

**MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN  
MASA A ESCALA 1:10.000, EN UN SECTOR DE LA VIA DE LA VEREDA  
BALMORAL DEL MUNICIPIO DE FILADELFIA (CALDAS)**

**VIVIANA VELASQUEZ ORTIZ**

**UNIVERSIDAD DE CALDAS  
PROGRAMA DE GEOLOGIA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
MANIZALES**

**2019**

Nota de Aceptación.

APROBADO

---

---



---

Asesor práctica  
Universidad de Caldas

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres y mi familia por su apoyo incondicional durante todo el proceso.*

*Al asesor Diego Arango por su acompañamiento y aporte de conocimiento durante la ejecución del proyecto.*

*A la Universidad de Caldas y a los demás docentes por su aporte a mi formación como persona y profesional.*

*A Félix Ricardo por darme la oportunidad de ejecutar este proyecto en la Jefatura de Gestión del Riesgo, medio ambiente y cambio climático, a Rubén García por su aporte de conocimiento.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>6</b>
<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
<b>1.2.OBETIVO GENERAL.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.OBJETIVOS ESPECIFICOS.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4.LOCALIZACION.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5.METODOLOGIA.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.1. Recopilación De Información.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.2. Procesamiento De Datos.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.3. Zonificación de la Vía.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.4. Análisis multitemporal de las Coberturas de la Tierra.....</b>	<b>13</b>
<b>2. GEOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.Complejo Quebradagrande.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.Complejo Arquía.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.Formación Amagá.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.Tectónica.....</b>	<b>17</b>
<b>3. GEOMORFOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.Ambiente Denudacional.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.Ambiente Estructural.....</b>	<b>19</b>
<b>4. METODO DE ZONIFICACION.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.Asignación de los valores de peso para el atributo Geología.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2.Asignación de los valores de peso para el atributo Geomorfología.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.1. Morfometría.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2. Morfogénesis.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.3. Morfodinámica.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3.Asignación de los valores de peso para el atributo Suelos edáficos.....</b>	<b>34</b>
<b>4.4.Asignación de los valores de peso para el atributo Coberturas de la tierra.....</b>	<b>37</b>
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.1. Resultados del mapa de susceptibilidad de unidades cartográficas             geológicas.....</b>	<b>41</b>
<b>5.1.2. Resultados del mapa de susceptibilidad de unidades             Morfogenéticas.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1.3. Resultados del mapa de susceptibilidad de coberturas de la Tierra.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1.4. Resultados del mapa de susceptibilidad de suelos             edáficos.....</b>	<b>42</b>
<b>6. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA.....</b>	<b>42</b>
<b>6.1. Susceptibilidad Muy Baja.....</b>	<b>44</b>

6.2. Susceptibilidad Baja.....	44
6.3. Susceptibilidad Media.....	44
6.4. Susceptibilidad Alta.....	44
6.5. Susceptibilidad Muy Alta.....	44
7. ZONIFICACION DE LA AMENAZA.....	45
7.1.Amenaza Baja.....	49
7.2.Amenaza Media.....	49
7.3.Amenaza Alta.....	49
8. CONCLUSIONES.....	50
9. RECOMENDACIONES.....	51
10. BIBLIOGRAFIA.....	52

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localización del área de estudio.....	10
<b>Figura 2.</b> Mapa Topográfico y zonificación de la vía.....	12
<b>Figura 3.</b> Fotografía de un sector de la vía en la vereda Balmoral.....	13
<b>Figura 4.</b> Análisis multitemporal de las coberturas durante los años 2004, 2014 y 2018.....	14
<b>Figura 5.</b> Afloramiento al costado lateral de la vía con rocas sedimentarias muy silicificadas con evidencia de metamorfismo de bajo grado .....	15
<b>Figura 6.</b> Rocas sedimentarias de tipo areniscas y lutitas carbonosas con alto grado de meteorización.....	16
<b>Figura 7.</b> Mapa de unidades Geológicas.....	18
<b>Figura 8.</b> Mapa de unidades Geomorfológicas.....	20
<b>Figura 9.</b> Tazas de desplazamiento de las fallas en el cuaternario en Colombia. Tomado de Paris, G. Machette, M., Dart, R., Haller, K. 2000.....	22
<b>Figura 10.</b> Mapa de Pendientes.....	25
<b>Figura 11.</b> Mapa de suelos. Tomado del mapa de suelos del departamento de Caldas (IGAC)...	34
<b>Figura 12.</b> Mapa de Coberturas de la Tierra.....	37
<b>Figura 13.</b> Diagrama de Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad a escala 1:100.000, con sus respectivos porcentajes.....	40
<b>Figura 14.</b> Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en masa. Fuente de información Jefatura de Gestión del Riesgo, Medio Ambiente y Cambio Climático (JEDEGER), Servicio Geológico Colombiano (SGC) Y Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).....	42
<b>Figura 15.</b> Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa (Adaptado de: INGEOMINAS, 2009).....	44
<b>Figura 16.</b> Mapa detonante Sismo. Tomado del Servicio Geológico Colombiano.....	45
<b>Figura 17.</b> Mapa detonante Lluvia. Tomado del Servicio Geológico Colombiano.....	46
<b>Figura 18.</b> Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa. Fuente de información Jefatura de Gestión del Riesgo, Medio Ambiente y Cambio Climático (JEDEGER), Servicio Geológico Colombiano (SGC) Y Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).....	47

