

**Análisis de movimientos en masa mediante la aplicación de SIG en la ciudad de  
Villavicencio en el sector cerro de Buenavista**



**Manuel Felipe Guataquira Rojas**

**Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Civil  
Villavicencio,  
Mayo  
2018**

**ANALISIS DE MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
SIG EN LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO EN EL SECTOR CERRO DE  
BUENAVISTA**

**Manuel Felipe Guataquira Rojas**

Trabajo de grado como requisito para optar el título de **Ingeniero Civil**

Director

**William Fernando Duarte Delgado**

**Geólogo**

**Universidad Santo Tomás**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Villavicencio,**

**Mayo**

**2018**

**AUTORIDADES ACADEMICAS**

**P. FRAY JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMNCA, O.P.**

Rector General

**P. FRAY MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. FRAY JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. FRAY FERNANDO CAJICÁ GAMBOA O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**Esp.JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**Ph.D..JHON JAIRO GIL PELÁEZ**

Decano Facultad Ingeniería Civil

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

**FIRMA JOHN JAIRO GIL PELÁEZ**

Decano de Facultad

---

**FIRMA WILLIAM FERNANDO DUARTE DELGADO**

Director Trabajo de Grado

---

**FIRMA GERMÁN ERNESTO CHICANGANA MONTÓN**

jurado

Villavicencio, 16 de MAYO de 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia por el apoyo en todo este proceso de formación profesional, que me permitieron realizar un logro más en mi vida, gracias a ellos porque creyeron en mí y siempre estuvieron a mi lado en todo este tiempo. También quiero resaltar la labor de mi director de tesis geólogo William Fernando Duarte que me brindó las herramientas y los conocimientos para poder realizar este trabajo, con su paciencia y perseverancia se logró finalizar este trabajo de grado.

A la universidad Santo Tomas sede Villavicencio por permitirme ser parte de ellos, que con su misión y visión de formación académica han implantado en mí grandes valores éticos y saberes, gracias a ellos por brindar el apoyo académico para poder realizar este trabajo ya que también es un producto de ellos.

Agradecer a los compañeros y amigos que estuvieron en mi proceso académico, porque en todas las situaciones positivas y negativas siempre brindaron un apoyo para superar cualquier adversidad.

## **RESUMEN**

El objetivo principal de este estudio es realizar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del sector Cerro de Buenavista, mediante el uso de los sistemas de información geográfica SIG, realizando una ponderación de los factores condicionantes para la generación de movimientos en masa como la geomorfología, geología, uso del suelo e hidrología. Se realizó una calificación individual de cada variable, y posteriormente se hizo una evaluación de todas las factoras para encontrar las áreas con menor y mayor susceptibilidad de presentarse un fenómeno de remoción en masa.

El sector Cerro de Buenavista tiene una geomorfología definida por estructuras geológicas de formación denominadas Brechas de Buenavista, además de presentar un sistema de fallas como El Mirador, Villavicencio – Colepato y Servitá, los cuales se encuentran activos y combinados con las pendientes inclinadas, la erosión del suelo y la hidrología característica de la zona ha generado áreas con una alta susceptibilidad en los puntos más altos, que se desencadenan en las zonas bajas de la montaña.

***Palabras Clave:*** *Susceptibilidad, geomorfología, Geología, SIG, Evaluación de variables.*

## **ABSTRACT**

The meaning of this job is to realize the susceptibility landslide map of Cerro de Buenavista sector, by using Geographical Information System, realizing a weighting of factors such as geomorphology, geology, land use and hidrology. First, an individual qualification of each factor was realized, and then was done evaluation of the join factors to find areas with less and more susceptibility for landslide movements present.

The Cerro de Buenavista sector presents a geomorphology limited for a structural formation geology named Brechas de Buenavista, this zone also presents geological faults such as El Mirador, Villavicencio – Colepato and Servita, they are active and combined with steep slopes, soil erosion and hidrology have made areas with high susceptibility in the highest points that develop in the lower points.

**Key Word-** Susceptibility, geomorphology, geology, GIS, weighting factors.

## **TABLA DE CONTENIDO**

_Toc514422305	
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
TABLA DE CONTENIDO	8
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Motivación y Formulación Del Problema	15
1.2 Finalidad	16
1.2.1. Objetivo General	16
1.2.2. Objetivo Específicos	16
1.3 Aportes del Trabajo	16
1.4 Organización del Documento	17
Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA	18
2.1. Marco Teórico	18
2.2. Marco Legal	21
2.3. Estado del Arte	22
Capítulo 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
3.1. Geomorfología	24
3.1.1. Morfogénesis	25
3.1.2. Morfometría	25
3.1.3. Morfodinámica	27
3.2. Geología	28
3.2.1. Resistencia de la roca	28
3.3. Suelo	29
3.3.1. Cobertura vegetal	29
3.3.2. Índice Topográfico de Humedad ITH	30
3.4. Evaluación de variables	30
3.5. Descripción de los productos finales	31
Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	32
4.1. Geomorfología	32
4.2. Geología	39

4.3. Suelo	42
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Trabajos Futuros	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXOS	53

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 2- 1 Nomenclatura para la geomorfología.....	19
Tabla 2- 2 Clasificación de los movimientos en masa de Varnes. ....	20
Tabla 3- 1 Rango de clasificación de la pendiente .....	26
Tabla 3- 2 Calificación de la rugosidad.....	26
Tabla 3- 3 Propuesta de calificación.....	28
Tabla 3- 4 Categorías de resistencia a la compresión.....	29
Tabla 4- 1 Tabla de clasificación y calificación de la Geomorfología. ....	33
Tabla 4- 2 Tabla de clasificación y calificación para el factor pendiente .....	35
Tabla 4- 3 Tabla de clasificación y calificación del factor curvatura.....	36
Tabla 4- 4 Tabla de clasificación y calificación de la rugosidad.....	37
Tabla 4- 5 Tabla de clasificación y calificación de la resistencia de la roca .....	41
Tabla 4- 6 Tabla de clasificación y calificación Suelo por el factor ITH.....	43
Tabla 4- 7 Tabla de clasificación y calificación de cobertura vegetal.....	44

## **LISTADO DE FIGURAS**

Figura 1- 1 Ubicación área de estudio Fuente .....	14
Figura 1- 2 Localización general del área de estudio. ....	15
Figura 3- 1 Esquema metodológico para la generación del mapa de susceptibilidad .....	24
Figura 3- 2. Curvatura de perfil. ....	27
Figura 3- 3 Curvatura de plano.....	27
Figura 4- 1 Deslizamientos en el área de estudio .....	32
Figura 4- 2 Distribución de geoformas presentes en la zona de estudio .....	34
Figura 4- 3 Representación porcentual de áreas con susceptibilidad por pendiente. ....	35
Figura 4- 4 Distribución de la susceptibilidad por Curvatura .....	36
Figura 4- 5 Representación porcentual de áreas susceptibles por curvatura .....	36
Figura 4- 6 Mapa de rugosidad del terreno.....	37
Figura 4- 7 Cono de deyección en el área de estudio .....	38
Figura 4- 8 Deslizamientos en la zona de estudio .....	39
Figura 4- 9 Características principales de la formación Brechas de Buenavista.....	40
Figura 4- 10 Mapa susceptibilidad por Geología .....	41
Figura 4- 11 Mapa de cobertura vegetal. ....	42
Figura 4- 12 Distribución de la cobertura vegetal. ....	43
Figura 4- 13 Vegetación existente en la zona de estudio. ....	44
Figura 4- 14 Mapa susceptibilidad Suelo. ....	44
Figura 5- 1 Representación porcentual de los niveles de susceptibilidad por Geomorfología.....	45
Figura 5- 2 Mapa susceptibilidad por movimientos en masa .....	46

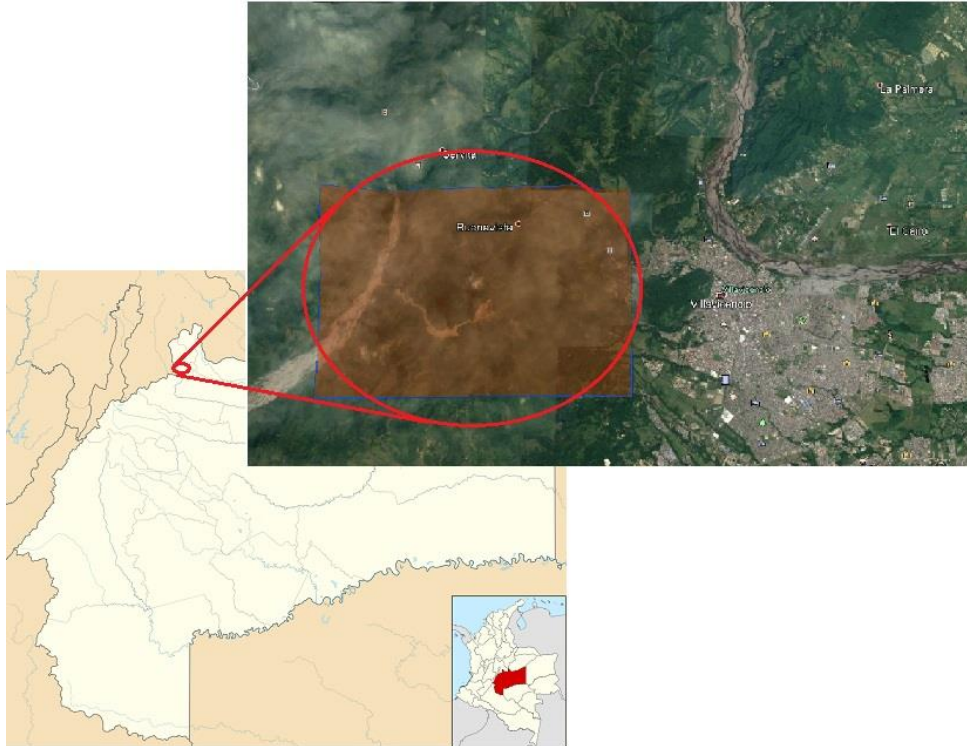
## **LISTADO DE ANEXOS**

Anexo A Mapa de pendientes.....	53
Anexo B Mapa de Curvatura.....	54
Anexo C Mapa de Rugosidad.....	55
Anexo D Mapa de geomorfología .....	56
Anexo E Mapa de ITH.....	57
Anexo F Mapa de Geología.....	58
Anexo G Susceptibilidad por Geología.....	59
Anexo H Mapa susceptibilidad geomorfología.....	60
Anexo I Mapa susceptibilidad Suelo.....	61
Anexo J Mapa de susceptibilidad de movimientos en masa .....	62

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

Los movimientos en masa han ocasionado grandes catástrofes en Colombia, lo que ha generado el interés por estudiar estos eventos, ya que gran parte del país se encuentra sobre la cadena montañosa Cordillera de los Andes. Esto hace que las ciudades que se han desarrollado cerca o dentro de ese sistema de montañas, sean más susceptibles a que se generen movimientos en masa dentro de sus territorios, por lo cual se hace necesario analizar esas zonas para elaborar planes de prevención y mitigación sobre el riesgo por eventos de remoción en masa.

La mayoría de los movimientos en masa ocupan áreas de gran extensión, dificultando el estudio de los movimientos en masa en campo, además de que los factores intrínsecos y externos que propician la generación de esos desplazamientos de tierra están relacionados a la geomorfología, geología y el suelo, variables que necesitan de vistas áreas para su mejor comprensión. Empero, el avance de los Sistemas de Información Geográfica ha facilitado el procesamiento y análisis de información del terreno sobre el cual se desarrollan estos eventos, a través de la utilización de sensores remotos y software, el análisis de datos en los SIG permite generar modelos del terreno y los eventos de remoción en masa con insumos de información geológica, geomorfológica, uso de suelo entre otras sobre el área a analizar. Es por esto que mediante la aplicación de los SIG se elabora este documento, en el que se estudia para la ciudad de Villavicencio el sector Cerro de Buenavista, parte alta de la ciudad, localizada sobre la Cordillera Oriental la susceptibilidad a generarse movimientos en masa. El área de estudio comprende 37.5 km<sup>2</sup> situados en el área rural de la ciudad, referenciada por las coordenadas planas: NE: x: 1039057,641 – y: 953401,586, NW: x: 1046557,641 – y: 953401,586, SW: x: 1039057,641 – y: 948401,586 y SE: x: 1046557,641 – y: 948401,586.



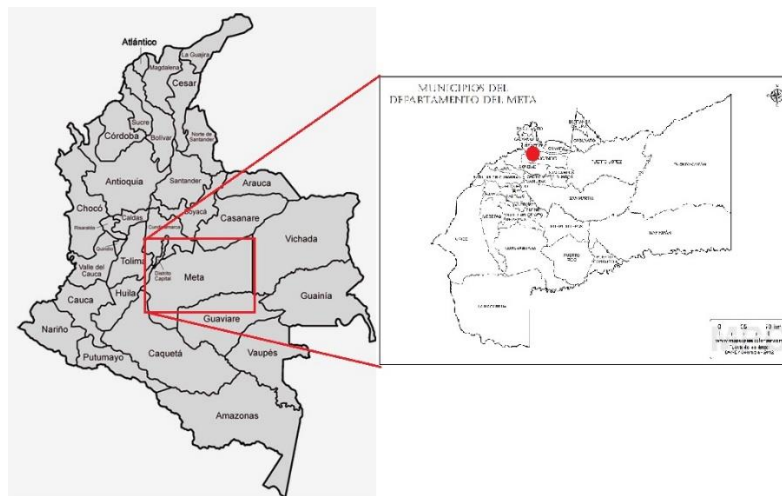
**Figura 1- 1** Ubicación área de estudio Fuente: Tomado de Google Earth

Villavicencio es una ciudad que se encuentra ubicada en el punto donde inicia el sistema de montañas de la Cordillera Oriental y converge con una zona parcialmente plana, por lo que tiene sectores, hacia el norte de la ciudad, que presentan movimientos en masa desarrollados sobre laderas inestables que han ido aumentando debido a la geología estructural particular de la cordillera, lo que genera una situación de riesgo para la comunidad.

Cabe señalar que los estudios sobre movimientos en masa en esa zona han sido pocos, esto hace necesario la elaboración de documentos que muestren en que áreas se tiene susceptibilidades a los movimientos en masa, para los planes de prevención y mitigación del riesgo, indispensables en el ordenamiento territorial de las ciudades.

## 1.1 Motivación y Formulación Del Problema

El sector Cerro de Buenavista esta localizado en lo que corresponde al limite de la Cordillera Oriental con los Llanos Orientales, esto hace que se presenten continuos movimientos de masa, generados por las condiciones geológicas y geomorfológicas de la zona combinadas con la erosión del suelo producidas por las lluvias y taludes inestables, que con el paso del tiempo han ido aumentando, generando pérdida de la tierra para los pobladores y poniendo en riesgo la vida de la comunidad. Debido a que es un área de gran extensión para estudiar, es necesario utilizar las herramientas de los SIG para hacer el procesamiento y análisis de información que permita determinar áreas sobre la zona que estén presentando más susceptibles a generarse movimientos en masa, para que quede como insumo en los planes de gestión del riesgo, porque actualmente es muy poca la información relacionada con el riesgo que se conoce de la parte alta de Villavicencio, y esto genera un ambiente de incertidumbre a las personas que allí habitan.



**Figura 1- 2** Localización general del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

El mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, permite identificar las áreas que están más propensas a presentarse estos eventos, y sirve de insumo para estudios de amenaza y riesgo que determinan el grado de probabilidad a que estos eventos ocurran, siendo así una

información significativa para la comunidad que permite poner en alerta y hacer gestión sobre las áreas de mayor susceptibilidad.

## **1.2 Finalidad**

### **1.2.1. Objetivo General**

Generar el mapa de susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa en el sector cerro de Buenavista en el municipio de Villavicencio, Meta, utilizando los Sistemas de Información Geográfica por medio de imágenes satelitales.

