce. Es fundamental

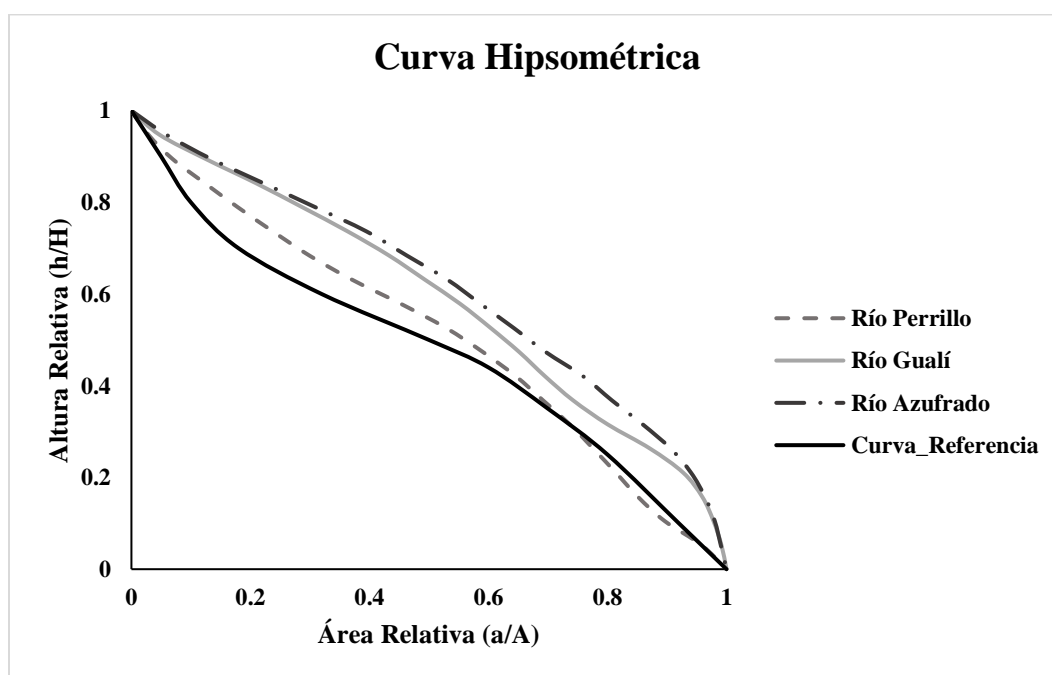
## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

comprender cómo se distribuye el área de una cuenca en diferentes niveles topográficos para poder comparar las características de almacenamiento y flujo en dicha cuenca. Con el fin de analizar todas las cuencas, se llevó a cabo una normalización de los datos, superponiendo las tendencias. En la construcción y la interpretación de las curvas, se consideró como referencia el estado maduro, representado por una línea continua de color negro (Figura 20). Con la construcción y evaluación de las curvas hipsométricas se describen tres condiciones:

(1) Cuencas en estado juvenil, donde existe un gran potencial de erosión (socavamiento del fondo del lecho), (2) Cuencas en estado maduro, donde existe equilibrio (socavamiento de fondo y lateral), y (3) Cuencas en estado senil, donde ocurren condiciones de deposición lateral y socavamiento (Strahler, 1952).