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hooke 1996.....	21
<b>Tabla 2.</b> Propuesta de calificación de las rocas dependiendo su fábrica y estructura.....	22
<b>Tabla 3.</b> Textura/Fábrica de las rocas. (Tomado INGEOMINAS (2004).....	23
<b>Tabla 4.</b> . Calificación propuesta tipo de fábrica. Tomado INGEOMINAS (2009).....	23
<b>Tabla 5.</b> Tabla de Susceptibilidad de la pendiente. Tomado INGEOMINAS 2011.....	26
<b>Tabla 6.</b> Valores de calificación Susceptibilidad de la rugosidad.....	26
<b>Tabla 7.</b> Clasificación de la Susceptibilidad del atributo Acuenca.....	26
<b>Tabla 8.</b> Calificaciones de las unidades Morfogenéticas.....	27
<b>Tabla 9.</b> Calificación del relieve relativo.....	33
<b>Tabla 10.</b> Calificación de la inclinación de la ladera.....	33
<b>Tabla 11.</b> Calificación de la textura de suelos.....	35
<b>Tabla 12.</b> Calificación de la taxonomía de suelos a nivel de Orden.....	35
<b>Tabla 13.</b> Calificación del drenaje natural del suelo. Tomado y modificado de INAT, 1.996. IDEAM, 2009.....	35
<b>Tabla 14.</b> Calificación de profundidad total, tomado IDEAM, 2009.....	36
<b>Tabla 15.</b> Calificación del tipo de arcilla. Tomado INGEOMINAS IDEAM 2009.....	36
<b>Tabla 16.</b> Categorización y calificación de la variable Drenaje Profundo. Fuente. <b>Criterio del Temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012</b> .....	37
<b>Tabla 17.</b> Categorización y calificación de la profundidad efectiva. Fuente. <b>Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA-2007)</b> .....	37
<b>Tabla 18.</b> Categorización y calificación de la variable Número de Estratos. Fuente. Criterio del temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012.....	37
<b>Tabla 19.</b> Categorización y calificación de la variable evapotranspiración. Fuente. Criterio del temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012.....	39

## **RESUMEN**

El objeto de este estudio es la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en un sector de la vía de la vereda Balmoral que comunica a Manizales con el municipio de Filadelfia en el Departamento de Caldas, a escala 1:10.000, donde se tienen en cuenta la mayor cantidad de factores que puedan desencadenar este evento.

Para realizar la zonificación se generan diferentes mapas temáticos tales como geología, geomorfología, suelos y cobertura de la tierra; donde se analizan cada una de las características que involucran estas variables en la ocurrencia de un deslizamiento.

Sumado a estas variables se tienen en cuenta detonantes sismo y lluvia, para determinar las zonas más potenciales a la generación de este fenómeno.

Como resultado se encuentran zonas con amenaza alta asociadas al sistema de fallas de atraviesa la zona por estar en constante actividad, sumado a inadecuados usos del suelo y pendientes abruptas que exponen fácilmente el área a la generación constante de movimientos en masa.

## 1. INTRODUCCION

El departamento de Caldas se ha caracterizado por su alto riesgo a generar movimientos en masa, por esto se hace necesario prevenir y mitigar el riesgo ya existente; estos movimientos en masa, afectan tanto a áreas urbanas como rurales y la Gobernación de Caldas tiene la obligación de velar por la seguridad en cuanto a la prevención y atención de desastres para ambos sectores del departamento.

El presente estudio fue enfocado hacia una parte de la vía en el sector de Balmoral, una vereda del municipio de Filadelfia localizada exactamente en la vía que comunica a este municipio con la ciudad de Manizales y que en temporadas de lluvia es afectada por movimientos en masa que afectan la movilización tanto vehicular como de personas y carga en ambos sentidos de la vía.

Teniendo presente que un deslizamiento es detonado por múltiples factores tales como saturación de agua, pendientes altas, usos inadecuados del suelo, movimientos sísmicos y zonas de fallas geológicas entre otros, un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de deslizamientos debe abordar la mayor cantidad posible de estos factores para determinar la verdadera influencia de cada uno de ellos y mitigar al máximo sus posibles efectos.

## 1.1.ANTECEDENTES

- AGUIRRE Y ZAPATA (1989) realizan un estudio geomorfológico y estructural en las vertientes del río Maibá, con el fin de determinar los factores que afectan en las obras de infraestructura.
- FUENTES (1990) estudió la relación entre la actividad tectónica del sistema de fallas Romeral y la formación de la cuenca sedimentaria entre la localidad de Tareas (al NW del municipio de Neira) y el municipio de Filadelfia.
- CUBILLOS Y SALAZAR (1992) zonificaron las amenazas geológicas en el municipio de Filadelfia con el objeto de mitigar las amenazas naturales que puedan presentarse.
- LINCE Y OROZCO (2001) estudiaron la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25000 y determinaron las características geotécnicas para los materiales en la zona de influencia del acueducto desde el río Chambery en la vereda el Diamante (al este de Aránzazu) hasta la cabecera municipal de Filadelfia (Caldas), con el fin de realizar las obras de control y prevención para el adecuado funcionamiento del acueducto.
- RAMIREZ Y VASQUEZ (2003) caracterizaron la susceptibilidad por movimientos en masa en escala 1:25000 de la Microcuenca Maibá en el municipio de Filadelfia (Caldas), analizando las condiciones de los materiales y los factores que generan estos movimientos, para una posterior mitigación o su completa eliminación.
- NARANJO (2005) estableció las relaciones tectónico-estratigráficas del sistema de fallas Romeral y las unidades de roca que comprenden la franja N-S desde el Río Otún (Risaralda) al sur, hasta el municipio de Filadelfia al norte.
- OSORIO Y RODAS (2011) efectuaron un análisis facial de la denominada informalmente cuenca sedimentaria de Filadelfia con el fin de mejorar la geología colombiana por medio de análisis sedimentarios detallados.