### **1.2.2. Objetivo Específicos**

- Elaborar el mapa geomorfológico del área de estudio con el uso de imágenes satelitales.
- Calcular el Índice Topográfico de Humedad, mediante el análisis de imágenes satelitales.
- Realizar el mapa de cobertura vegetal del área de estudio, a través del procesamiento de imágenes satelitales.

## **1.3 Aportes del Trabajo**

Este trabajo está orientado a la determinación de áreas susceptibles a movimientos de masa, en la parte montañosa de la ciudad de Villavicencio, en el sector Cerro de Buenavista. Dado que según versiones de las personas que viven allí, se han estado generando en los últimos años mayores desplazamientos de tierras en las zonas altas de la montaña, afectando las propiedades de los pobladores y poniendo en riesgo a la comunidad. Los mapas que se generan permiten representar de forma gráfica las áreas que tienen una alta susceptibilidad a

presentarse los movimientos de masa, que es un insumo a los planes de prevención y mitigación del riesgo de la ciudad, así como también en el plan de ordenamiento territorial.

#### **1.4 Organización del Documento**

Este trabajo está dividido en cinco capítulos, el primer capítulo contiene los objetivos del trabajo, una breve descripción sobre la problemática del trabajo de investigación que menciona la situación en la que encuentra el sector Cerro de Buenavista. En el capítulo 2 se describe la teoría y los conocimientos relacionados para el análisis de movimientos en masa a través del manejo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), incluyendo la fundamentación legal para Colombia en lo relacionado a la gestión del riesgo para movimientos de masa.

En los capítulos 3 y 4 se encuentran la metodología utilizada y los resultados respectivamente, en la metodología se detalla sobre las variables y recursos que se utilizaron para el procesamiento y análisis de información que permitiera generar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, basada en la metodología que tiene el Servicio Geológico Colombiano para la elaboración de estos mapas. Antaño a esto, en el capítulo de resultados se da una explicación sobre la información generada, se da una explicación de los resultados de cada variable valorada en este estudio. Finalmente, en el capítulo 5 se dan las conclusiones de todo el trabajo, en la que se da respuesta a los objetivos de la investigación.

## **Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA**

### **2.1. Marco Teórico**

Las características intrínsecas del terreno son un aspecto fundamental para determinar la susceptibilidad a la generación de movimientos en masa, en la que se encuentra la geomorfología, que permite definir y caracterizar la superficie a través de unidades geomorfológicas. Para la definición de las unidades geomorfológicas en este estudio se basa en los trabajos realizados por Savigear [1] citado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) [2] donde señalan que estas unidades representan una superficie de tierra con características morfológicas distintivas, definidas en su desarrollo por un proceso en particular, que deja reflejada una configuración típica de cada ambiente. Se debe agregar que la aplicación de la geomorfología de acuerdo con Zinck [3], requiere de una taxonomía de geoformas de tipo jerárquico, con niveles categóricos de acuerdo con el nivel de detalle del inventario. Cabe resaltar que las unidades geomorfológicas incluyen parámetros como: clima, suelo, vegetación y usos de suelo [4].

**Tabla 2- 1** Nomenclatura para la geomorfología.

ORIGEN	NOMBRE DE ELEMENTO
ESTRUCTURAL FUNDACIONAL	Gancho de falla Lomo de presión Cerro estructural Charco de falla (Sag Pond)
DENUACIONAL	Microcuencas denudacionales Depósitos de lavado Depósitos de laderas o coluviales
FLUVIAL	Cauce Nivel de terraza bajo Nivel de terraza medio Nivel de terraza alto Escarpe de la terraza Cono de deyección
ANTROPOGENICO	Cantera Llenos mixtos Llenos de escombros Botadero de escombros Terrazas y conos explanados con llenos Ladera terraceda

Fuente: Tomado de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa. Escala detallada. [5]

Es por esto que la geomorfología es una variable que está ligada a la susceptibilidad, ya que sus diversos componentes son considerados parámetros esenciales en la dinámica de la superficie terrestre [6], ya que la susceptibilidad a movimientos en masa tiene como objetivo zonificar las unidades del terreno que estén propensas a una similar actividad de deslizamientos [7].

Los movimientos en masa, por su parte se comprende como un proceso geológico altamente destructivo que afecta a las comunidades [8], estos han sido clasificados en diferentes tipos propuestos por varios autores como: Sharpe [9] y Terzaghi [10], pero se toma el sistema propuesto por Varnes [11] en el que se tiene en cuenta el tipo de movimiento y el material involucrado, este último hace referencia al suelo y la roca, del cual se obtienen cinco tipos de movimientos: Caídas, basculamientos, deslizamientos, separaciones laterales, flujos y

complejos” [11].

**Tabla 2- 2** Clasificación de los movimientos en masa de Varnes.

Tipo de movimiento		Tipo de movimiento		
		Roca	Suelo	
			De grano grueso	De grano fino
caídas		Caídas de rocas	Caídas de detritos	Caída de suelos
Basculamiento		Basculamiento de rocas	Basculamiento de detritos	Basculamiento de Suelos
Deslizamiento	Rotacionales	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de detritos	Deslizamiento rotacional de suelos
	Traslacionales	Deslizamiento translacional de rocas	Deslizamiento translacional de detritos	Deslizamiento translacional de suelos
Separaciones laterales		Separación lateral en roca	Separacion lateral en detritos	Separación la lateral en suelos
Flujos		Flujo de rocas	Dlujo de detritos	Flujo de suelos
Complejos		Combinación de dos o más tipos		

Fuente: Tomado y adaptado de Varnes [11]

El grupo de movimiento que corresponde a caídas se originan por el desprendimiento de material de un talud con pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco deslizamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando [8], las caídas por lo general son movimientos intermitentes en caída libre, asociados a escarpes de rocas duras y fracturadas [12]. Por otra parte, los basculamientos son movimientos producidos sobre una ladera o talud debidos a los colapsos de material rocoso, ya que el movimiento es producido por efecto de la gravedad y la rotación, hacia delante de un material rocoso, alrededor de un punto de giro localizado en su parte inferior.

En cuanto a los deslizamientos, son movimientos que desplazan masas a lo largo de uno o más planos discretos que pueden ser rotacionales o traslacionales en sus movimientos [13], los cuales son caracterizados por desarrollar una o más superficies de ruptura, una zona de desplazamiento y una zona de acumulación [12]. Con respecto a las separaciones laterales consisten en un movimiento de extensión acompañado por fracturamiento cortante o

tensional, que se desplazan en sentido lateral o casi horizontal en donde subyacen masas rocosas fracturadas y materiales de composición arcillosa; por lo que refiere a los flujos, son movimientos relativos de material litológico de textura fina y gruesa que se desplazan a lo largo de una superficie de falla bien definida, la cual sigue una discontinuidad formada por un cambio litológico, una estructura geológica o bien, una característica geotécnica.

## **2.2. Marco Legal**

En Colombia puede apreciarse que la implementación de políticas para el manejo del riesgo por eventos naturales es muy reciente, esto debido principalmente a la relevancia que se tenía sobre las consecuencias que producen los desastres, pero es hasta que ocurrieron grandes catástrofes en el país, las cuales alteraron económica y socialmente la dinámica nacional, que se inició un proceso de implementación en todas las ciudades la conceptualización del riesgo en los planes de desarrollo y de ordenamiento, esto a través de la Ley 1523 del 2012 con nombre “Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones” [14].

Además de la implementación del riesgo en los planes de ordenamiento y desarrollo para las ciudades, la aplicación del Decreto 1807 de 2014 [15] establece una metodología para los estudios básicos y detallados de amenaza por distintos eventos, la cual permite orientar a las entidades correspondientes sobre el enfoque, los insumos, el alcance y los productos de los estudios para la evaluación de la amenaza, riesgo y vulnerabilidad. Como resultado todos los procesos para la gestión del riesgo, se creó el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres mediante el Decreto 308 de 2016 [16] como un instrumento que contiene las estrategias y planes para la Respuesta de emergencias por desastres naturales, encabeza de: tres comités nacionales de gestión del riesgo y consejos territoriales, permitiendo así una mejor organización para la atención ante cualquier situación de emergencia.

### **2.3. Estado del Arte**

Los movimientos en masa es una situación que genera riesgo a las personas, especialmente en los desarrollos urbanos que se ubican en las montañas [17] porque son el producto de una falta de planificación urbana. Esta situación genera, pérdidas de vida, daño a la cobertura vegetal, y las afectaciones a las viviendas e infraestructuras son frecuentes [18], cabe resaltar que la magnitud de los efectos que producen los eventos de remoción en masa depende de las características ambientales (estructura y textura del suelo, humedad y temperatura) [19] es por esto indispensable contar con estudios de amenaza, riesgo y vulnerabilidad en la planificación de las ciudades.

En ese sentido, la determinación de la amenaza por movimientos en masa está ligada a la susceptibilidad que tiene el terreno para presentarse un evento de remoción en masa ya que esta, de acuerdo con Obregón y Lara [20] es la propensión o tendencia de una zona a ser afectada bajo la influencia de un proceso determinado, que se determina a partir de la correlación de los factores intrínsecos que contribuyen a la formación de movimientos en masa, entre los cuales según los trabajos realizados por Biswajeet [21] se encuentra la superficie, la litología de la roca, estructura, sismicidad, grado de pendiente, morfología, condiciones de agua subterránea, clima, cobertura de la vegetación, el uso del suelo y la actividad humana.

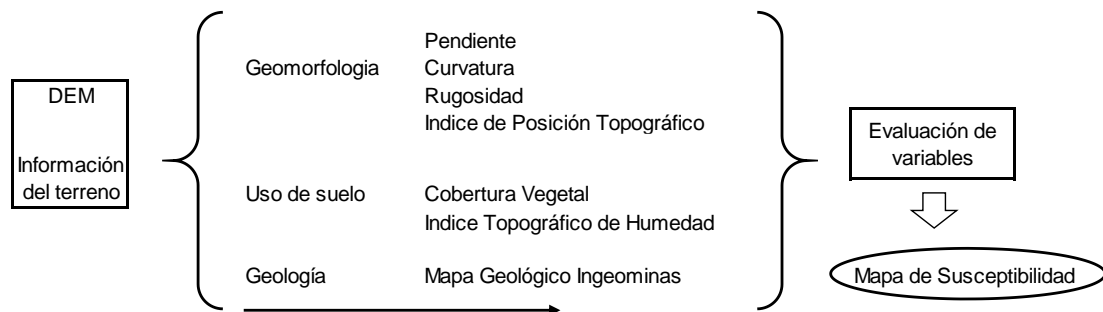
En los estudios realizados por Martin Mergili et al. [22] se puede destacar que a pesar de que el agua es un agente detonante para la generación de movimientos en masa, la gravedad es la fuerza dominante que facilita dichos eventos, de manera que las zonas montañosas están más susceptibles a generarse movimientos en masa. De acuerdo con Vega & Hidalgo [23] Colombia se encuentra localizada en los trópicos húmedos, haciendo que el país se vea influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical generando abundantes precipitaciones que se distribuyen de manera bimodal, creando periodos de lluvias entre los meses de marzo a mayo y entre los meses de septiembre hasta noviembre.

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en los estudios para los

eventos de remoción en masa se ha desarrollado simultáneamente, puesto que el avance de la tecnología le ha permitido a los SIG facilitar el análisis de datos sobre grandes áreas de terreno, como señala Vincenzo, et al. [24] los SIG son una herramienta que permite analizar, representar y consultar entidades y eventos mediante la representación de una parte del territorio en un mapa temático.

### **Capítulo 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para el cálculo de la susceptibilidad por movimientos en masa en el sector cerro de Buenavista se emplearon variables cualitativas y cuantitativas del terreno; dentro de las variables cualitativas se encuentra: Geomorfología, Registro de movimientos en masa, cobertura vegetal, geología y suelo, y dentro de las variables cuantitativas se encuentra: Pendiente, Rugosidad, Curvatura y el factor acuenca, que se determinaron a partir del modelo digital de elevación. Para el análisis de las variables se aplica un análisis multicriterio que involucra la información obtenida del terreno, con los datos proporcionados por el DEM. Se aplica una jerarquización de variables dado que, en el momento de presentarse un movimiento de masa, no todas las variables tienen el mismo grado de incidencia.



**Figura 3- 1** Esquema metodológico para la generación del mapa de susceptibilidad. Fuente: Autor

#### **3.1. Geomorfología**

La elaboración del mapa de geomorfología se toma la clasificación de los ambientes morfogenéticos de acuerdo a: ambiente morfoestructural, ambiente volcánico, ambiente denudacional, ambiente fluvial, ambiente marino profundo y costero, ambiente glaciar, ambiente eólico, ambiente kárstico y ambiente antropogénico.

La geomorfología es un factor que ayuda a entender la relación del terreno con la ocurrencia

de procesos de movimientos en masa, ya que comprende toda la información sobre las formas del terreno tales como morfometría y morfología. Para la representación de esta información en este trabajo se manejó cada variable como una capa de información condensada en SIG. Esto permite que se puedan hacer complementación de datos, con la información disponible sobre el área de estudio.

### **3.1.1. Morfogénesis**

Cada geoforma tiene una génesis particular que puede generar una mayor dinámica superficial aumentando la susceptibilidad por movimientos en masa, simultáneamente los procesos genéticos en cada geoforma dependen de las fuerzas internas que permitan la formación del relieve por sí misma, sin embargo, algunos ambientes se ven influenciados por agentes externos que generan mayor susceptibilidad.

El relieve, en ese sentido, tiene una incidencia para determinar las geoformas en una región, que se puede representar mediante el Índice de Posición Topográfica (TPI) ya que caracteriza la topografía local con respecto a la posición relativa del terreno [25], este índice representa cuales puntos son más altos con relación al promedio de la zona, en un rango entre -1 a 1, los valores negativos representan los puntos más bajos como valles, mientras que valores de TPI cercanos a cero muestran áreas más planas [26].

### **3.1.2. Morfometría**

Con respecto a los aspectos cuantitativos del terreno, en este estudio se analizaron: la pendiente, rugosidad y curvatura, a partir del modelo digital de elevación. En primer lugar, se determina la pendiente cuya medición se realiza entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor puede ser representado porcentualmente o en grados de 0° a 90°, el valor de la pendiente es un aspecto significativo para la ocurrencia de movimientos en masa, ya que es un factor geométrico que incide en la estabilidad del terreno porque está directamente relacionado con las tensiones tangenciales y normales del suelo. Para los rangos de clasificación de la pendiente en la siguiente tabla se aprecia las clases definidas de acuerdo

al valor porcentual.

**Tabla 3- 1** Rango de clasificación de la pendiente

Clase	Descripción	%
1	Plano	0-0,2
2	Nivel	0,2-0,5
3	Cercano a nivel	0,5-1,0
4	Muy ligeramente inclinado	1,0-2,0
5	Ligeramente inclinado	2,0-5,0
6	Inclinado	5,0-10,0
7	Fuertemente inclinado	10,0-15,0
8	Moderadamente escarpado	15,0-30,0
9	Escarpado	30,0-60,0
10	Muy escarpado	>60,0

Fuente: Tomado de Cuencas Hidrográficas: Bases conceptuales-caracterización-planificación-administración. [27]

Otro aspecto a calificar es la rugosidad, esta puede definirse como una característica relacionada con la irregularidad o accidentalidad del terreno [28], por ende, esta variable permite diferenciar las zonas altas en planicies de las zonas de baja altitud, pero montañosas. Para el cálculo de la rugosidad, se hace de acuerdo a la teoría de Hobson [29] en la que señala que, si el terreno es uniforme, la suma vectorial será elevada y la dispersión baja, mientras que, para terrenos rugosos, con cambios en orientaciones y pendientes, se presenta sumas vectoriales pequeñas y dispersiones elevadas.