### Figura 20

*Curvas hipsométricas de las cuencas estudiadas.*



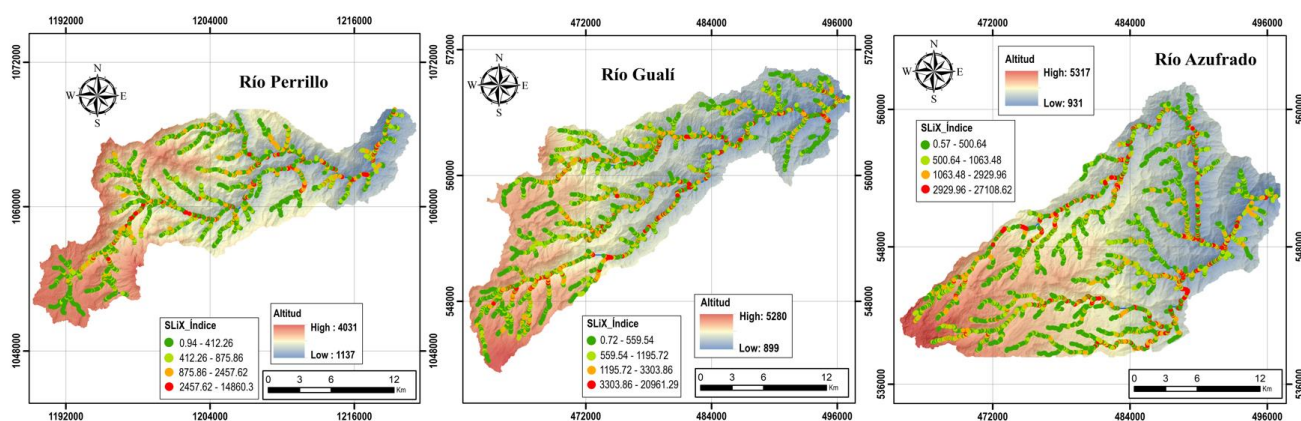
## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Con estas condiciones, se observa que las cuencas Río Azufrado y Río Gualí presentan Condición 1 en el cual se observan semejanzas con las curvas hipsométricas típicas de cuencas en fase de desequilibrio (juventud), generalmente con gran potencial erosivo, a excepción del Río Perrillo que presenta una fase de transición entre condición 1 y 2, esto demuestra que se encuentra en proceso de profundización para alcanzar un equilibrio de cauces. Además, cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, ello puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos.

El parámetro Índice del gradiente del perfil longitudinal del cauce del río (SL) o parámetro Índice de Hack cuantifica las condiciones geomorfológicas dentro de las causas (picos en la dinámica de erosión) que se han visto afectadas por la actividad tectónica, erosión diferencial de rocas y procesos de inestabilidad de taludes. Su implementación en este tipo de estudios ayuda a detectar “knickzones” que son los puntos de inflexión en el perfil longitudinal de la corriente (forma típica: cóncava hacia arriba) (Piacetini, Troiani, Servizi, Nesci, & Veneri, 2020).)

**Figura 21**

*Índice de gradiente de longitud de corriente (SL) para cada cuenca hidrográfica.*



## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Como resultado de este análisis se pueden describir procesos activos de los taludes (deslizamientos) que pueden interactuar directamente con el cauce del río, así como la presencia de estructuras geológicas y afectación de la forma de los cauces (Piacetini, Troiani, Servizi, Nesci, & Veneri, 2020) (Figura 21) Teniendo en cuenta lo anterior, se determina que:

1. El río Perrillo presenta una notable cantidad de “knickzones” en su tramo medio e inferior de la cuenca, y esta característica puede estar vinculada a la existencia de la falla cubierta Brasil en la zona. Esta concentración elevada de “knickzones” en dicha área hace que sea más propensa a experimentar procesos erosivos en su lecho, lo que a su vez aumenta la posibilidad de desencadenar eventos de flujos torrenciales.

2. El río Gualí presenta una significativa concentración de “knickzones” en la parte superior de su cuenca. Este fenómeno se encuentra relacionado con diversos factores, como el comportamiento estructural, principalmente asociado a la presencia de la falla Palestina, así como diferencias altitudinales y cambios en la litología.

3. El río Azufrado presenta una marcada concentración de “knickzones” en la parte inferior de la cuenca y en la zona donde ocurre un cambio en la dirección del curso del drenaje. Este fenómeno está relacionado con la cinemática de la Falla de Palestina.