## **OBJETIVOS**

### **1.2.OBJETIVO GENERAL**

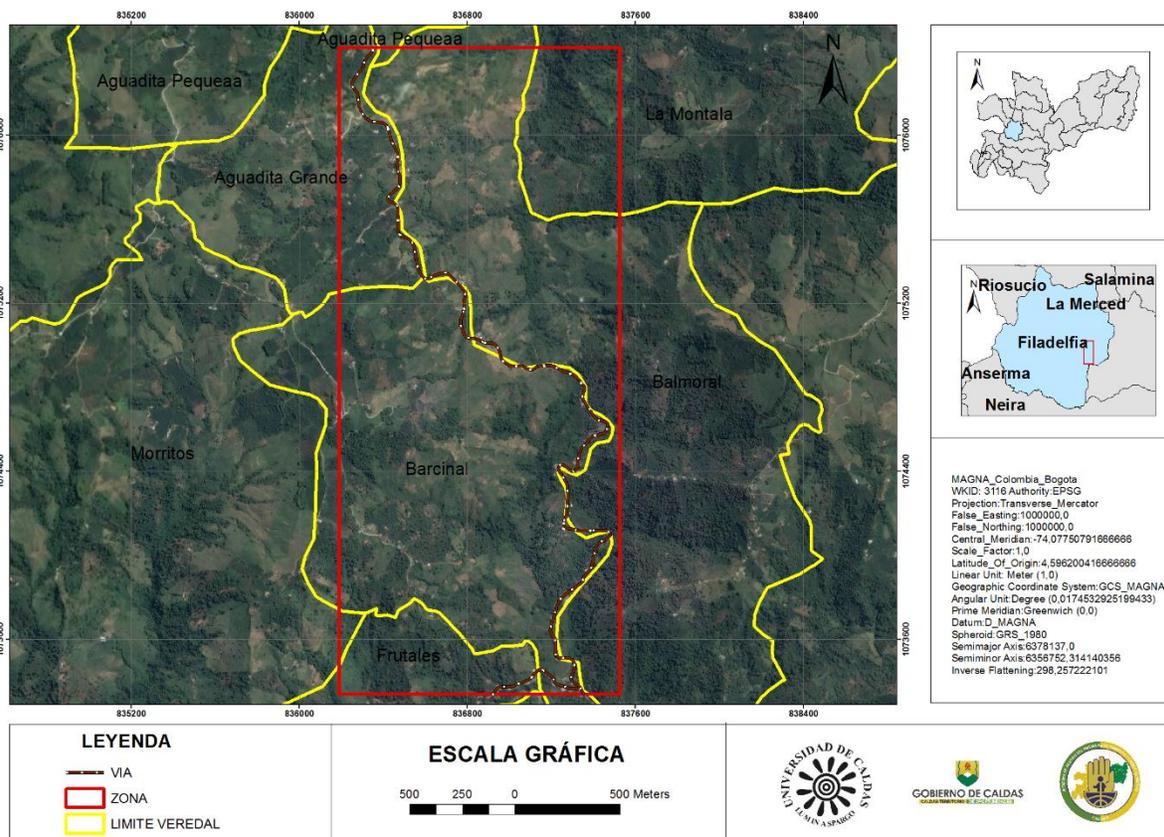
Elaborar mapa de amenaza por movimientos en masa en el sector de Balmoral perteneciente al municipio de Filadelfia a escala 1:10.000, aplicando la metodología de zonificación desarrollada por el servicio Geológico Colombiano y adaptándola a la escala de trabajo de acuerdo a los insumos disponibles.

### **1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar cartografía temática del sector (mapa geomorfológico, geológico, cobertura del suelo y pendientes en grados).
- Identificar el grado de amenaza y susceptibilidad a movimientos en masa para el sector de Balmoral.
- Realizar un análisis multitemporal de la cobertura del suelo para establecer como los cambios de esta pueden afectar el fenómeno de movimientos en masa en la zona de estudio.
- A partir de la zonificación realizada, sugerir posibles acciones de intervención con miras a mitigar y reducir los efectos negativos de los movimientos en masa en el área de estudio.

## 1.4. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra localizada en una parte de la vía que queda exactamente en el límite de la vereda Balmoral que comunica con la ciudad de Manizales; al norte limita con la vereda La Montala, al oeste con la vereda Aguadita Grande y al sur con la vereda Barcinal y Frutales (Figura 1).



**Figura 1:** Mapa de localización del área de estudio. Nótese como el área de estudio está distribuida entre las veredas La Montala, Aguadita Grande, Barcinal y Frutales que tienen como límite entre ellas la vía principal.

## **1.5. METODOLOGIA**

Para cumplir con los objetivos planteados se desarrollaron los siguientes pasos.

### **1.5.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

Como primer paso se investigó acerca de todos los estudios realizados en la zona, que incluyeron tesis de grado (programa de Geología de la Universidad de Caldas) , visitas técnicas hechas por la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) y por la secretaría de infraestructura de la Gobernación de Caldas.

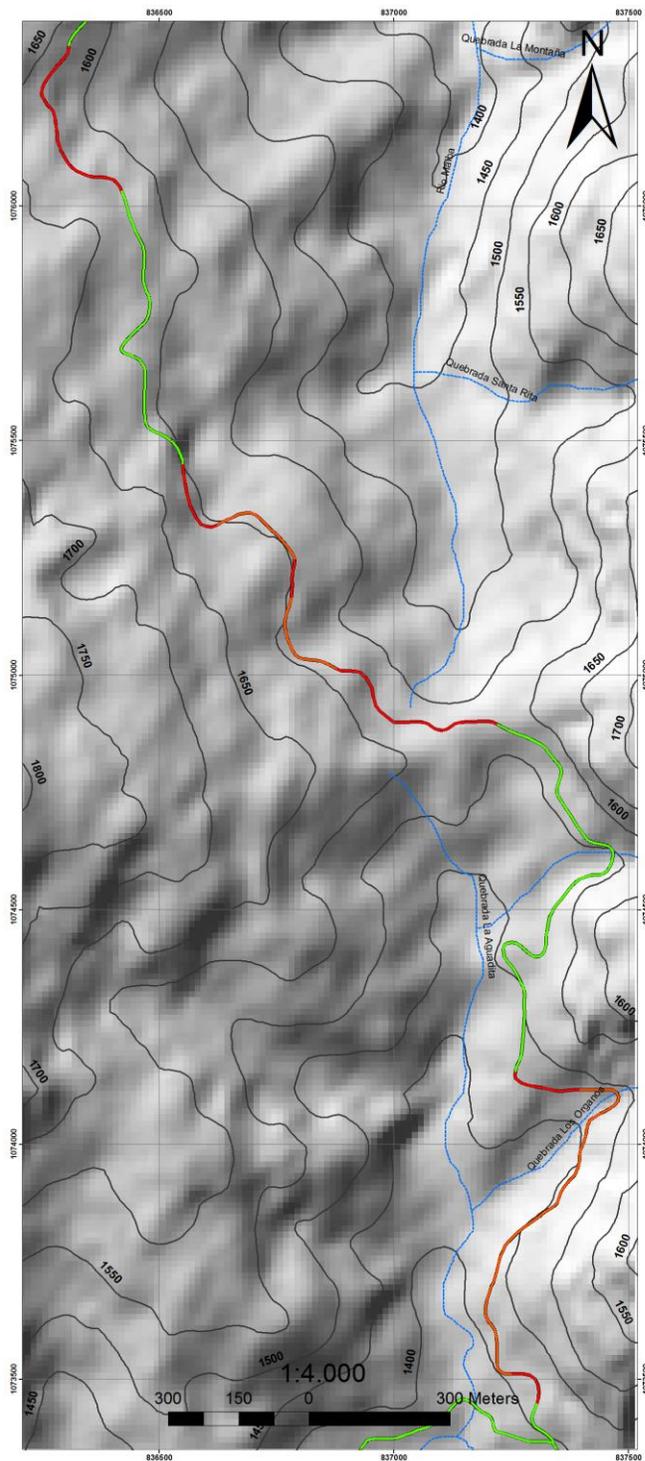
### **1.5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS**

Habiendo ya recopilado la información secundaria se complementó con visitas de campo, en las cuales se verificó el estado de la vía, identificando sectores pavimentados, parcialmente pavimentados y destapados; además se tuvo en cuenta la cobertura del suelo actual para así poder realizar el análisis multitemporal de esta variable.