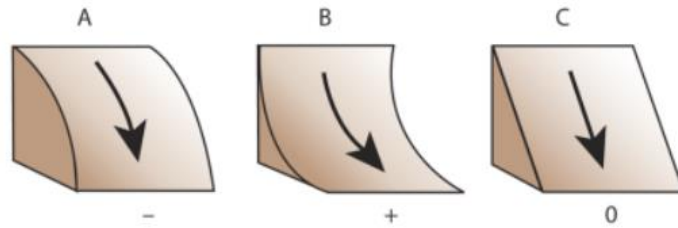
**Tabla 3- 2** Calificación de la rugosidad

Clasificación	Descripción	Susceptibilidad
1	Rugosidad muy baja o Nula	Muy Baja
2	Rugosidad baja	Baja
3	Rugosidad media	Media
4	Rugosidad alta	Alta
5	Rugosidad muy alta	Muy Alta

Fuente: Tomado y adaptado de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala detallada [5].

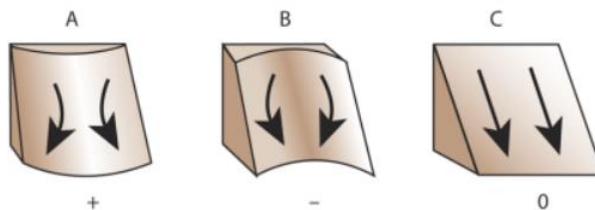
La curvatura es una medida del suelo que indica la forma de las laderas, en la que se mide el grado de concavidad o convexidad mediante el radio de curvatura de una celda según un

plano vertical, lo que afecta la aceleración y desaceleración de los movimientos en masa en la superficie del terreno con laderas. Una curvatura del tipo A indica una superficie convexa hacia arriba (negativa) en la que se desacelera el movimiento, mientras que un perfil del tipo B representa concavidad hacia arriba (positiva) generando aceleración en el movimiento, y en el caso de un perfil tipo C hace referencia una superficie lineal.



**Figura 3- 2.** Curvatura de perfil. Fuente: Tomado de ESRI [30]

En el plano la curvatura hace referencia a la convergencia y divergencia del movimiento de masa en una ladera, en el primer caso, tipo A la superficie esta lateralmente convexa (positiva), a diferencia de la curvatura tipo B que presenta una superficie lateralmente cóncava (negativa) y en el tipo C la superficie tiene un flujo lineal.



**Figura 3- 3** Curvatura de plano. Fuente: Tomado de ESRI [30]

### **3.1.3. Morfodinámica**

Para este punto se hizo el inventario de movimientos en masa registrados en la zona, mediante visitas de campo se tomó la información de los eventos activos en el área de estudio, y con la información del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA). En este proceso influye la correlación entre los atributos geométricos del terreno, sistema digital de

elevación, geología, con el inventario de procesos para obtener la distribución espacial de los movimientos en masa.

### **3.2. Geología**

Dentro del análisis de susceptibilidad por movimientos en masa se basaron planchas geológicas las cuales contienen información litológica y estructural de las rocas y del suelo, a partir de allí se caracteriza el comportamiento mecánico de estos, el cual se ve influenciado por los cambios en las fuerzas tensionales, dichos cambios pueden ser originados de manera natural, o bien por la acción humana que acelera los procesos naturales ambientales.

#### **3.2.1. Resistencia de la roca**

Con base a lo mencionado anteriormente, se hace una clasificación de los diferentes tipos de roca presente en el área de estudio y se le asigna un valor de resistencia a cada tipo para realizar la calificación respectiva. Los rangos de resistencia se tomaron de la Metodología para zonificación de amenaza y susceptibilidad relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 [31]. A continuación, se muestran en las tablas los rangos de clasificación y calificación de resistencia de las rocas.

**Tabla 3- 3** Propuesta de calificación

<b>Grado ( R )</b>	<b>Descripción</b>	<b>Calificación</b>
0	Extremadamente dura	1
1	Muy dura	1
2	Dura	2
3	Moderadamente dura	3
4	Blanda	4
5	Muy blanda	5
6	Extremadamente blanda	5

Fuente: Tomado de Metodología para zonificación de amenaza y susceptibilidad relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 [31].

**Tabla 3- 4** Categorías de resistencia a la compresión

Clase (a)	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial ( MPa )	Indice de carga puntual ( MPa )	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales en la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy Resistente	100 – 250	4 – 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 – 100	2 – 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente Resistente	25 – 50	1 – 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5 – 25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con una cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy Débil	1 – 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0,25 – 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

(a) Clases según Brown [25]

(b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 MPa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

Fuente: Tomado de [32].

### 3.3. Suelo

#### 3.3.1. Cobertura vegetal

El uso de suelo y la cobertura vegetal son uno de los factores in situ que inciden de manera negativa o positiva en la generación de movimientos en masa, ya que los cambios que se generan en la cobertura del suelo afectan la estabilidad de los taludes, esto se debe a que los efectos mecánicos que genera la vegetación de acuerdo con Charman & Murphy [33] son el enraizamiento, control de erosión, resistencia del sistema suelo edáfico-raíces y protección del suelo.

Mediante el mapeo de imágenes satelitales se obtiene una distribución de la composición vegetal de la zona, uno de los elementos que permite analizar el tipo de vegetación es el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) ya que permite medir la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, lo que permite valorar la intensidad del verdor

de la zona [34], o bien, estima la cantidad de vegetación presente en una superficie. El NDVI arroja valores que van desde -1 a 1, los valores menores a 0.1 indican superficies descubiertas, mientras que los valores mayores a 0.1 muestran la presencia de plantas [35], pero cabe subrayar que la vegetación densa se identifica a partir de valores entre 0.5 y 0.7 [34]. Para la aplicación del NDVI se utiliza una ecuación entre dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el Rojo (RED) [36]:

$$NDVI = \frac{\varphi_{NIR} - \varphi_{RED}}{\varphi_{NIR} + \varphi_{RED}} \quad (\text{Ecuación 4-1})$$

### 3.3.2. Índice Topográfico de Humedad ITH

Para el análisis del factor hídrico en el sector Cerro de Buenavista, se analiza el Índice Topográfico de Humedad (ITH) el cual refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentías, identificando los suelos más proclives a saturarse. El ITH de acuerdo con Sorensen *et al.* [37] combina la distribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de la misma, esto permite encontrar áreas de erosión – deposición. La ecuación para calcular el ITH se representa de la siguiente forma.

$$ITH = \ln\left(\frac{As}{\tan \beta}\right) \quad (\text{Ecuación 4-2})$$

Donde:

ITH = Índice topográfico de humedad

As = Área de drenaje específica

$\beta$  = Angulo de la pendiente local

### 3.4. Evaluación de variables

En esta etapa se realiza una evaluación de variables con la herramienta SIG, cuya unidad de análisis es una celda ráster que contiene información cualitativa y cuantitativa sobre el modelo de elevación digital del terreno. Las variables condicionantes del terreno se asocian a las unidades de análisis en el modelo MDT, toda la información se recolecto a partir del

procesamiento de imágenes satelitales y datos recolectados en visitas de campo.

La evaluación de variables se realizó por el método heurístico, el cual se basa en categorizar y ponderar los factores causantes de inestabilidad según la influencia esperada de estos en la generación de movimientos en masa [38], en el cual se da un peso a cada factor analizado con base en estudios similares realizados en diferentes partes del mundo, y siguiendo la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano para los análisis de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa.

### **3.5. Descripción de los productos finales**

Como resultado del análisis en la herramienta SIG, se obtienen mapas que arrojan la susceptibilidad por geomorfología, geología y uso de suelo, y mediante la suma de estos resultados se presenta el mapa de susceptibilidad de la montaña en el sector Cerro de Buenavista en donde se puede identificar las áreas más propensas a presentarse movimientos en masa, que se clasifican en tres niveles de susceptibilidad: Alta, media y baja.

Estos mapas sirven como insumo para los estudios de gestión del riesgo en el sector Cerro de Buenavista, ya que es muy poca la información que se tiene sobre el tema. En efecto, los resultados contenidos en los mapas permiten a la comunidad tomar consciencia sobre los deslizamientos que pueden generarse en esa zona, para así tomar las precauciones necesarias.

## **Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **4.1. Geomorfología**

La geomorfología que presenta el sector Cerro de Buenavista está definida por las formaciones Brechas de Buenavista, sistemas de fallas El Mirador, Villavicencio - Colepato y la estructura sinclinal de Servitá, las cuales han formado geoformas con pendientes altas, conformando relieves escarpados; que con la meteorización y los procesos geológicos activos han generado laderas, y deslizamientos que se desplazan hacia los puntos más bajos, esto hace que se observen movimientos de tierra en grandes extensiones como se observa en la figura 4-1. Una de las causas para la generación de estos desplazamientos de tierra es la ausencia de vegetación alta, combinada con las altas inclinaciones de ladera, condiciones que se presentan en los puntos más altos del área de estudio, en el anexo H se presenta la susceptibilidad por geomorfología, en la cual se observa que los puntos más altos son los que generan mayor susceptibilidad.



**Figura 4- 1** Deslizamientos en el área de estudio

Fuente: Autor

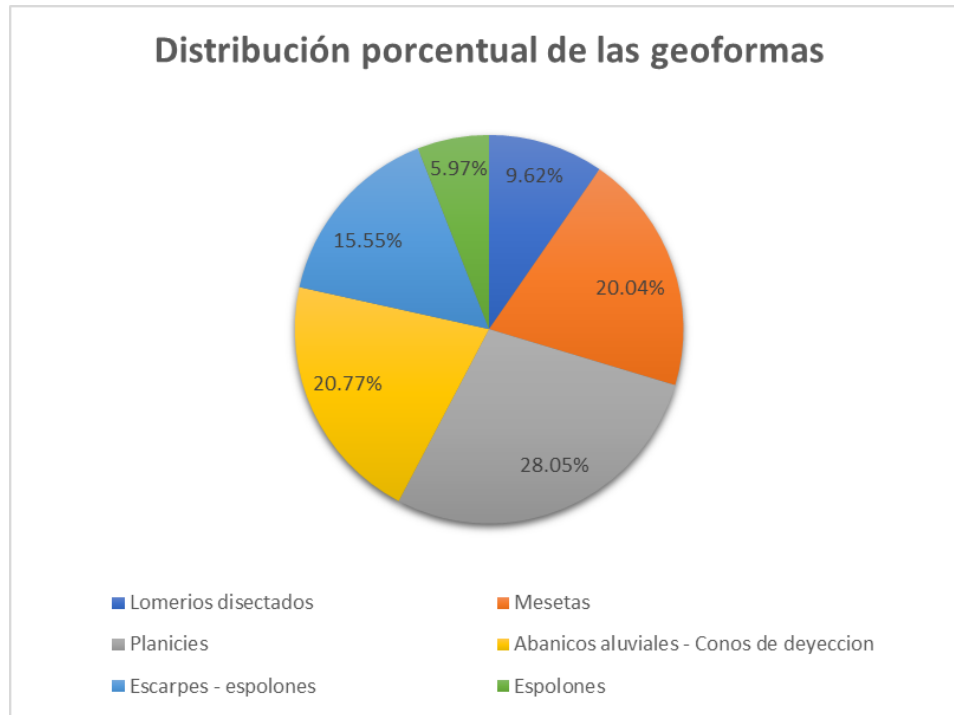
En la calificación de susceptibilidad para la geomorfología del área de estudio, se utilizó el Índice Topográfico de Humedad (TPI) para agrupar características de las geoformas en la zona de estudio, esto dado que el relieve define mejor cada geoforma, el TPI representa en los valores negativos, valles, mientras que los positivos representan crestas de montañas; y los valores cercanos a cero hacen referencia a planicies o mesetas levemente inclinadas.

**Tabla 4- 1** Tabla de clasificación y calificación de la Geomorfología.

Rango	Descripción	Área (%)	Susceptibilidad	Calificación
-86.881 - -23.0178	Lomerios disectados	9.62%	Media	3
-23.0178 - -9.430	Mesetas	20.04%	Baja	2
-9.430 - 2.120	Planicies	28.05%	Muy baja	1
2.120 - 14.349	Abanicos aluviales - Conos de deyeccion	20.77%	Alta	4
14.349 - 28.616	Escarpes - espolones	15.55%	Muy Alta	5
28.616 - 86.364	Espolones	5.97%	Muy Alta	5

Fuente: Elaboración propia

La unidad geomorfológica de lomeríos poco disectados es un ambiente denudacional, con prominencias topográficas de morfología alomada, de laderas muy cortas a cortas, de forma rectas, cóncavas y convexas, los procesos erosivos son frecuentes y con frecuencia presenta deslizamientos de tipo rotacional. En los puntos más bajos la superficie contiene una geomorfología tipo planicie, que se caracteriza por presentar pequeñas ondulaciones de pendientes planas a suaves.



**Figura 4- 2** Distribución de geoformas presentes en la zona de estudio. Fuente: Autor

En algunos sectores ubicados hacia la parte del río Guayuriba se encontraron conos de deyección, figura 4-2, superficies en forma de cono, de laderas cóncavas a convexas, en el cual los canales de agua llegan a zonas de valle amplios, cuyos depósitos están constituidos por arena, arcillas y grava. En contraste, los puntos más altos de la zona la geomorfología hace parte de ambientes estructurales de tipo espolones, desarrollados sobre rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, con laderas de longitudes variables en las que la pendiente se ve afectada por constantes procesos denudativos.

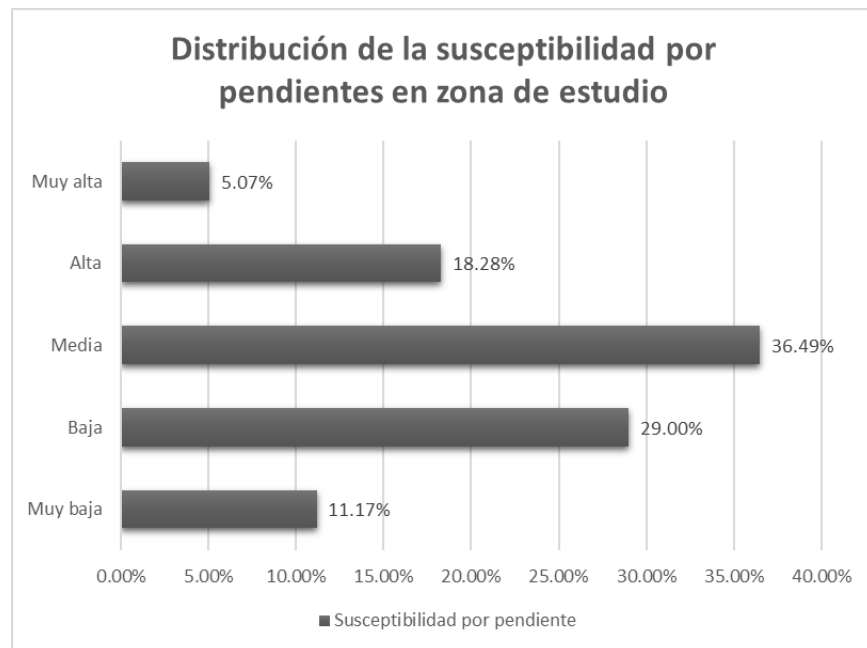
El sector Cerro de Buenavista tiene una geomorfología influenciada por altas pendientes, para la cual se tomaron cinco rangos de clasificación que definen una susceptibilidad de Muy baja hasta Muy alta a la generación de movimientos en masa, en el primer rango de pendiente va desde valores de  $0^{\circ}$  hasta  $9.822^{\circ}$  que corresponde a superficies planas o con leves inclinaciones, que no generan una susceptibilidad al movimiento de masas y por ende tienen el valor más bajo en su calificación. Por el contrario, las pendientes que se encuentran entre los rangos de  $25.596^{\circ}$ - $34.226^{\circ}$  y  $34.226^{\circ}$ - $75.894^{\circ}$  tiene la calificación más alta de susceptibilidad porque permiten la propagación de movimientos de masa, y son las áreas en

las que se puede evidenciar más inestabilidad de taludes. En la tabla 4-1 y figura 4-3 se presenta la clasificación y calificación de susceptibilidad para los diferentes rangos de pendiente, y el porcentaje de área en la que se desarrollan.