El análisis de este parámetro morfométrico revela la existencia de áreas de concentración sectorizada, como se describió previamente. Estas áreas indican una mayor susceptibilidad a procesos de erosión, tanto lateral como vertical, que son controlados por diversos factores, como aspectos estructurales y cambios litológicos. La influencia predominante en estas áreas de concentración está relacionada con el sistema de fallas la Palestina, el cual ejerce un fuerte control sobre los procesos morfodinámicos. La actividad tectónica a lo largo de esta falla ha generado deformaciones estructurales significativas en la región, lo que se traduce en cambios bruscos en la

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

topografía y en la morfología de los ríos. Estos cambios estructurales favorecen la formación de “knickzones”, que son zonas de transición abrupta en el perfil del río. Además, las variaciones en la composición y la dureza de las capas de roca a lo largo del cauce del río pueden crear condiciones donde el agua erosiona más rápidamente ciertas áreas, lo que desempeñan un papel importante en la formación de “knickzones”. La predominancia de rocas ígneas y metamórficas, que constituyen aproximadamente el 91% de las formaciones rocosas en la zona estudiada, desencadena procesos de erosión diferencial. Las “knickzones” son áreas del río donde la pendiente del lecho experimenta cambios abruptos debido a esta erosión diferencial, resultante de la presencia de rocas ígneas y metamórficas con diferentes niveles de resistencia en el lecho del río. Las rocas menos resistentes (blandas) se erosionan con mayor rapidez, originando obstáculos naturales que impactan tanto en el flujo del agua como en el paisaje circundante.

El resultado del número de rugosidad ( $R_n$ ) indica que tanto el Gualí como la cuenca del río Azufrado tienen una alta complejidad estructural, lo que significa que su terreno presenta una amplia variedad de características geomorfológicas. Esta diversidad topográfica puede aumentar la susceptibilidad de la región a procesos erosivos, ya que la topografía irregular puede influir en la circulación del agua y en la sedimentación. Por el contrario, la cuenca del río Perrillo presenta el coeficiente más bajo. Finalmente, el número de rugosidad de Melton ( $MR_n$ ) muestra el índice relacionado con la acumulación y resistencia del flujo simple de una cuenca, que a su vez describe la susceptibilidad para generar diferentes tipos de flujo (Melton, 1965). Del resultado de  $MR_n$  se interpreta que las tres cuencas son propensas a generar flujos con bajo contenido material.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### 9. Conclusiones

La recopilación de información para el estudio de procesos morfodinámicos abarcada desde una amplia gama de fuentes de datos (imágenes captadas por sensores remotos, informes procedentes del SIMMA, tomas de imágenes realizadas mediante los drones Phantom 4 RKT DJI y DJI Mavic 2 Pro y observaciones in situ durante el trabajo de campo) permitió revelar que aproximadamente el 82% de los eventos fueron documentados como resultado del trabajo de investigación, mientras que solo el 18% fue reportado a través del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). Los análisis realizados permitieron identificar que el movimiento en masa predominante en el municipio son los deslizamientos, de subtipo traslacional, representando un total de 195 eventos registrados; estos eventos comprenden edades aproximadas entre 1 a 10 años, con una distribución retrogresiva, y la mayor causa inherente se relaciona con la meteorización física y química del material, material colapsible y material fisurado o agrietado. Es relevante resaltar que el 84.54% de los movimientos en masa registrados siguen activos actualmente y, por lo tanto, aún constituyen una amenaza en curso tanto para la población como para la infraestructura local.