La cartografía base fue suministrada por la Jefatura de Gestión del Riesgo, Medio Ambiente y Cambio Climático (JEDEGER) de la Gobernación de Caldas que incluyó drenajes, vías y límites veredales y con ayuda de la plancha geológica 206 (escala 1:100.000) del Servicio geológico colombiano se digitalizaron las unidades geológicas de la zona y a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12,5 metros se ajustaron los límites de estas y algunos trazos de fallas al nivel de detalle requerido para el estudio.

### **1.5.3. Zonificación de la Vía**

En la visita de Campo se recorre la vía presente en el área de estudio y se georeferencia con puntos GPS los lugares donde se evidencia un cambio en el estado del pavimento y se clasifica como: Pavimentada, parcialmente pavimentada y destapada; tomando la última categoría como los puntos más críticos, en los cuales se deben tomar medidas preventivas (Figura 2).



### LEYENDA

- Curvas de Nivel
- Drenajes

### VIA

#### Tipo

- Destapada
- Parcialmente Pavimentada
- Pavimentada

MAGNA\_Colombia\_Bogota  
 WKID: 3116 Authority:EPSG  
 Projection:Transverse\_Mercator  
 False\_Easting:1000000,0  
 False\_Northing:1000000,0  
 Central\_Meridian:-74,07750791666666  
 Scale\_Factor:1,0  
 Latitude\_Of\_Origin:4,596200416666666  
 Linear Unit: Meter (1,0)  
 Geographic Coordinate System:GCS\_MAGNA  
 Angular Unit:Degree (0,0174532925199433)  
 Prime Meridian:Greenwich (0,0)  
 Datum:D\_MAGNA  
 Spheroid:GRS\_1980  
 Semimajor Axis:6378137,0  
 Semiminor Axis:6356752,314140356  
 Inverse Flattening:298,257222101

UNIVERSIDAD DE CALDAS  
 SEMIN A SPARCO

GOBIERNO DE CALDAS  
 CALDAS PARA EL BIENESTAR DE SU PUEBLO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

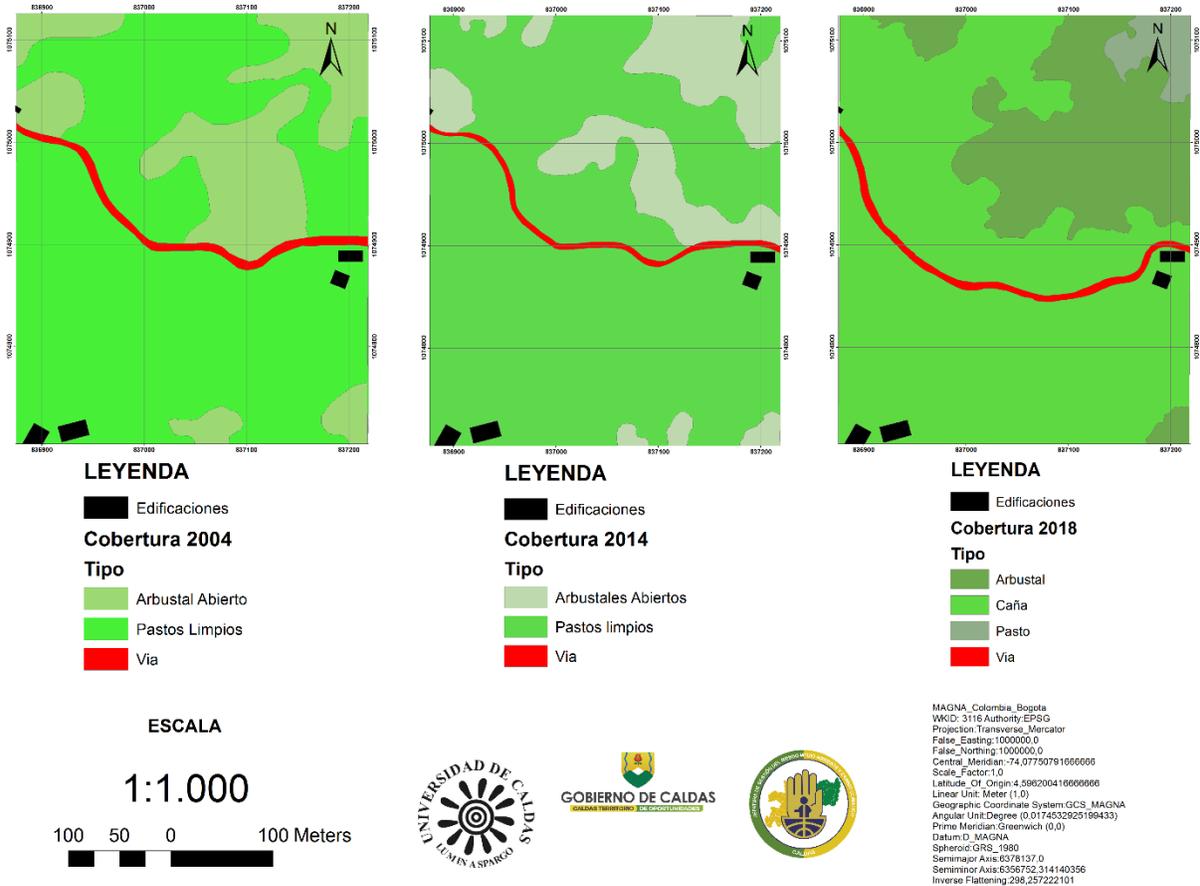
**Figura 2.** Mapa Topográfico y zonificación de la vía; nótese como predomina el estado parcialmente pavimentado de la vía. Fuente propia.