**Tabla 4- 2** Tabla de clasificación y calificación para el factor pendiente

Rango	Descripción	Área (%)	Susceptibilidad	Calificación
0 - 9.822	Plana a suavemente inclinada	11.17%	Muy baja	1
9.822 - 18.155	Inclinada	29.00%	Baja	2
18.155 - 25.596	Muy inclinada	36.49%	Media	3
25.596 - 34.226	Abrupta	18.28%	Alta	4
34.226 - 75.894	Escarpada	5.07%	Muy alta	5

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4- 3** Representación porcentual de áreas con susceptibilidad por pendiente. Fuente: Autor

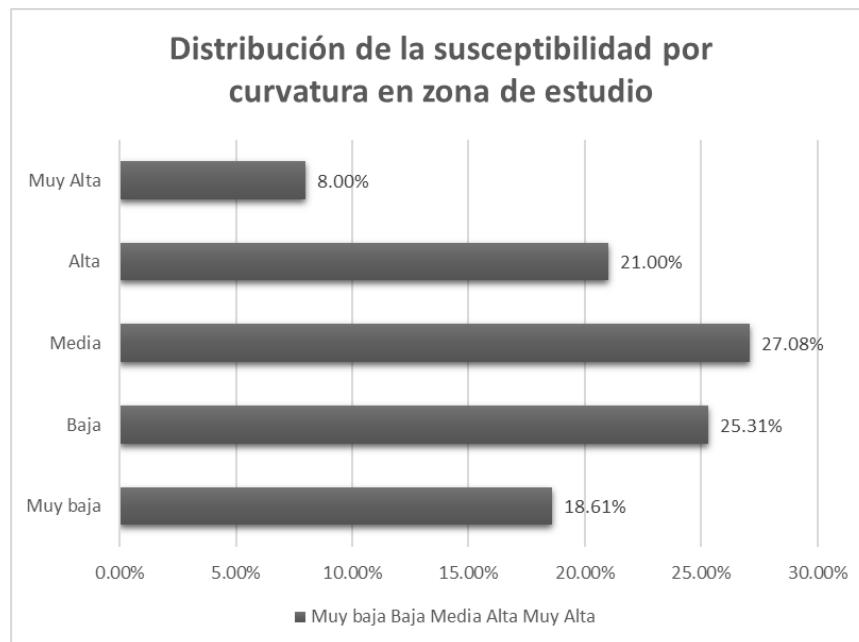
Los movimientos pueden acelerarse si la curvatura del terreno tiene un grado de convexidad o concavidad alto, ya que el plano sobre el que se desplazan está facilitando su desplazamiento por efecto de la gravedad, en este estudio se encontró que se presentan mayoritariamente superficies convexas por tanto puede concluirse que la velocidad de los

movimientos de masa será lenta, en la tabla 4-2 y figura 4-4 se puede apreciar los valores de curvatura para toda el área de estudio.

**Tabla 4- 3** Tabla de clasificación y calificación del factor curvatura

Rango	Descripción	Área (%)	Susceptibilidad	Calificación
-24.32 - -1.92	Convexa	18.61%	Muy baja	1
-1.92 - -0.64	Convexa	25.31%	Baja	2
-0.64 - 0.64	Plano	27.08%	Media	3
0.64 - 1.92	Concava	21.00%	Alta	4
1.92 - 21.12	Concava	8.00%	Muy Alta	5

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4- 4** Distribución de la susceptibilidad por Curvatura. Fuente: Autor

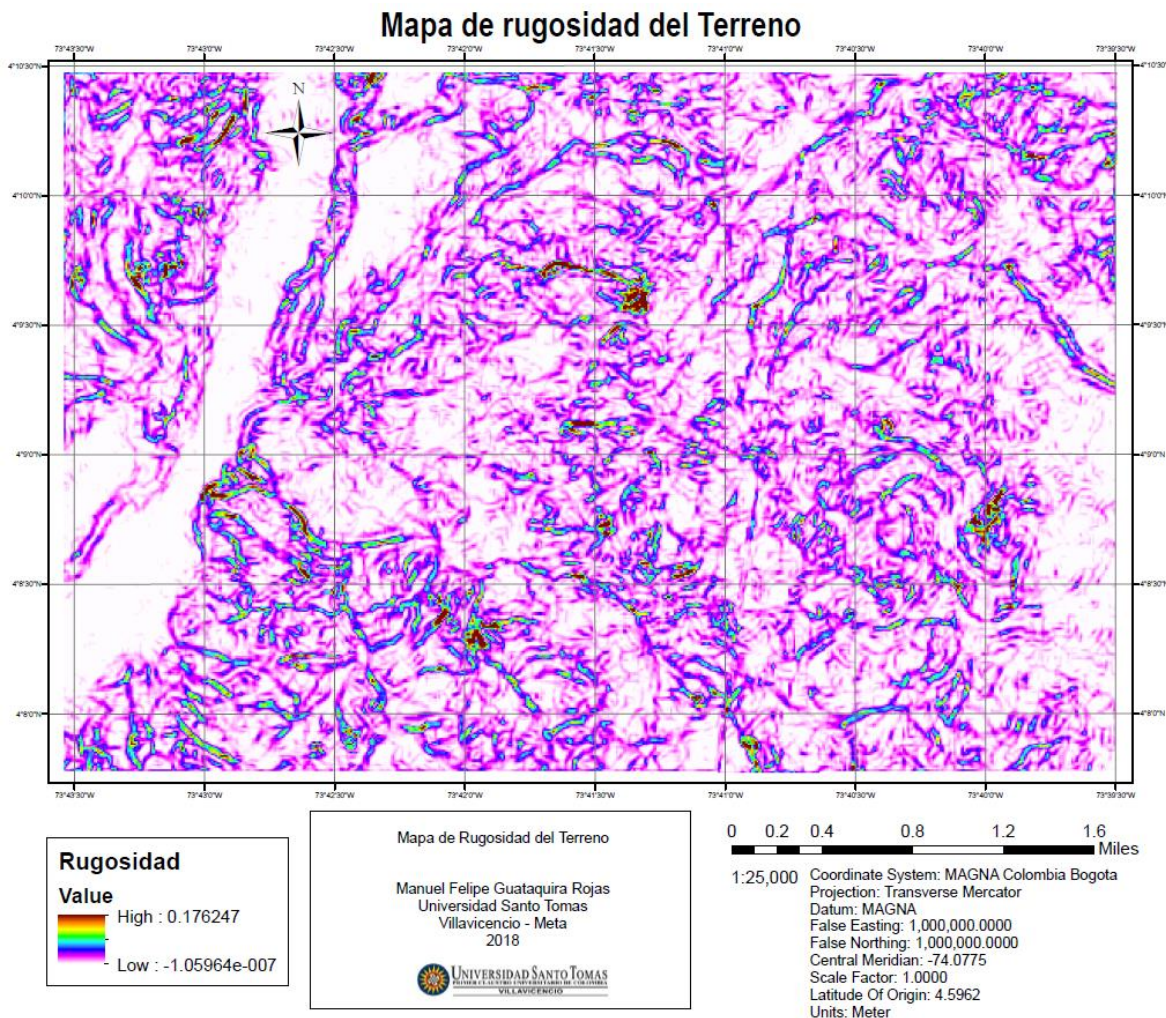
**Figura 4- 5** Representación porcentual de áreas susceptibles por curvatura. Fuente: Autor  
Otro factor morfométrico analizado fue la rugosidad, que permite identificar superficies irregulares, ya que es un parámetro que no mide la altitud de los puntos sino la diferencia de altitudes en una misma celda ráster, para una mejor comprensión de los resultados se toma como referencia que los valores cercanos a 0 son áreas de mayor susceptibilidad a presentarse movimientos en masa. En la zona de estudio se obtiene valores de rugosidad cercanos a cero,

esto debido a la irregularidad de la zona, por localizarse en un área montañosa.

**Tabla 4- 4** Tabla de clasificación y calificación de la rugosidad

Rango	Descripción	Área (%)	Susceptibilidad	Calificación
0 - 0.0027	Rugosidad Muy alta	60.11%	Muy Alta	5
0.0027 - .0082	Rugosidad alta	31.04%	Alta	4
0.0082 - 0.0199	Rugosidad media	8.84%	Moderada	3

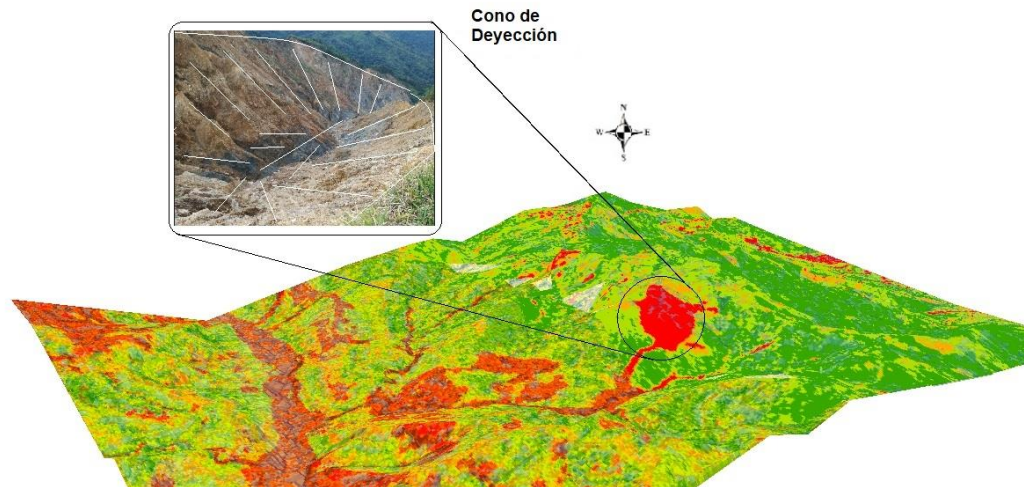
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4- 6** Mapa de rugosidad del terreno. Fuente: Elaboración propia

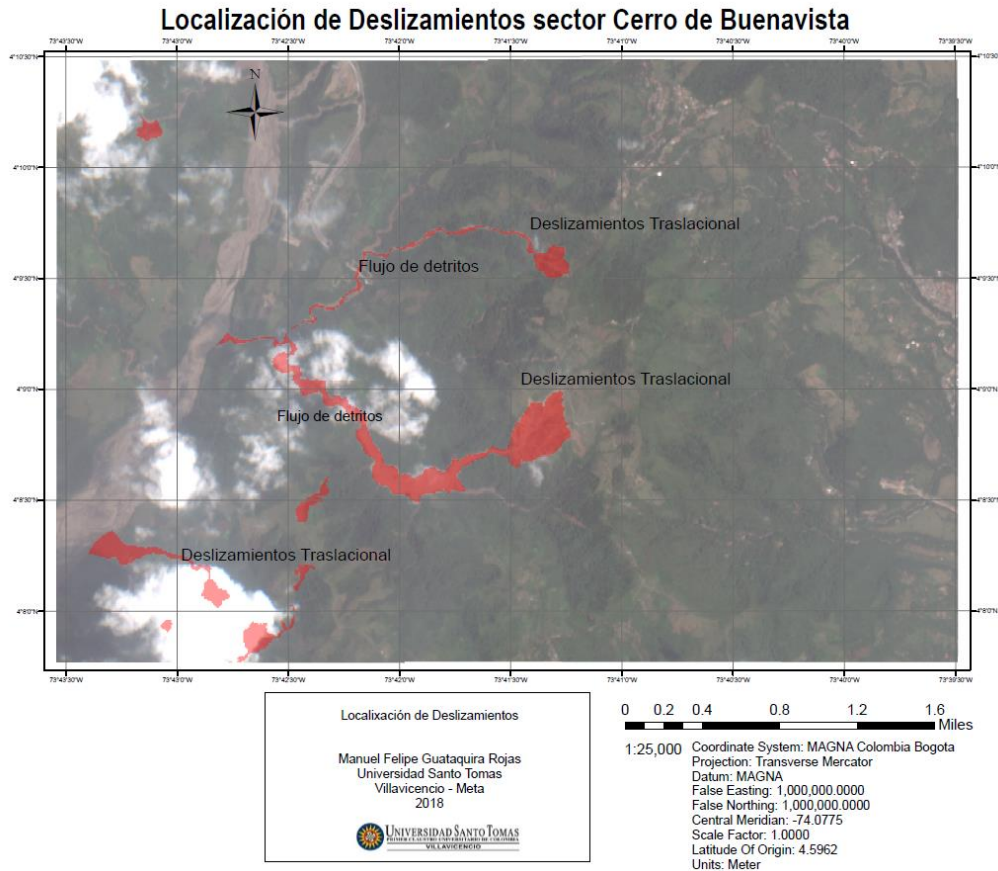
Los factores morfométricos calculados para la zona de estudio, se constataron en la visita de campo, la figura 4-5 es una evidencia de las variables cuantitativas obtenidas mediante la

utilización de Sistemas de Información Geográfica. A continuación, se muestra el cambio en la geofoma del terreno por efecto de las precipitaciones. En la figura 4-2 se evidencia la zona de acumulación en el abanico aluvial.



**Figura 4- 7** Cono de deyección en el área de estudio Fuente: Elaboración propia

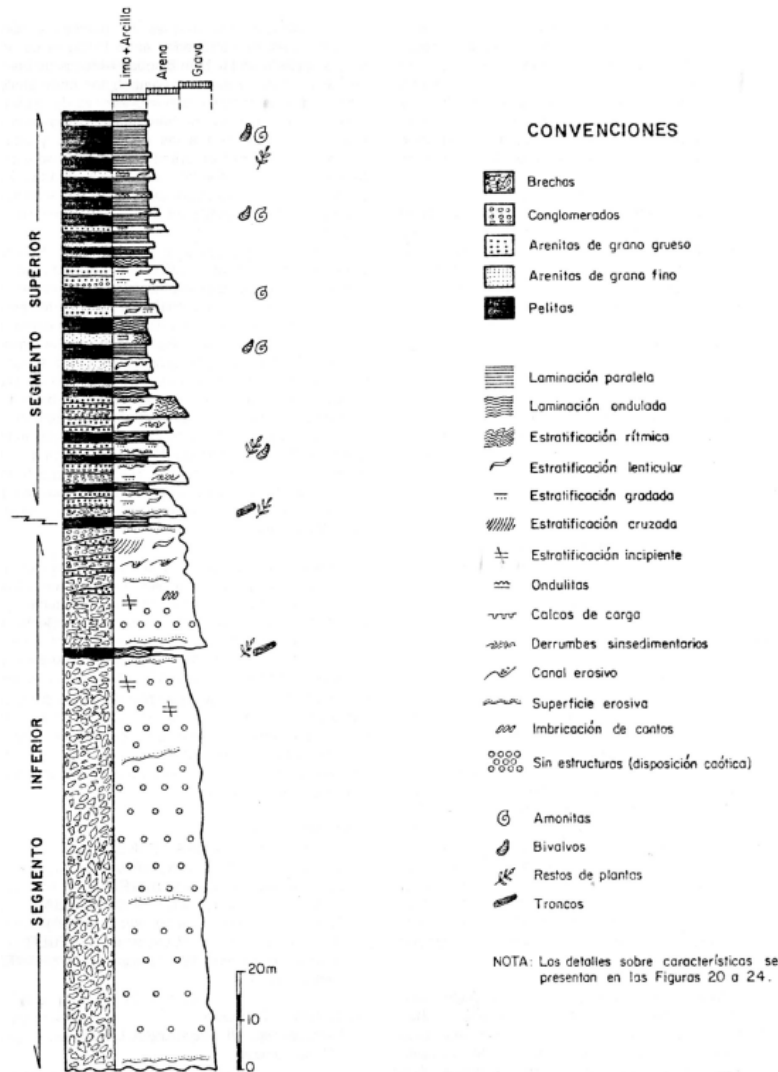
Se encontraron en el área de estudio, deslizamientos de tipo traslacional en los que el volumen de masa se desplaza hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de la superficie en los cuales se evidencia una progresión cuesta abajo. Otro tipo de deslizamiento encontrado en la zona fueron aquellos que se encontraron sobre dos o mas discontinuidades, a los que se les identificó como deslizamientos de cuña. En la parte baja de los deslizamientos, se observó a través de la visita de campo y observación por imágenes satelitales, flujo de detritos, los cuales mueven grandes volúmenes de material y generan una alta susceptibilidad, porque estos pueden seguir generando más deslizamientos sobre el macizo rocoso.