Las fechas registradas en los reportes históricos obtenidos del SIMMA indican que en el año 2009 ocurrió el mayor número de eventos de movimientos en masa en el área de estudio, además, se ha observado un período estimado de actividad destacada que abarca desde 2015 hasta 2023, durante el cual se han producido o reactivado la mayoría de estos eventos. El movimiento en masa más antiguo documentado en este estudio se remonta al año 1962 y, hasta la fecha de esta investigación, se encuentra inactivo.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

El análisis morfométrico reveló una clara relación entre la topografía, la erosión, las condiciones climáticas y la morfología de las laderas como factores clave que influyen en la susceptibilidad a los movimientos en masa en la zona de estudio. En particular, las pendientes empinadas a fuertemente escarpadas de la región son condicionantes debido a los efectos de la gravedad, que supera la estabilidad de los materiales del suelo y la roca. Otro condicionante morfológico resulta ser las laderas con curvatura convexa las cuales dispersan el líquido y las laderas cóncavas que concentran el líquido en la menor área posible. Sumado a eso, la orientación sureste que presenta el 18% de las laderas de la región se exponen a una erosión más intensa debido a la combinación de la exposición solar y la dirección de la pendiente, debilitándola gradualmente.

El análisis morfométrico de las cuencas de los ríos Perrillo, Gualí y Azufrado mostró que, en general, estas cuencas tienen bajas posibilidades de generar caudales torrenciales. Sin embargo, en las zonas de menor elevación, se observa una meteorización significativa, que da lugar a depósitos hidrogravitatorios en los márgenes de los cauces. Estos depósitos pueden aportar material que incrementa el riesgo de formación de caudales torrenciales. Además, se identifican áreas propensas a otros tipos de movimientos en masa, como deslizamientos, que representan una amenaza en la región. De forma que, de los eventos registrados en el inventario, el 58% de ellos se ubicaron en la cuenca del Río Gualí y el 41% en la cuenca del Río Perrillo. Se produjeron principalmente en la Roca dura sedimentitas volcanogénicas de la Formación Casabianca lo que respalda los hallazgos del análisis morfométrico al confirmar la existencia de áreas propensas a estos eventos en estas cuencas.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

### **10. Recomendaciones**

Durante el desarrollo de este trabajo, uno de los principales desafíos fue la adquisición de imágenes satelitales con una resolución espacial y espectral adecuada para la zona de estudio seleccionada. Aunque existen imágenes satelitales de mejor calidad y resolución, la mayoría de ellas no son de acceso libre y requieren pago o son propiedad de entidades privadas. Sin embargo, cuando se tiene la oportunidad de acceder a estas imágenes de alta calidad, se recomienda aprovecharlas, ya que ofrecen la posibilidad de llevar a cabo investigaciones con mayor nivel de detalle gracias a su mejor resolución espacial y espectral. Asimismo, seleccionar imágenes con un amplio rango de tiempo y fechas consecutivas mejorará la precisión del estudio, especialmente en el análisis de cambios en la cobertura vegetal.

Los procesos morfodinámicos identificados en este estudio pueden utilizarse como insumo fundamental en el estudio básico aplicado para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa a una escala de 1:25.000, considerándolos como un factor condicionante.

La región del municipio de Herveo ha sido objeto de un estudio limitado hasta el momento respecto a los movimientos en masa, lo que resalta la necesidad de futuras investigaciones. Sin embargo, este avance inicial representa un punto de partida y base para los estudios de gestión del riesgo y apoyo del EOT correspondiente de la zona.

Es importante resaltar que este proyecto nace a partir de un seminario de investigación en dónde se desarrollaron de manera simultánea otros tres trabajos de investigación complementarios enfocados en la misma zona. Por tal motivo, se recomienda consultar dichas publicaciones para obtener una visión más amplia, completa e interdisciplinaria de los temas abordados.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

Trabajos de investigación complementarios:

- 1) “Seminario de investigación: Análisis de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000 aplicando la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano del 2017”.
- 2) “Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima”.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