#### 1.5.4. Análisis multitemporal de las coberturas de la Tierra

Para realizar el análisis multitemporal se identificó un punto de mayor inestabilidad localizado en un sector de la vía de la vereda Balmoral donde la carretera se encuentra en mal estado (figura 3), por medio del programa Google Earth Pro se hallaron tres imágenes satelitales correspondientes a los años 2004, 2014 y 2018, con las cuales se comparó el tipo de coberturas y posteriormente se identificó los cambios durante estos años, con el fin de determinar que tanto influyen los tipos de coberturas en la generación de un movimiento en masa.



**Figura 3.** Fotografía de un sector de la vía en la vereda Balmoral. Nótese como la carretera se encuentra totalmente sin pavimentar y la cobertura de la tierra en esta zona corresponde a cultivos de caña y plátano principalmente.



**Figura 4.** Análisis multitemporal de las coberturas durante los años 2004, 2014 y 2018.

Durante el año 2004, predominaba la cobertura de tipo Pastos en cuanto a una cobertura más arbustiva. Mientras que para el año 2014, ya pasados 10 años la cobertura no varió mucho, sólo se evidenció una disminución en la cobertura de tipo arbustiva. Por último ya para el año 2018, se da un cambio en la cobertura de tipo Pastos a Caña panelera y aumenta el área de la cobertura de tipo arbustiva, es evidente también que para la actualidad se ha modificado el trazo de la vía como consecuencia del uso inadecuado del suelo y del poco control de aguas de escorrentía, sumado a la actividad tectónica de la zona.

## 2. GEOLOGIA DE LA ZONA

Para la obtención de este mapa se tomó la plancha 206 en escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano y se digitalizaron las unidades geológicas adaptándolas a la escala de trabajo y con ayuda del DEM de 12,5 metros se modificó el trazo de una de las fallas. La zona de estudio comprende tres unidades litológicas conocidas como Complejo Quebradagrande, Complejo Arquía y la Formación Amagá (figura 7).

### 2.1.COMPLEJO QUEBRADAGRANDE

“El complejo Quebradagrande se presenta en la cordillera central como una franja alargada, que aflora en las cercanías a Santa Fe de Antioquia donde se acuña entre rocas metamórficas del Complejo Cajamarca y el Complejo Arquía, y cuyos límites tectónicos corresponden al oriente por la Falla San Jerónimo, y al occidente por la Falla Silvia-Pijao (Maya y González, 1995)”.

En 1926 Grosse definió la unidad como un conjunto de derrames lávicos ácidos que presentan intercalaciones de sedimentos marinos, y derrames lávicos básicos formados por porfiritas diabásicas, augíticas y “meláfidos” (basaltos con plagioclasa) con tobas.

González (1980) diferencia dos miembros: uno volcánico con rocas de afinidad toleítica predominando lavas basálticas, andesitas y piroclastitas, y otro miembro sedimentario compuesto por lutitas carbonosas arcillosas y en menor proporción, areniscas feldespáticas, limolitas, liditas y localmente bancos de caliza negra. Según datos isotópicos revelan edades desde el cretáceo temprano hasta el cretácico tardío (figura 5-6).



**Figura 5.** Afloramiento al costado lateral de la vía con rocas sedimentarias muy silicificadas, con evidencia de metamorfismo de bajo grado.



**Figura 6.** Rocas sedimentarias de tipo areniscas y lutitas carbonosas con alto grado de meteorización.

## **2.2.COMPLEJO ARQUIA**

Restrepo y Toussaint (1974) describieron la unidad como un conjunto de rocas metamórficas de origen ígneo y sedimentario compuesto por esquistos cuarzo serícíticos, esquistos anfibólicos y anfibolitas granatíferas que se encuentran al occidente del complejo Quebradagrande.

Orrego et al (1980) relacionan los esquistos de Jambaló con el límite tectónico entre el complejo Arquía y el Complejo Quebradagrande.

Las metamorfitas del complejo Arquía según datos isotópicos indican un evento cretácico. Pero debido a métodos empleados y a la tectónica las edades pueden interpretarse de dos maneras: Para Restrepo y Toussaint (1975) son rocas que se formaron durante el Mesozoico y sufrieron metamorfismo posterior, mientras que para McCourt et al (1984) se trata de metamorfitas paleozoicas afectadas térmicamente en el cretáceo.

## **2.3. FORMACION AMAGA**

Es un conjunto sedimentario continental.

Grosse (1926) la describió como Terciario Carbonífero de Antioquia y como Formación Antioquia por Van Der Hammen (1960), compuesta por sedimentos

lacustres y continentales depositados en cuencas de diferentes tamaños y conservados en zonas de plegamiento (González, 1980).

González (1980) divide la formación en tres miembros: inferior, constituida por conglomerados polimícticos, areniscas conglomeráticas y algunas capas de arenisca arcillosa y arcillolita arenosa intercaladas con bancos de areniscas, el miembro medio en mayor proporción constituido por areniscas y arcillolitas de estratificación fina además de la presencia de mantos de carbón, y el miembro superior constituido por areniscas de color oscuro y arcillas de color ocre, deleznales.