**Figura 4- 8** Deslizamientos en la zona de estudio. Fuente: Autor

## 4.2. Geología

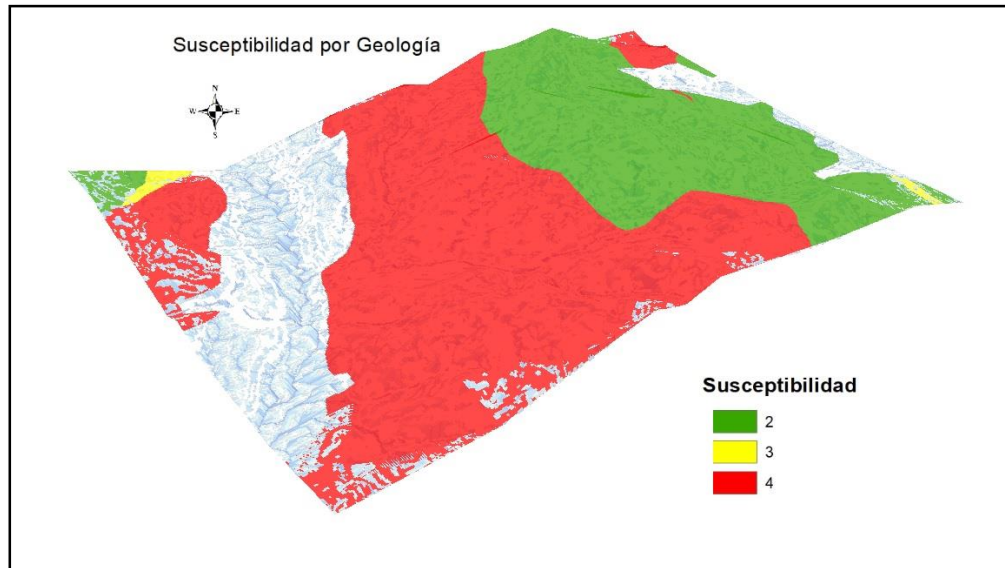
La geología que presenta el área de estudio está constituida por la Formación Brechas de Buenavista, compuesta litológicamente por fragmentos y bloques angulosos a subredondeados de filitas, cuarcitas, areniscas, calizas y cuarzo lechoso, englobados caóticamente en una matriz areno arcillosa [39], esta unidad de acuerdo con Jorge Dorado [40] descansa inconformemente sobre rocas paleozoicas y supone que esté cubiertas por capas cretácicas.



**Figura 4- 9** Características principales de la formación Brechas de Buenavista Fuente:  
Tomado de [40]

La estructura geológica del sector Cerro de Buenavista está contenida dentro del sistema de falla El Mirador, de dirección noreste, de cabalgamiento, de ángulo relativamente bajo, buzante al oeste. Esta falla tiene una extensión mayor a los 200 m, con un alto cizallamiento en la roca [39]. Este sector también se ve influenciado por el sistema de falla Villavicencio – Colepato, de dirección noreste – suroeste, de cabalgamiento, ángulo bajo y longitud mayor a 40 km de acuerdo con los estudios geológicos del INGEOMINAS [39], que hace parte del gran Sistema de Falla de la Cordillera Oriental. En el área de estudio se encuentra la estructura sinclinal de Servitá, de dirección N60°E, asimétrica [39], con el flanco occidental

más inclinado y su núcleo constituido por la Formación Lutitas de Macanal, de extensión mayor a los 20 km.



**Figura 4- 10** Mapa susceptibilidad por Geología. Fuente: Elaboración propia

La susceptibilidad por geología, califica la resistencia de la roca de acuerdo a las tablas 3-3 y 3-4, en las cuales las rocas de origen areniscas y filitas las cuales ofrecen mayor resistencia lo que genera una menor susceptibilidad, en el anexo F se muestra el mapa geológico del área de estudio. Los resultados arrojaron que la presencia de arcillolitas y lodolitas predominan en la zona de estudio, generando alta susceptibilidad, estas unidades geológicas propician geoformas con pendientes altas, y se encuentra situadas debajo de superficies con baja densidad de vegetación.

**Tabla 4- 5** Tabla de clasificación y calificación de la resistencia de la roca

Formación	Litología	Calificación	Resistencia
Arenisca de Cáqueza Kic	Areniscas	2	R4
Capas rojas del Guatiquía Pcg	Areniscas	2	R4
Lutitas de Macanal Kilm	Lodolitas	4	R2
Filitas y Cuarzitas de Guayabetal PCAqgu	Filitas	2	R4
Formación Fomeque Kif	Arcillolita	3	R3
Formación Une Kiu	Areniscas	2	R4
Lutital de Pipiral Pdp	Arcillolita	3	R3

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Suelo

En el análisis del suelo, se pudo observar que la retención de agua por parte del terreno es alta en la mayoría de la zona de estudio, lo que beneficia a la vegetación que se presenta en la zona, sin embargo, en los puntos con pendientes altas y que tienen una superficie de desarrollo cóncava pueden generar erosión, además de generarse deslizamientos con altas velocidades. A través del Índice Topográfico de Humedad se determinó que en el rango de 12.527 – 13.879 presenta un 38.34% del área de estudio, dando una susceptibilidad media, mientras que los rangos de 10.996 – 12.527 y 13.879 – 15.569 representan en casi en igual proporción el 50% del área.

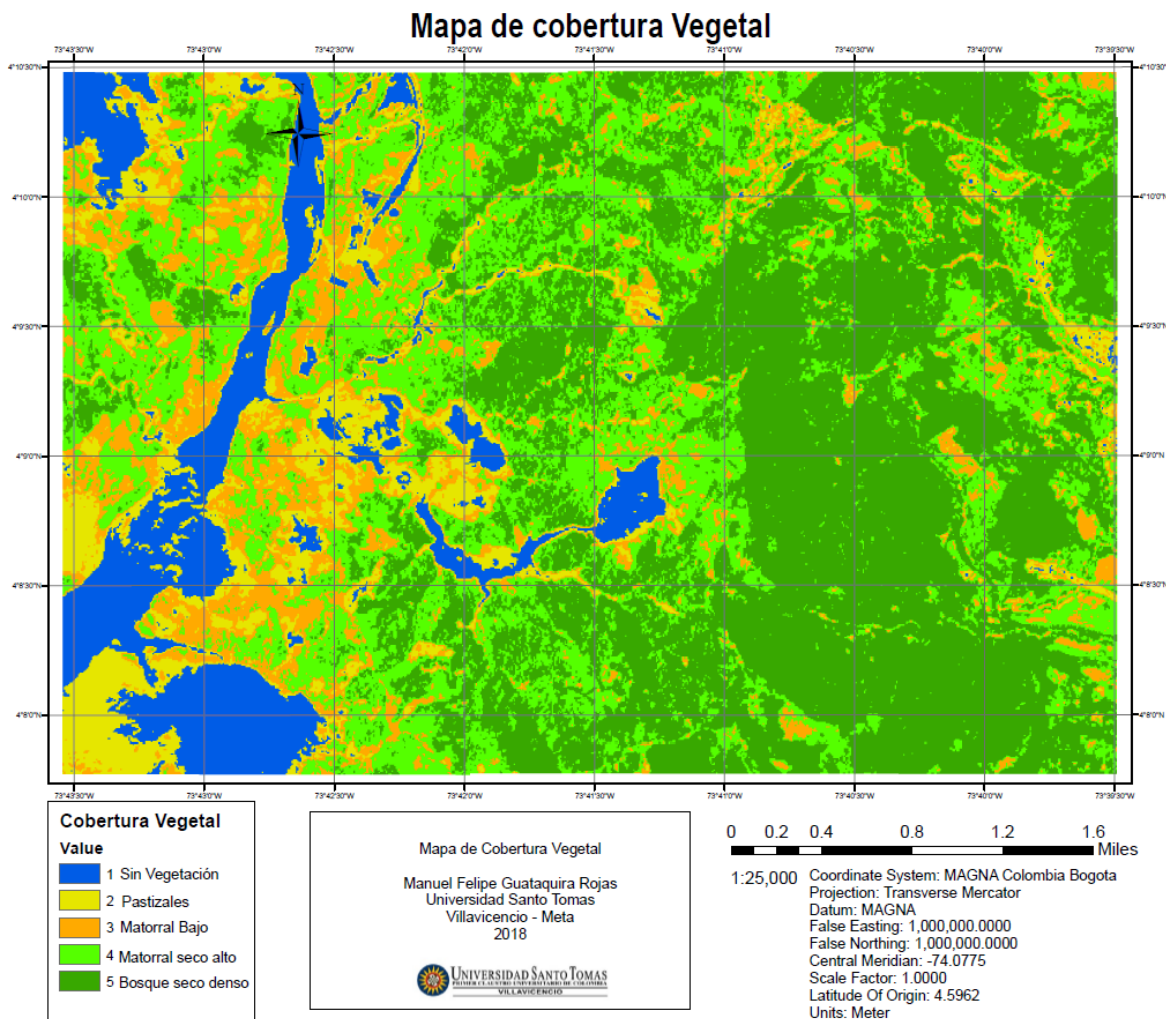
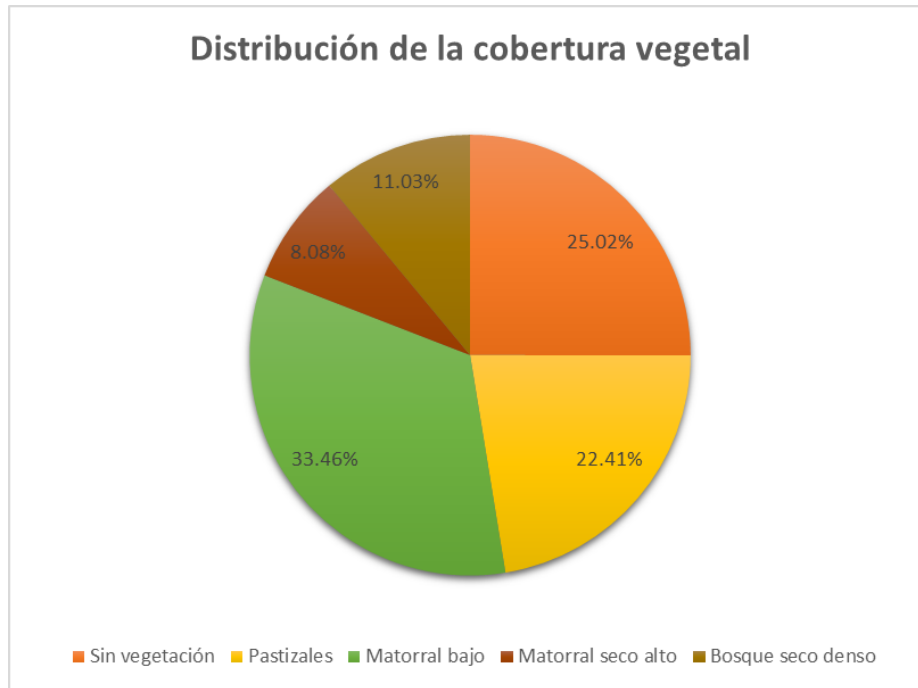


Figura 4- 11 Mapa de cobertura vegetal. Fuente: Autor

**Tabla 4- 6** Tabla de clasificación y calificación Suelo por el factor ITH

Rango	Descripción	Área (%)	Susceptibilidad	Calificación
10.996 - 12.527	Menor acumulación	25.77%	Media	3
12.527 - 13.879	↓	38.34%	Media	3
13.879 - 15.569		24.79%	Alta	4
15.569 - 18.423		7.91%	Muy Alta	5
18.423 - 23.260		Mayor acumulación	3.20%	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4- 12** Distribución de la cobertura vegetal. Fuente: Autor.

Los resultados que arrojó el NDVI, permitieron determinar la densidad y el tipo de vegetación presente en la zona, esto en términos porcentuales, dio como resultado que 25.02% del área se encuentra sin vegetación, en este grupo se encuentran las áreas con erosión, deslizamientos y los afluentes hídricos, por otro lado alrededor del 55.87% del área tiene una vegetación baja, dividida en pastizales y matorrales bajos; el restante del área contiene vegetación en matorral seco alto y bosque seco denso. Dado que el área de estudio hace parte de las zonas rurales de la ciudad de Villavicencio, se reafirma los datos arrojados por el NDVI ya que la zona de estudio no presenta áreas de urbanismo que puedan arrojar valores erróneos en la

interpretación del Índice de Vegetación Normalizado. En el anexo H se muestra la susceptibilidad por cobertura vegetal.

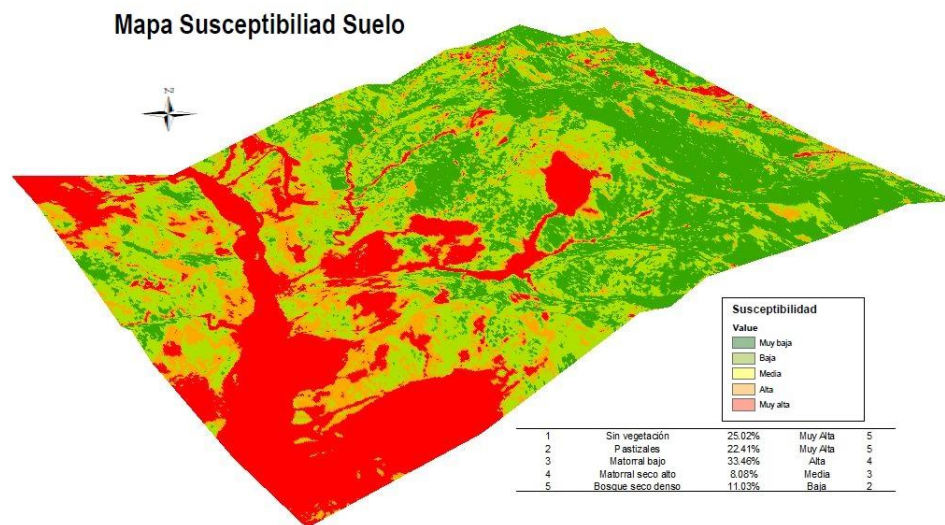


**Figura 4- 13** Vegetación existente en la zona de estudio. Fuente: Autor

**Tabla 4- 7** Tabla de clasificación y calificación de cobertura vegetal

Rango	Descripción	Área (%)	usceptibilidad	Calificación
1	Sin vegetación	25.02%	Muy Alta	5
2	Pastizales	22.41%	Muy Alta	5
3	Matorral bajo	33.46%	Alta	4
4	Matorral seco alto	8.08%	Media	3
5	Bosque seco denso	11.03%	Baja	2

Fuente: Elaboración propia

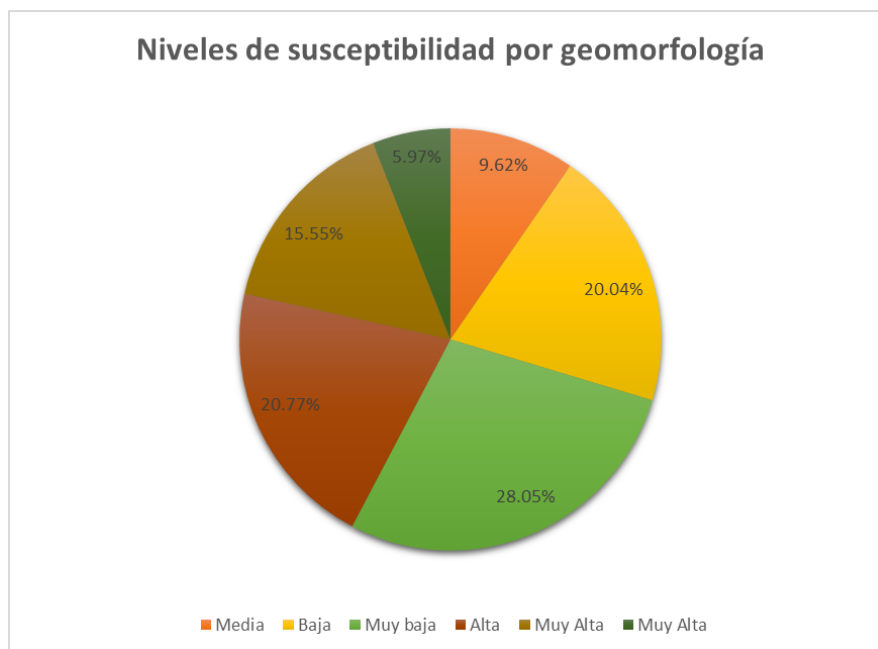


**Figura 4- 14** Mapa susceptibilidad Suelo. Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **5.1. Conclusiones**

Se realizó el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el sector Cerro de Buenavista mediante la calificación y clasificación de las variables de geomorfología, uso de suelo, y los movimientos de masa registrados, ver Anexo J, mediante un análisis heurístico de los factores detonantes. Con esto se determinó las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa, que son aquellas que presentan altas pendientes, geomorfología tipo espolones, escarpes o abanicos aluviales, así como también una baja densidad de vegetación. En términos generales, se clasificó el área de la plancha en tres niveles de susceptibilidad: baja, media y alta, el área por susceptibilidad baja se localiza en la parte este, y las zonas con susceptibilidad media y alta se localizan en la parte oeste cerca al río, esta distribución de la susceptibilidad está relacionada a las diferentes unidades geológicas presente en el sector Cerro de Buenavista.