**Referencias Bibliográficas**

- Abboud, I., & Nofal, R. (2017). Morphometric analysis of wadi Khumal basin, western coast of Saudi. *Journal of African Earth Sciences*, 58-74.
- Alcaldía Herveo Tolima. (2022). *Informe Técnico de eventos de riesgo presentados en el municipio de Herveo por lluvias vía Herveo - Delgaditas*. Tolima: Secretaria de Planeación e Infraestructura (CMGRD).
- Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). *Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), Informe técnico de estudios biofísicos*. Diagnostico Técnico, Herveo, Tolima.
- Arango Palacio, E., Chica Martínez, P. A., & Robayo Jara, C. F. (2017). *Caracterización geomorfológica y morfométrica del volcán Cerro Bravo, Tolima - Colombia*. Manizales: Tesis de especialista, Universidad de Manizales.
- Arenas, M. C., & Benavides, J. C. (2023). Colombia: entre la Niña y el Niño. *Pesquisa Javeriana*.
- Concejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD). (2021). *Plan municipal de gestión del riesgo de desastres*. Técnico, Herveo, Tolima.
- Consejo Municipal Para la Gestión de Riesgo de Desastres (CMGRD). (2021). *Plan Municipal de Gestión de Desastres*.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Washington D.C.
- Doranti, C., Hackspacher, C., De Souza, D., & Siqueira, M. (2014). The Use of the Stream Length-Gradient Index in Morphotectonic Analysis of Drainage Basins in Poços de Caldas Plateau, SE Brazil. *International Journal of Geosciences* 5(11), 1383-1394.
- Gonzalez Yaruro, A. G., & Padilla Gutierrez, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinalli, M., Fiorucci, F., Santagelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews* Vol 112, 42-66.
- Hack, J. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 421-429.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Advancing Earth and Space Science*, 350 - 361.
- IDIGER. (08 de 02 de 2022). *Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático*. Obtenido de Caracterización General del Escenario de Riesgo: <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- INGEOMINAS. (2001). Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Colombia.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

- Keefer, D. K. (2002). Investigating Landslides Caused by Earthquakes – A Historical Review. *Surveys in Geophysics*, 473 - 510.
- Keller, E., & Pinter, N. (2002). Geomorphic Indices of Active Tectonics . En E. Keller, & N. Pinter, *Active Tectonics Earthquakes, Uplift, and Landscape* (págs. 122-149). New Jersey: Prentice Hall.
- Melton, M. A. (1965). The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. *The Journal of Geology Vol 73*, 1-38.
- Morales Alvis, C. A. (2019). *Factores geomorfológicos asociados con la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa. Vereda EL Tobo, en Timaná - Huila*. Bogotá D.C: Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás.
- Mullet Baracaldo, M. L., & Ortiz Galvis, J. C. (2014). *Gestión del riesgo al diagnóstico integral de líneas de tubería de transporte de productos refinados y/o crudo del poliducto Puerto Salgar - Cartago (Sector de tubería Padua - Herveo, K83 al K91), Departamento de Tolima*. Bucaramanga, Colombia: Tesis. Esp. Geotecnia Ambiental, Universidad Industrial de Santander.
- Piacetini, D., Troiani, F., Servizi, T., Nesci, O., & Veneri, F. (2020). SLiX: A GIS Toolbox to Support Along-Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length-Gradient (SL) Index. *International Journal of Geo-Information*.
- PMA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA). (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional.
- Rai, P., Mohan, K., Misha, S., Ahmad, A., & Mishra, V. (2017). A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India. *Applied Water Science*, 217-232.
- Ramírez Calderón, M., & Tejada Vanegas, J. (2020). *Morfometría y marcadores geomorfológicos del abanico aluvial asociado a la Quebrada Campanas, Antioquia, Colombia*. . Medellín.
- Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED). (06 de 2022). *Sistema de inventario de efectos de desastres - DesInventar*. Obtenido de Sistema de inventario de efectos de desastres - DesInventar: <https://db.desinventar.org/DesInventar/results.jsp>
- Sánchez Gomez, R. S., & Berrio Morales, C. F. (2019). *Análisis de susceptibilidad a movimientos de masa mediante la modelación con un SIG en la cuenca Río Blanco, la Calera*. Bogotá, D.C, Colombia: Tesis. Ing. Civil, Universidad de la Salle.
- Schuster, R. L. (1996). Socioeconomic significance of landslides. En T. R. 247, *Landslides Investigation and Mitigation* (págs. 129-177). National Research Council.
- Secretaría de planeación e infraestructura. (2022). *Informe primer trimestre gestión del riesgo de desastres 2022*. Herveo, Tolima: Alcaldía de Herveo, Tolima.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