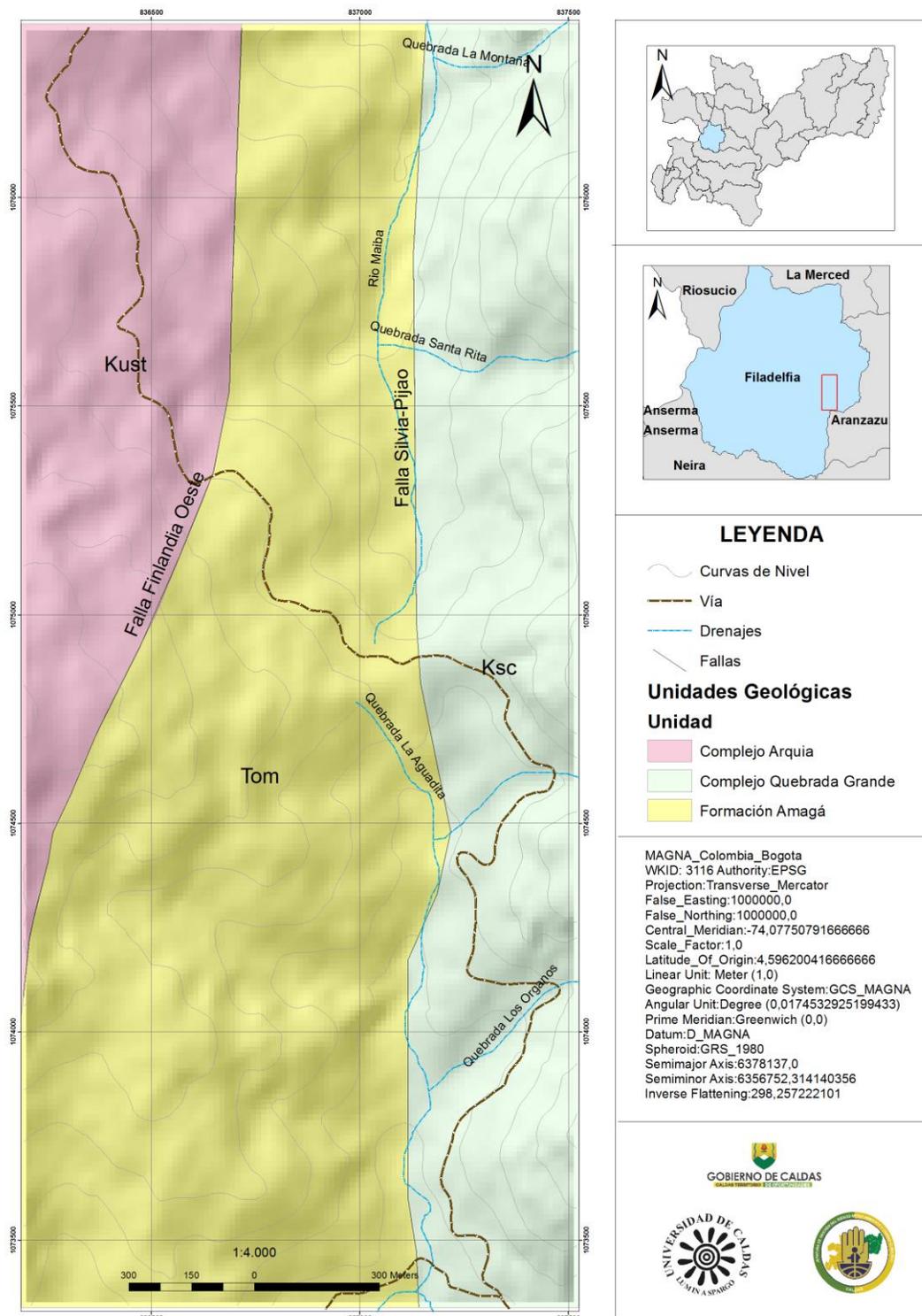
Van Der Hammen (1960) y González (1980) determinaron una edad del Oligoceno superior y la parte más alta del miembro superior como mioceno inferior. Por otra parte el miembro medio se le asigna una edad eoceno medio a oligoceno, por medio de estudios palinológicos (Escobar, 1982).

## **2.4. TECTONICA**

La zona de estudio se encuentra en el flanco oeste de la cordillera central en la zona de influencia del sistema de fallas Romeral, en este caso específico se asocia a la falla Silvia-Pijao que se extiende desde el Ecuador hasta el Noroccidente de Colombia y separa los complejos Quebradagrande y Arquía.

McCourt et al (1984) la define como una falla inversa de alto ángulo con componente de Rumbo Dextral; su trazo es bastante variable, teniendo en cuenta la sismicidad histórica, los fuertes efectos en las rocas del terciario superior clasifican esta falla de baja a moderada actividad.

Hacia el noroeste de la zona se ubica la falla Finlandia Oeste, nombre usado por primera vez por Naranjo y Estrada (1995), esta falla con la falla Silvia-Pijao limitan la cuenca pull apart en la zona.



**Figura 7.** Mapa de unidades Geológicas. Nótese como la mayor parte de la zona abarca la formación Amagá. Fuente Servicio Geológico Colombiano (SGC).

### 3. GEOMORFOLOGIA

A partir del DEM de 12,5 metros se delimitaron las unidades geomorfológicas y se clasificaron en base al Glosario de Unidades Geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano del año 2015 (figura 8).

#### 3.1. Ambiente Denucional

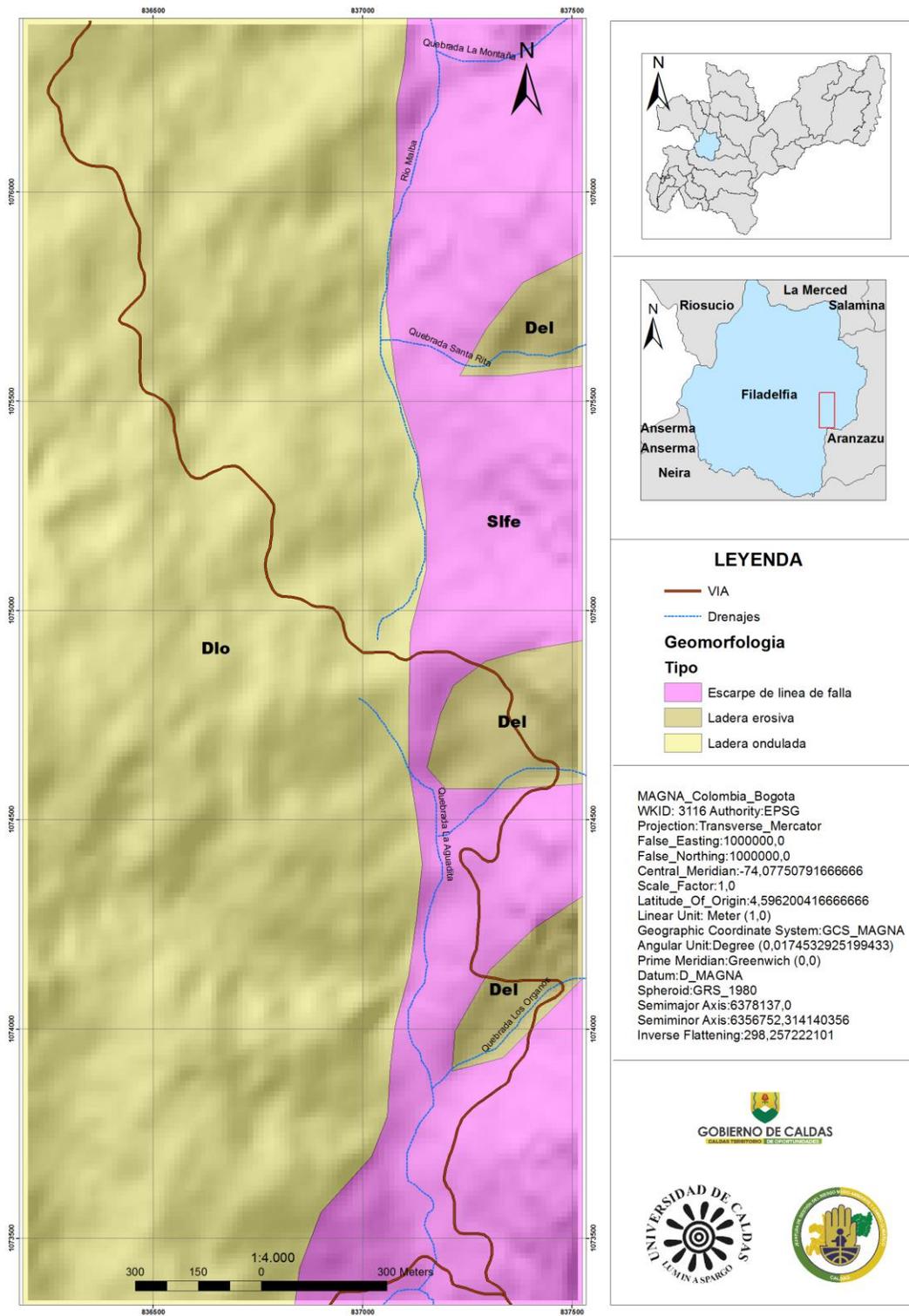
Incluye los relieves cuyas expresiones morfológicas resultan de la acción de procesos con diferentes grados de erosión, influyen procesos de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y crean nuevas formas de relieve (Servicio Geológico Colombiano).