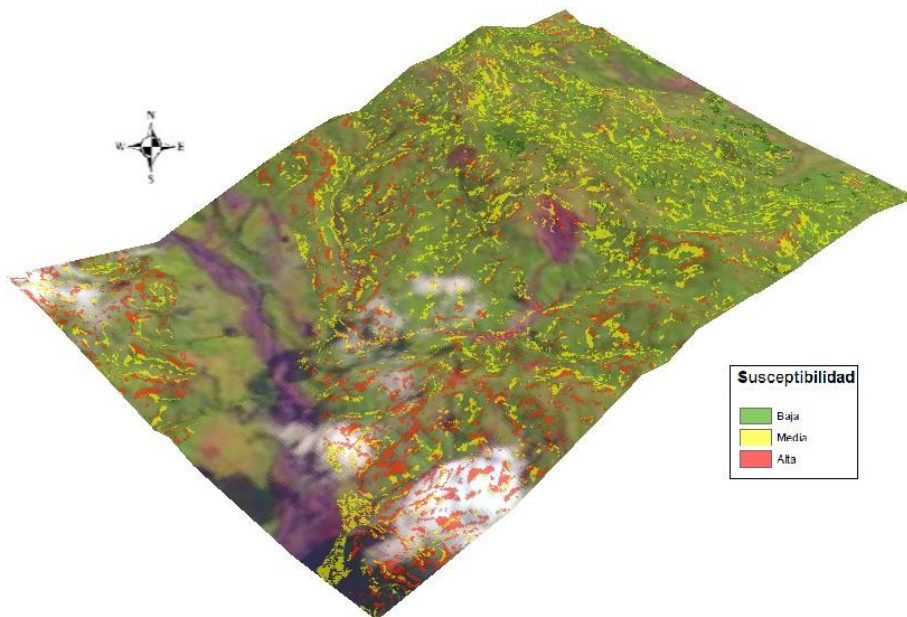


**Figura 5- 1** Representación porcentual de los niveles de susceptibilidad por Geomorfología. Fuente: Autor

En las zonas que presentaron mayores índices de humedad del suelo, anexo E, coinciden con las unidades geológicas filitas, rocas que presentan resistencia a la erosión, así mismo es en estas zonas donde se muestra mayor densidad de vegetación como se observa en el anexo I.

Mediante la aplicación del Índice Topográfico de Humedad se pudo determinar la acumulación de agua en el área de estudio, con los resultados arrojados se puede concluir que la capacidad de retención de agua por parte del suelo beneficia a la vegetación en las áreas más estables, pero también genera que se faciliten los flujos de tierra en las laderas más críticas. En el área de estudio se observa procesos erosivos fluviales y eólica, que desencadenan los grandes desplazamientos de tierra, todo esto ocasionado por la baja densidad de vegetación que predomina en el área, dado que el 80.89% de la superficie del suelo presenta matorrales bajos, pastizales y zonas sin vegetación, y en el área restante tan solo el 11.03% contiene bosques secos denso

**Mapa Susceptibilidad por Movimientos en masa**



**Figura 5- 2** Mapa susceptibilidad por movimientos en masa. Fuente: Elaboración propia

En la calificación del factor geomorfológico se encontró que alrededor del 65% del área es susceptible a la generación de movimientos en masa, esto debido a la geología estructural de la zona, los sistemas de falla que se encuentran, han ocasionado que se sigan generando laderas inestables. En cuanto a la morfometría de la zona, se tiene que aproximadamente el 52% del área tiene pendientes muy inclinadas, con valores de rugosidad altos, ver anexo B y C.

Las pendientes, anexo A, están relacionadas con la geomorfología, porque las unidades geomorfológicas se presentan en condiciones homogéneas del relieve, esto se pudo constatar al comparar el mapa de pendientes con el mapa de geomorfología, anexo D, del área en estudio. Otro aspecto que afecta la forma del relieve, es la curvatura, anexo B, la cual permite identificar en que puntos la aceleración al movimiento de masas son mayores, que como se ha mencionado con anterioridad son superficies cóncavas, cuya ubicación coincide en las geoformas de espolones.

Por otra parte, cabe resaltar que el uso de imágenes de satelitales en el estudio de la susceptibilidad es un insumo clave que está al alcance de las personas, el cual arroja resultados mediante el procesamiento en software, pero que debe verificarse con las visitas de campo o información existente. En la realización de este trabajo, el uso de Sistemas de Información Geográfica es una herramienta fundamental para hacer el manejo de toda la información, con interfaces gráficas que facilitan la comprensión de resultados.

## **5.2. Trabajos Futuros**

Este trabajo permitió identificar la susceptibilidad del sector Cerro de Buenavista a la generación de movimientos en masa, representado en un mapa temático que sirve de insumo para análisis de amenaza y vulnerabilidad de movimientos en masa de la zona. Es muy poco lo que se ha estudiado sobre esta zona, de manera que este es un pequeño avance para los futuros estudios de gestión del riesgo que se requieren en esta área rural del municipio de Villavicencio. Trabajar con Sistemas de Información Geográfica facilita la comprensión del área a analizar a través de diferentes imágenes satelitales, sin embargo, es importante hacer en lo posible recorridos en campos que den certeza o puedan arrojar más datos a los SIG.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.O.P.T, «Capítulo 5-Geomorfología,» de *Guías para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología.*, 1990, pp. 165-208.
- [2] O. Leiva, H. Moya, G. Trejos y J. Carvajal, Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa Escala 1:100.000, Bogota: Ministerio de Minas y Energía - Servicio Geológico Colombiano, 2012.
- [3] J. A. Zinck, «Physiography and Soils",» *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)*, vol. SOL 4.1, p. 156, 1998.
- [4] J. Pedreaza , «Cap. 5 Introducción a la Geomorfología,» de *Manual de Ingeniería Geológica*, Ministerio de Industria y Energía, pp. 1-59.
- [5] Servicio Geológico Colombiano, «Guia Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala detallada,» *Colección Guías y Manuales*, vol. 1, n° ISBN: 978-958-99528-5-6, p. 41, Mayo 2015.
- [6] E. Aristizabal y Y. Shuichiro , «Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá,» *DYNA*, vol. 73, n° 149, pp. 5-16, Julio 2006.
- [7] L. Lince, A. Castro, W. Castaño y F. Torres, «ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA EN LA REGION CAFETERA DE CALDAS,» *Revista Cenicafé*, vol. 1, n° 68, pp. 73-82, junio 2017.
- [8] J. Suarez, «Capítulo 1-Characterización de los movimientos,» *Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos*, p. 1, Julio 1998.
- [9] C. Sharpe, *Landslides and related phenomena: A study of mass movement of soil and rock.*, Nueva York: Columbia University Press, 1938, p. 137.
- [10] K. Terzaghi, «Mechanism of landslides. Application of geology to engineering practice.,» *Geol. Soc. of America*, vol. Berkey, pp. 83-123, 1950.
- [11] D. Cruden y D. Varnes, *Landslide types and processes*, vol. 247, Washington D.C: Transportation Research Board, National Research Council, 1996.
- [12] C. Vargas, «CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE

- MOVIMIENTOS EN MASA,» *Boletín de Geología*, vol. 22, n° 37, pp. 40-55, Diciembre 2000.
- [13] R. Mora, «Deslizamientos,» *Curso Internacional sobre Microzonificación y su Aplicación en la Mitigación de Desastres. Sección A-Fundamentos sobre deslizamientos*, Noviembre 2002.
- [14] Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones, Ley 1523 de 2012, 2012.
- [15] Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones, Decreto 1807 de 2014, 2014.
- [16] Por medio del cual se adopta el Plan Nacional de Gestión del Riesgo Desastres, Decreto 308 de 2016, 2016.
- [17] P. A. Restrepo, H. E. Martinez y C. A. Hidalgo, «Methodology for quantitative landslide risk analysis in residential projects,» *Habitat Interntional*, vol. 53, pp. 403-412, Enero 2016.
- [18] J. A. Galindo y I. A. Ayala, «Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: Análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México",» *investigaciones Geográficas, Boletín Instituto de Geografía*, n° 88, pp. 112-145, Octubre 2014.
- [19] M. G. Persichillo, M. Bordini y C. Meisina, «The role of land use changes in the distribution of shallow landslides,» *Science of the Total Enviroment, Department of Earth and Envoromental Sciences, University of Pavia*, pp. 924-938, 2016.
- [20] C. Obregon y J. Lara, «plicación del mapa de suscpetibilidad por procesos de geodinámica superficial a la gestión territorial,» *Revista del Intsituto de Investigación, RIIGEO*, vol. 17, pp. 73-80, Mayo 2014.
- [21] B. Pradhan, «A comparative study on the preductive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS,» *Computers & Geosciences*, vol. 51, pp. 350-365, Febrero 2013.
- [22] M. Mergili , C. M. Santiago y S. M. Moreiras, «Causas, características e impacto de los

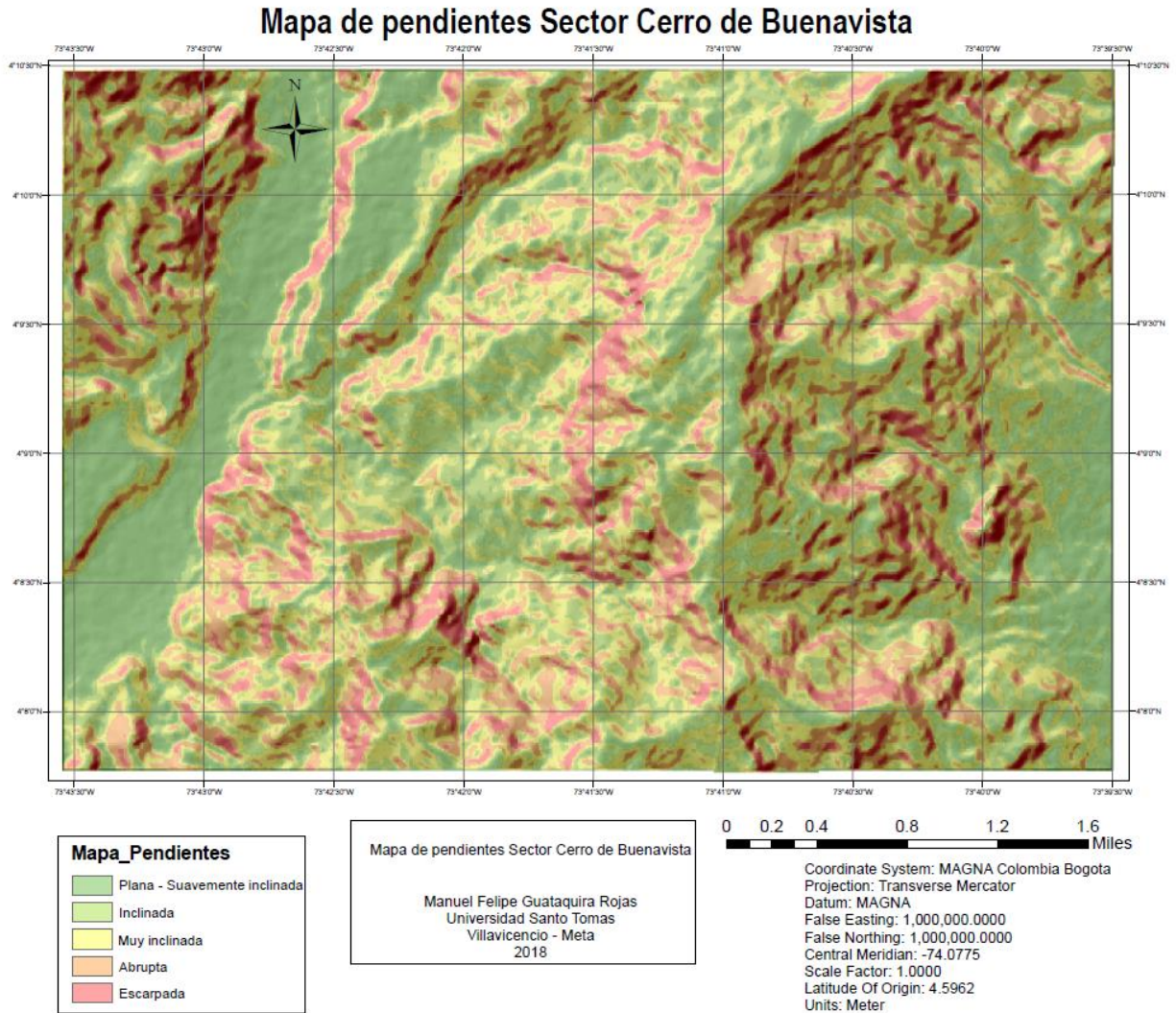
- procesos de reomoción en masa, en áreas contrastantes en la región Andina,» *Revista Colombiana de Geografía*, vol. 24, pp. 113-131, Julio 2015.
- [23] J. Vega y C. A. Hidalgo, «Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings,» *Geomorphology, Elsevier*, pp. 217-235, Julio 2016.
- [24] B. Vincenzo, F. Crianini, G. Leonardi y R. Palamara, «A Fuzzy-based Methodology for Landslide Susceptibility Mapping,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 223, pp. 896-902, 2016.
- [25] G. Colín, R. Fernández, M. Martínez, J. Ríos, P. Sánchez, E. Rubio y L. Ibáñez, «Clasificación digital de suelos a través de covariables ambientales de la cuenca del río México,» *Tierra Latinoamericana*, n° 35, pp. 281-291, Agosto 2017.
- [26] J. De Reu, J. Bourgeois, M. Bats, A. Zwertvaegher, V. Gelorini, P. De Smedt, W. Chu y M. Antrop, «Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes,» *Geomorphology*, vol. 186, n° ISSN 0169-55X, pp. 39-49, 2013.
- [27] A. C. Londoño, «Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales-caracterización-planificación-administración,» *Universidad del Tolima*, Marzo 2001.
- [28] F. Goelirch y I. Cantarino, «Rugosidad del terreno-Una característica del paisaje poco estudiada,» *Fundación BBVA*, n° 10, Octubre 2010.
- [29] R. D. Hobson, «Fortran IV programs to determine surface roughness in topography for the CDC 3400 computer,» *Northwestern University, Evanston*, p. 28, Junio 1967.
- [30] ESRI, «Esri,» 2017. [En línea]. Available: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>. [Último acceso: 27 Octubre 2017].
- [31] Servicio Geológico Colombiano, «Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000,» *Version 2*, Agosto 2013.
- [32] E. Hoke y E. T. Brown, «Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la practica,» *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Julio 1997.
- [33] O. V. Charman y B. W. Murphy, *Soils: their properties and management*, 2en ed.,

Melbourne y Oxford, Oxford University Press, 2000.