- Selby, M. J. (1993). *Hillslope Materials and Process*. Oxford University Press.
- SGC. (1993). *Estudio Geológico Geotécnico de Identificación de Amenazas Geológicas en 20 Cabeceras Municipales del Departamento del Tolima. Ambalema, Villarrica, Armero – Guayabal, Ataco, Flandes, Casabianca, Coello, Anzoátegui, Falán, Chaparral, Fresno, Herveo, Honda. Bogotá D.C.* Obtenido de <https://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=10090>
- SGC. (2012). *Formato Modificado Para Inventario de Movimientos en Masa*. Obtenido de [https://recordcenter.sgc.gov.co/B21/GmfMM51\\_Lorica/Documento/Nativos/Apoyo/Anexos/Anexo\\_B.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B21/GmfMM51_Lorica/Documento/Nativos/Apoyo/Anexos/Anexo_B.pdf)
- SGC. (2014). *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 206 Manizales*. Sogamoso: Imprenta.
- SGC. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000*. Bogotá D.C., Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- SGC. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Bogotá D.C: Imprenta.
- Sidle, R., & Ochiai, H. (2006). Landslides: Processes, Prediction, and Land Use. *Water Resources Monograph Series*.
- SIMMA - SGC. (06 de 2022). *Sistema de información de Movimientos en Masa (SIMMA)*. Obtenido de Sistema de información de Movimientos en Masa (SIMMA): <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- Smith, K. G. (1950). Standards for Grading Texture of Erosional Topography. *American Journal of Science*, 655-668.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *GSA Bulletin*, 1117–1142.
- Troiani, F., Galve, J., Piacenti, D., Della, M., & Guerrero, J. (2014). Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: a case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology*, 183-197.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). (2021). *Movimientos en Masa en Colombia, ¿dónde ocurren y cuáles son sus principales causas?* Obtenido de Movimientos en Masa en Colombia, ¿dónde ocurren y cuáles son sus principales causas?: [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/32893/MovimientosMasa\\_Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20factores%20detonantes%20son%20las,intervenci%C3%B3n%20antr%C3%B3pica%20y%20los%20sismos](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/32893/MovimientosMasa_Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20factores%20detonantes%20son%20las,intervenci%C3%B3n%20antr%C3%B3pica%20y%20los%20sismos)
- Valencia Ortiz, J. A., & Martínez-Graña, A. M. (2023). *Morphometric Evaluation and Its Incidence in the Mass Movements Present in the Chicamocha Canyon, Colombia*.
- Valencia Ortiz, J., & Martínez Graña, A. (2023). Morphometric Evaluation and Its Incidence in the Mass Movements Present in the Chicamocha Canyon, Colombia. *Sustainability*, 1140.

## TRABAJO DE GRADO MOVIMIENTOS EN MASA, HERVEO

- Valencia Ortiz, J., & Martínez, A. (2018). *A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia)*. Geomatics, Natural Hazards and Risk.
- Varnes, D. (1978). *Slope Movement Type and Processes*. Washington DC: Transportation Research Board.
- World Health Organization [WHO]. (2019). *World Health Organization* . Obtenido de [https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/landslides#tab=tab_1)
- Zieher, T., Perzl, F., Rossel, M., Rutzinger, M., Meißl, G., Markart, G., & Geitner, C. (2016). A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility – Two test cases in Vorarlberg, Austria. *Geomorphology Vol 259*, 40-54.