- **Ladera erosiva – Dle:** Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas a extremadamente largas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos, como cárcavas, surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo o roca. Estas laderas no necesariamente están asociadas a una geoforma mayor o una estructura.
- **Ladera ondulada – Dlo:** Superficie en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparalelo. Estas laderas se pueden formar en suelos residuales y depósitos coluviales.

#### 3.2. Ambiente Estructural

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de las rocas, cuya expresión morfológica es definida por la tendencia y la variación en la resistencia de las unidades.

- **Escarpe de línea de falla (Slfe):** Plano vertical a subvertical corto a muy corto, cóncavo a convexo de pendiente abrupta. Su origen se relaciona a las superficies definidas por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas afectadas por procesos de erosión acentuada.



**Figura 8.** Mapa de unidades Geomorfológicas. Nótese como la mayor parte de la zona corresponde a Ladera Ondulada. Fuente propia.

## 4. METODO DE ZONIFICACIÓN

El método empleado para este estudio es el del Servicio Geológico Colombiano, denominado documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 y adaptado a la escala de trabajo; este método requiere la obtención de diferentes mapas como: Geología, geomorfología, suelos y coberturas de la tierra que se le asignan valores de peso dependiendo de su influencia para la generación de movimientos en masa.

### 4.1. Asignación de los valores de peso para el atributo Geología

A partir de las visitas de campo se pudo determinar las características requeridas para este parámetro como: grado de resistencia (tabla 1) y a partir de ésta se clasifica y se le asigna un valor de peso (tabla 2), densidad de fracturamiento (Figura 9) y textura-estructura (Tabla 3).

**Tabla 1.** Categorías de resistencia a la compresión simple de las rocas, según Hooke 1996.

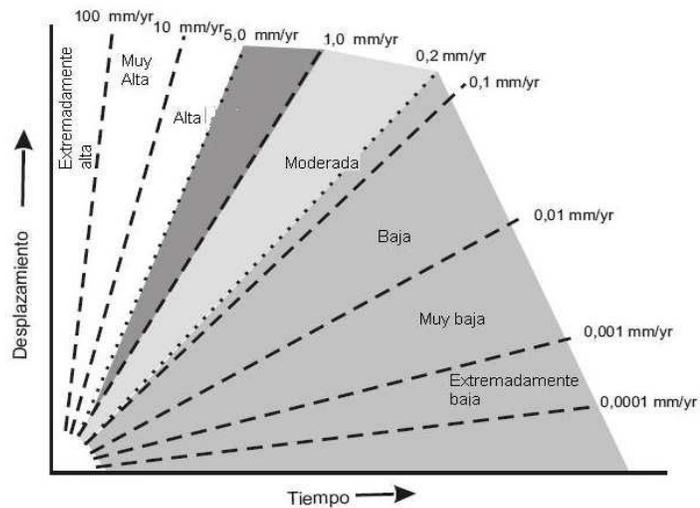
Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield high ambiguous results.

**Tabla 2.** Propuesta de calificación de las rocas dependiendo su fábrica y estructura.

Grado	Termino	Propuesta de calificación
R6	Extremadamente dura	1
R5	Muy dura	1
R4	Dura	2
R3	Moderadamente dura	3
R2	Blanda	4
R1	Muy blanda	5
R0	Extremadamente blanda	5



**Figura 9.** Tazas de desplazamiento de las fallas en el cuaternario en Colombia.  
Tomado de Paris, G. Machette, M., Dart, R., Haller, K. 2000.

De acuerdo con las tasas de desplazamiento de las fallas, se clasifican en 5 rangos:

Fallas con tasas de desplazamiento  $> 1.0$  mm/yr: peso asignado 10.

Fallas con tasas de desplazamiento entre  $0.2 - 1.0$  mm/yr: peso asignado 9.

Fallas con tasas de desplazamiento  $< 0.2$  mm/yr: peso asignado 8.

Resto de fallas de las cuales no se conoce su tasa de desplazamiento: peso asignado 7.

Pliegues: peso asignado 6.

**Tabla 3.** Textura/Fábrica de las rocas. (Tomado INGEOMINAS, 2004).

<b>Textura/Fábrica</b>	<b>Características</b>
Cristalina Masiva	En rocas de cualquier origen (ígneo, metamórfico o sedimentario) cuyas partículas minerales están entrelazadas y con orientación aleatoria. Corresponde a las rocas más resistentes y menos deformables, salvo las rocas volcánicas cuya calidad es un poco dispersa según sean porosas o no lo sean. Ejemplos: granitos, basaltos, calizas, chert, cuarcitas y mármoles.
Cristalina Foliada y Rocas de falla	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, con una orientación preferencial a lo largo de la cual las rocas son menos resistentes. Su calidad se dispersa como consecuencia de su fábrica orientada, es decir, por los planos de esquistosidad y foliación. Ejemplos: Pizarras, filitas, esquistos, milonitas.
Cristalinas Bandeadas	En rocas cuyas partículas minerales están mecánicamente entrelazadas, conformando bandas composicionales con alguna influencia direccional. Ejemplo: Neis.
Clásticas Cementadas	En rocas con partículas cementadas, con resistencia y deformación variable, dependiendo de la calidad del material cementante, la relación matriz-clastos y el grado de empaquetamiento general que posea. Ejemplos: areniscas, conglomerados.