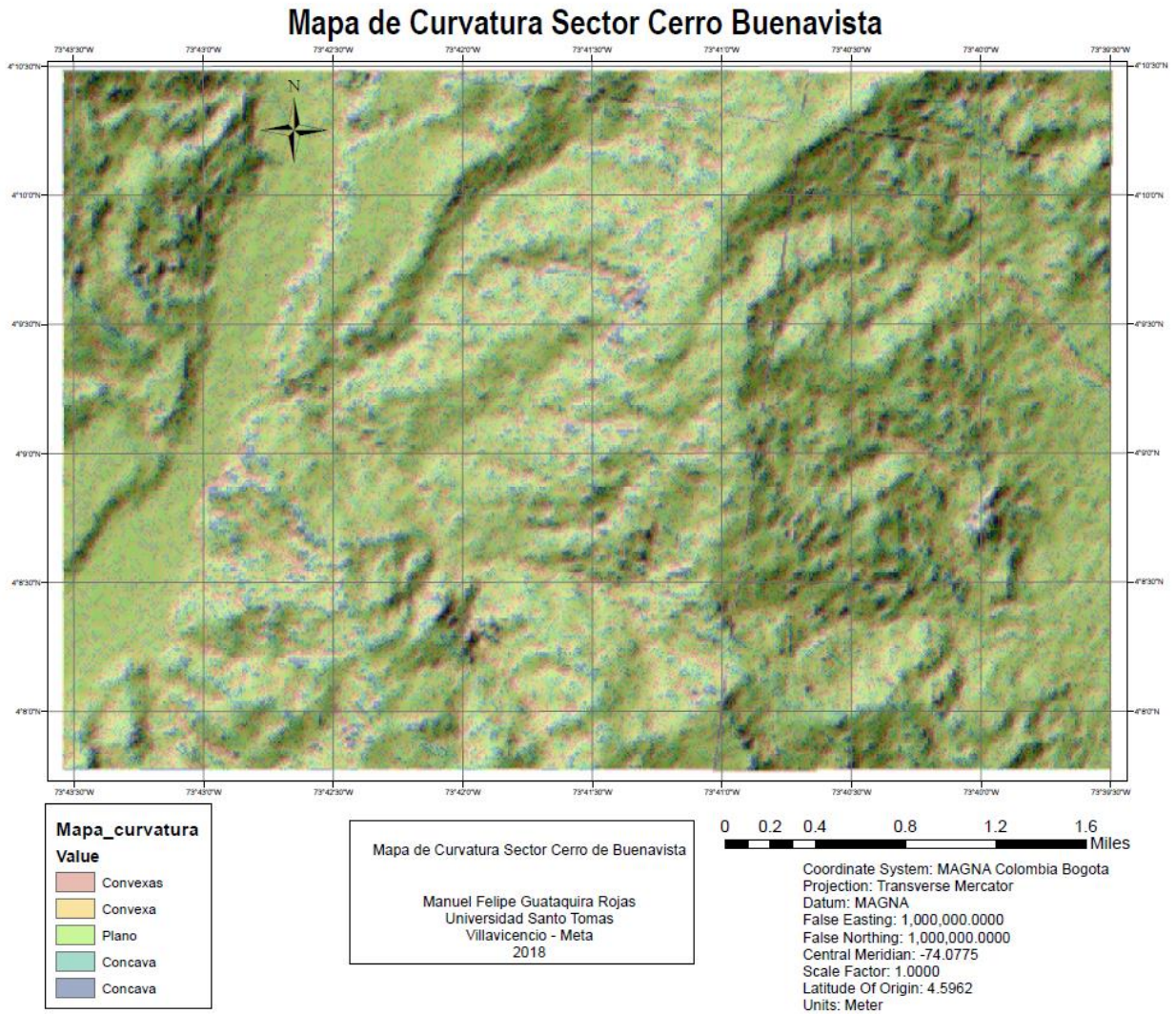
- [34] C. Meneses , «El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación de bosque,» *Unasyuva*, vol. 62, n° 238, pp. 39-46, febrero 2011.
- [35] D. Beltran, APLICACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN PARA EVALUAR PROCESOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA EN EL PARQUE FORESTAL EMBALSE DE NEUSA, Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2017.
- [36] J. Díaz, Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes áreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones a la agricultura de precisión, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2015.
- [37] R. Sorensen, U. Zinko y J. Seibert, «On the calculation of the topographic wetnes index: evaluation of different methods based on field observations,» *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, vol. 2, pp. 1807-1834, 2005.
- [38] C. Jaedicke, R. Wrihy, T. Vlastic y W. Spangle, «Slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region,» *Geological Survey Professional Paper*, n° 944, p. 96, 1979.
- [39] O. Pulido y L. Gómez, Geología de la plancha 266 Villavicencio, Ministerios de Minas y Energía, 2001.
- [40] J. Dorado, «Contribución al Conocimiento de la Estratigrafía de la Formación Brechas de Buenavista (límite Jurásico-Cretácico). Región Noreste de Villavicencio,» *Geología Colombiana*, n° 2, pp. 7-39, 1990.

## ANEXOS

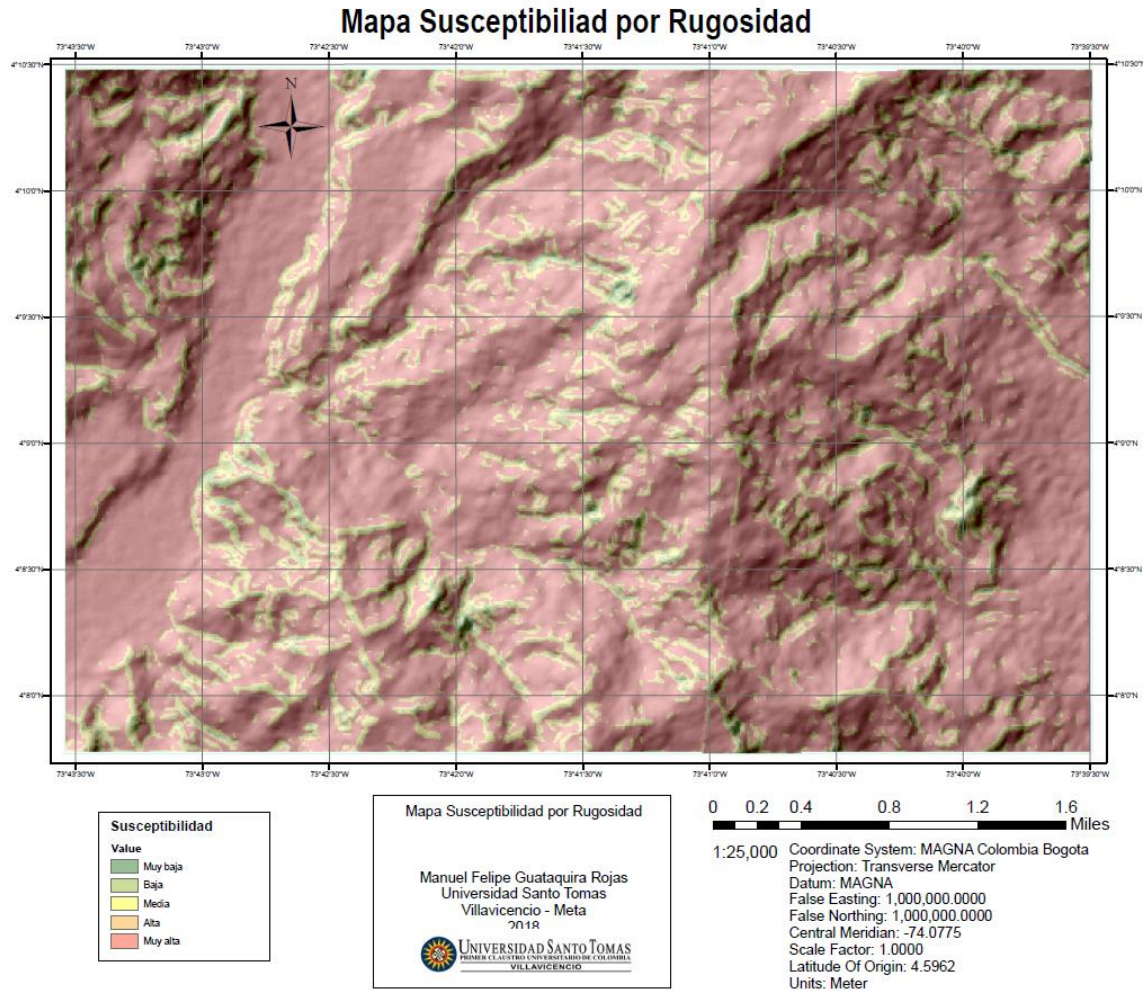
### Anexo A Mapa de pendientes



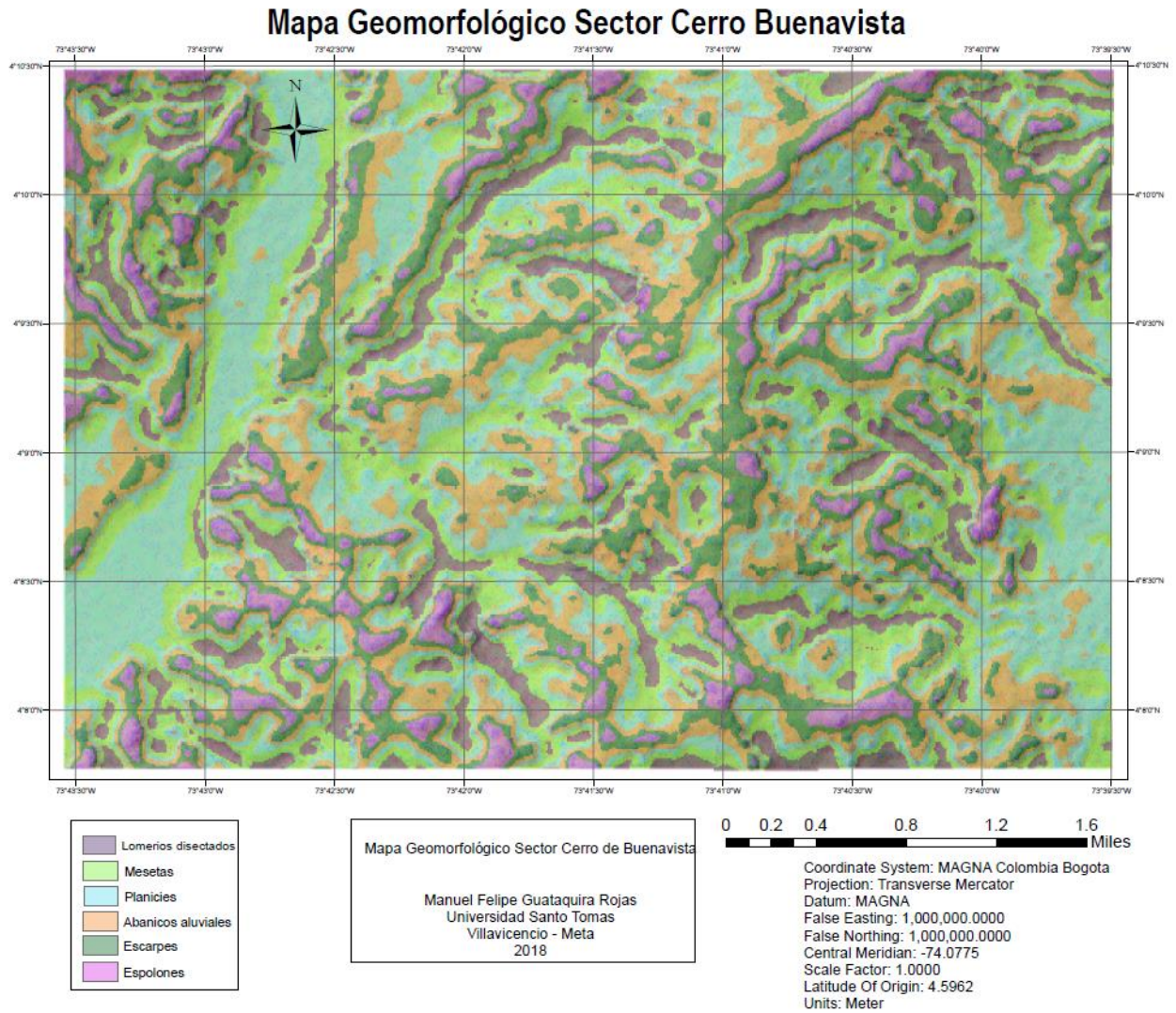
Anexo B Mapa de Curvatura



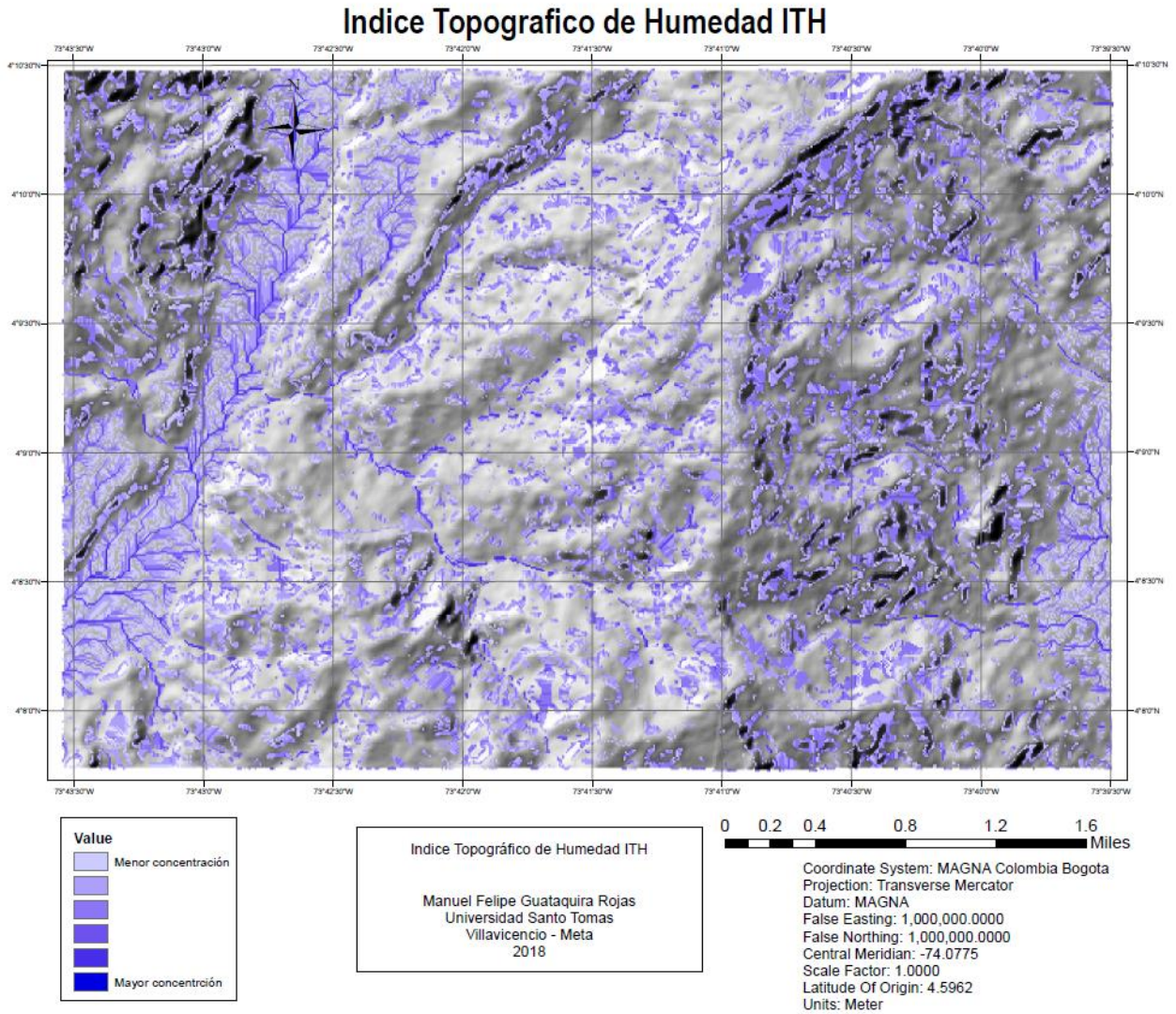
Anexo C Mapa de Rugosidad



**Anexo D** Mapa de geomorfología

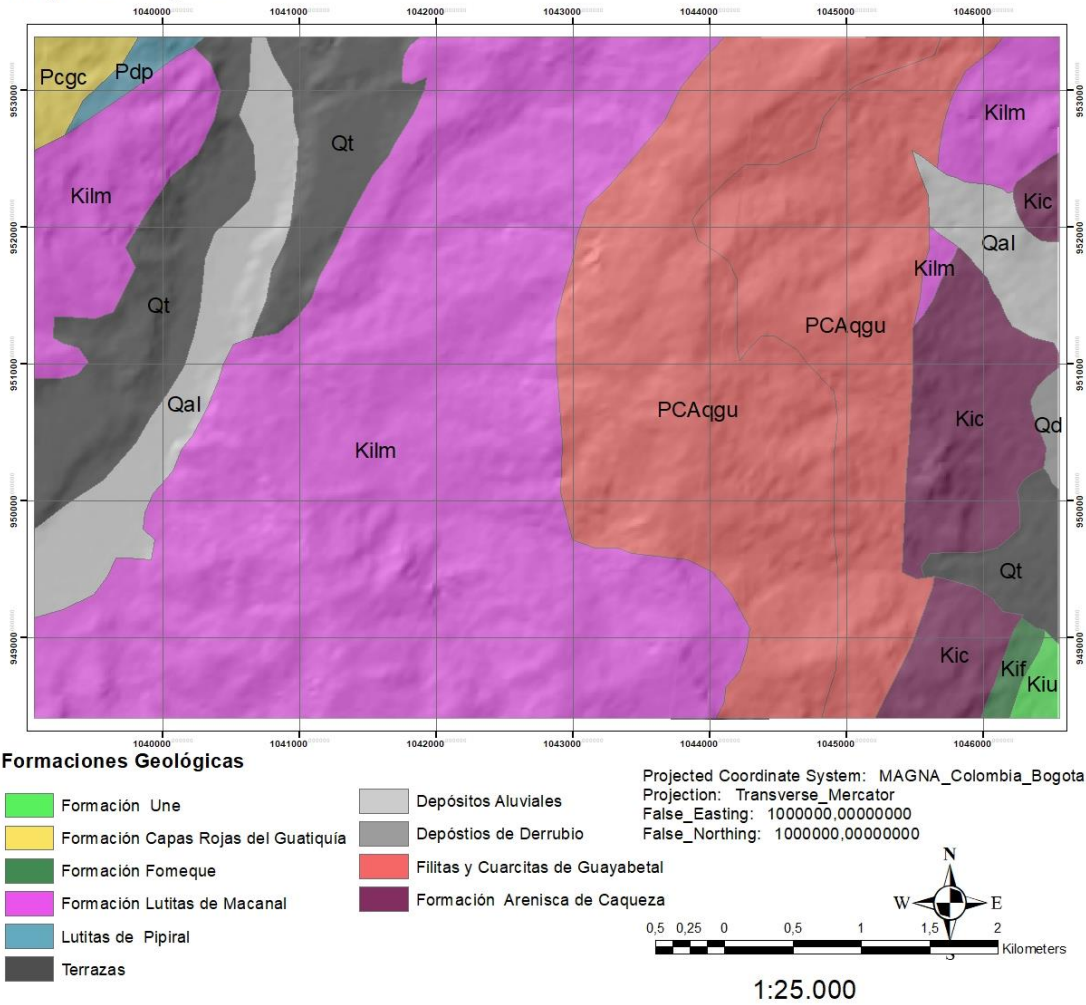


**Anexo E** Mapa de ITH



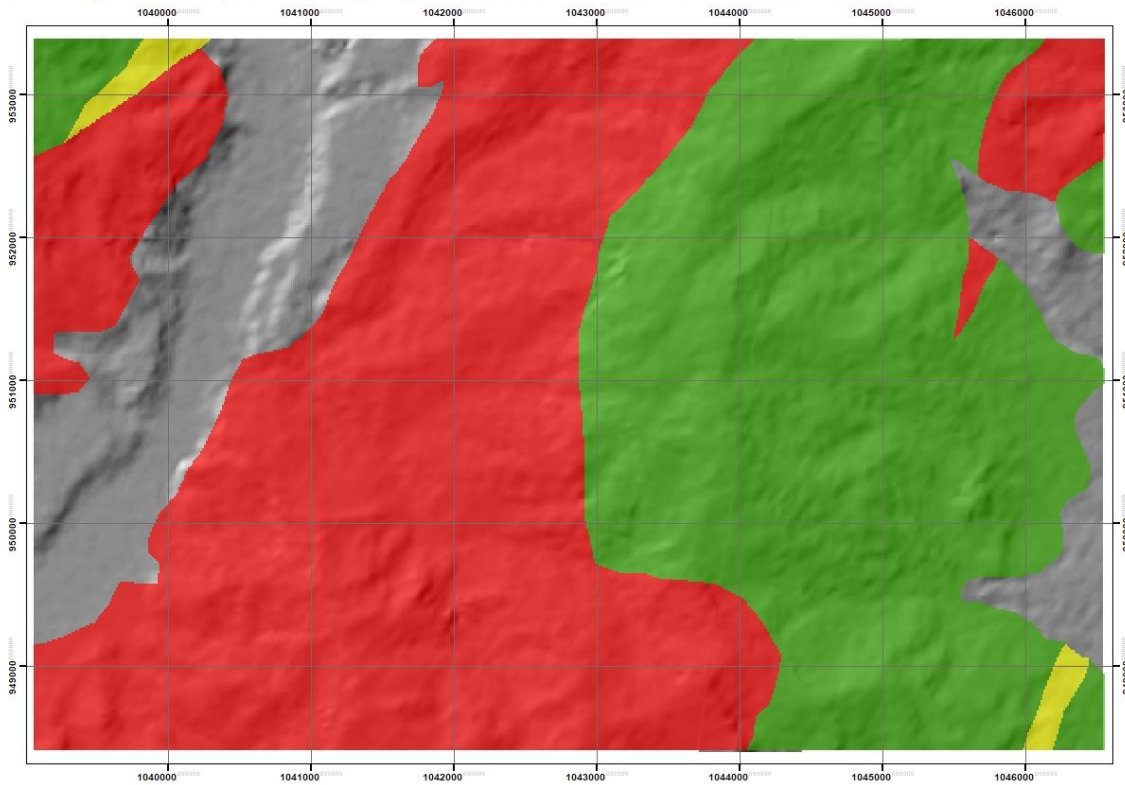
Anexo F Mapa de Geología

Mapa Geológico



**Anexo G** Susceptibilidad por Geología

Susceptibilidad por Geología (Grado de Resistencia de la Roca)



**Calificación Susceptibilidad**



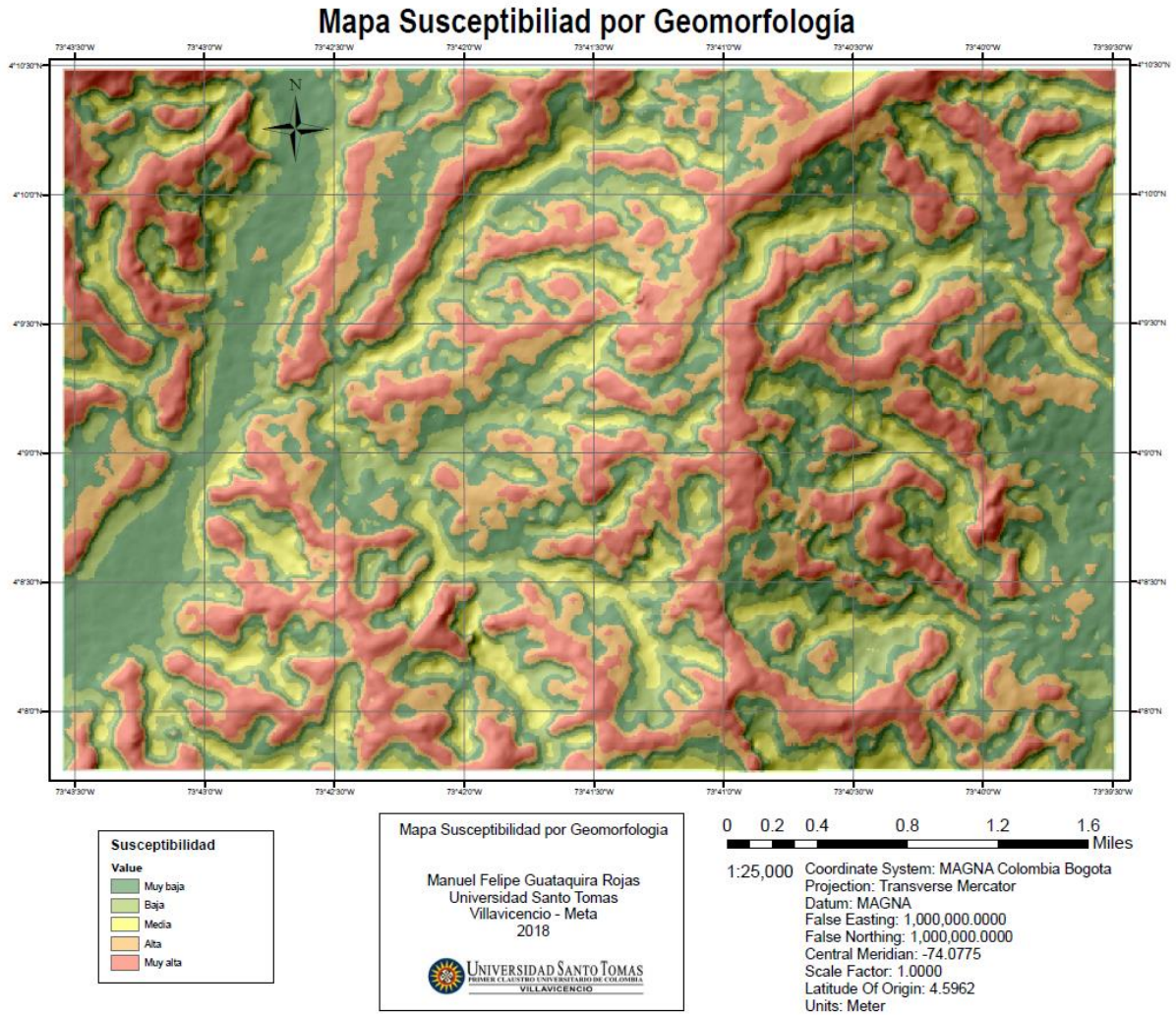
Projected Coordinate System: MAGNA\_Colombia\_Bogota  
Projection: Transverse\_Mercator  
False\_Easting: 1000000,00000000  
False\_Northing: 1000000,00000000



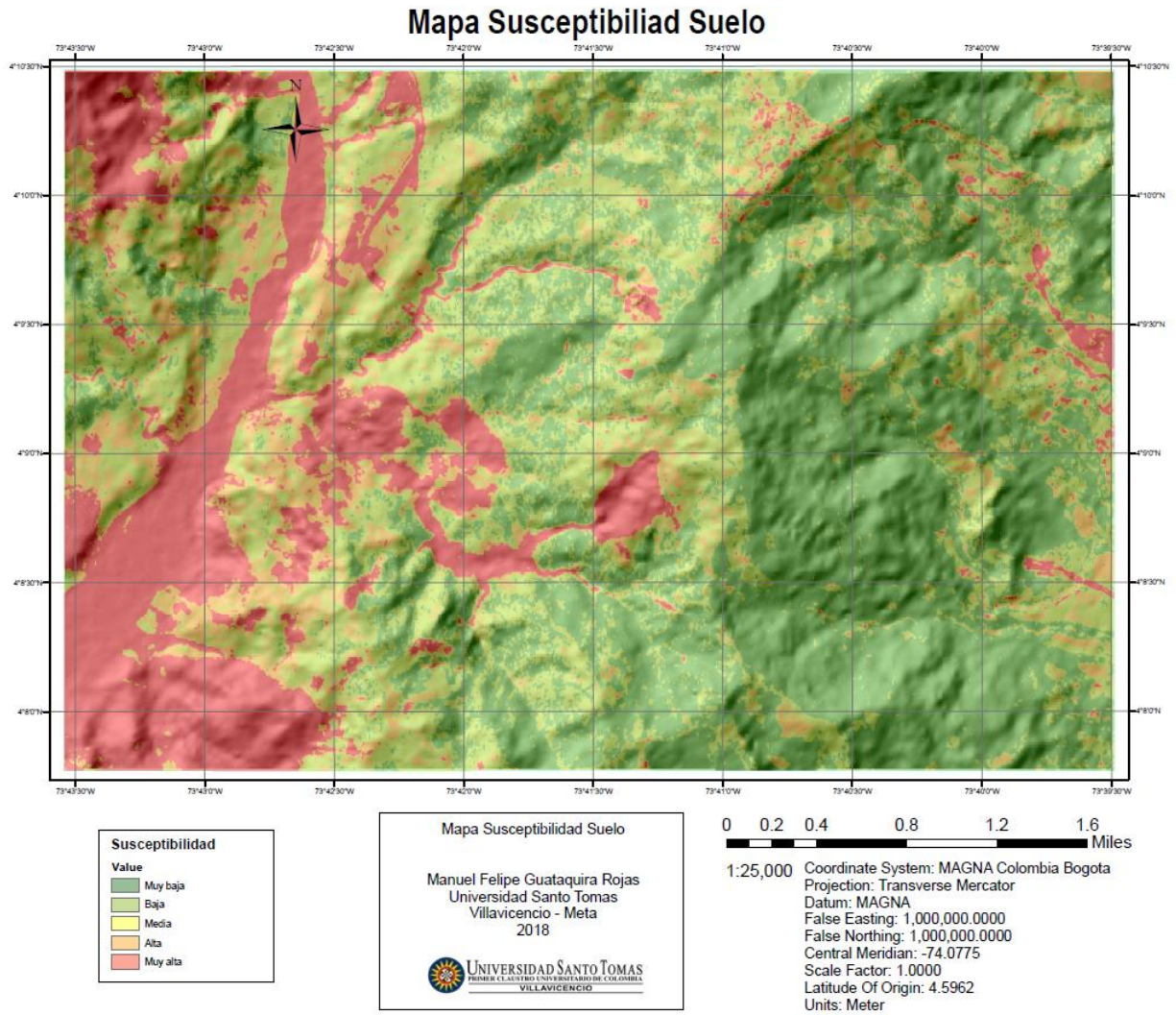
1:25.000



Anexo H Mapa susceptibilidad geomorfología



Anexo I Mapa susceptibilidad Suelo



Anexo J Mapa de susceptibilidad de movimientos en masa