<b>Textura/Fábrica</b>	<b>Características</b>
Clásticas Consolidadas	En estas rocas se presenta comportamiento variable esfuerzo-deformación, con direccionalidad de sus propiedades mecánicas. La resistencia se acrecienta con el grado de consolidación diagenética. Ejemplos: arcillolitas, lodolitas, shales.

**Tabla 4.** Calificación propuesta tipo de fábrica. Tomado INGEOMINAS (2009).

<b>Fabrica/estructura</b>	
<b>Atributo</b>	<b>Propuesta de Calificación</b>
N/A	0
Cristalina Masiva	1
Cristalinas Bandeadas	2
Clásticas Cementadas	3
Clásticas Consolidadas	4
Cristalina Foliada y Rocas de falla	5

## **4.2. Asignación de valores de peso para el atributo Geomorfología**

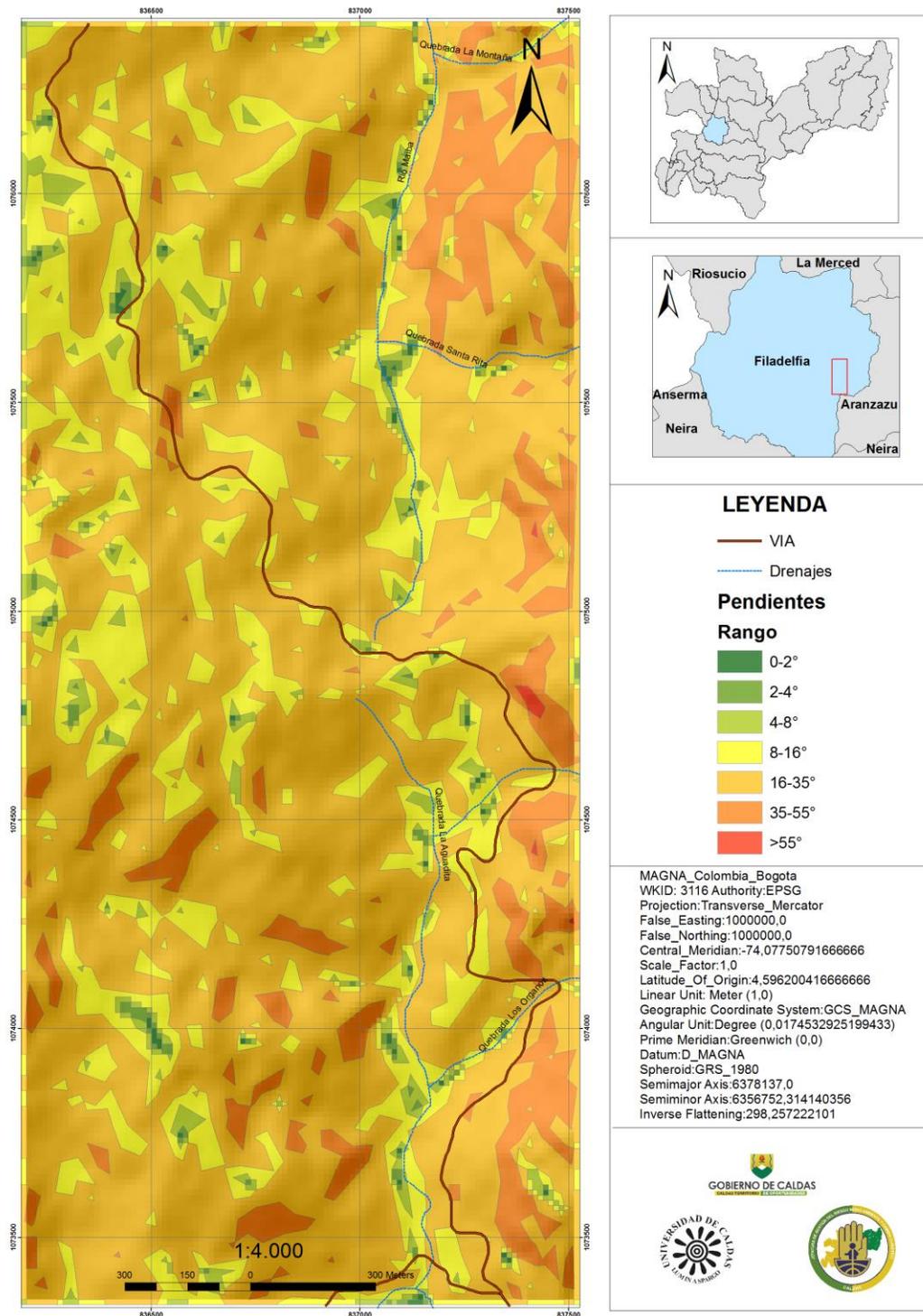
Este parámetro tiene en cuenta 3 características tales como: Morfometría, Morfogénesis y Morfodinámica.

### **4.2.1. Morfometría**

En esta característica se tiene en cuenta el modelo de elevación digital (DEM), el cual permite la calificación de cada una de las unidades geomorfológicas, trata aspectos como pendientes (figura 10) y se le asignan los valores de peso (tabla 5), rugosidad (tabla 6) y Acuenca (tabla 7).

### **4.2.2. Morfogénesis**

En esta característica se tienen en cuenta las causas y los procesos que modelaron el paisaje, además de los agentes exogenéticos (agua, viento, hielo) que lo modifican y son calificados dependiendo de su forma y el ambiente de formación (tabla 8).



**Figura 10.** Mapa de Pendientes. Nótese como la mayor parte de la zona presenta pendientes abruptas que varían entre los 16 y 35 grados de inclinación. Fuente propia.

**Tabla 5.** Tabla de Susceptibilidad de la pendiente. Tomado INGEOMINAS 2011.

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Susceptibilidad</b>
1	Plana a suavemente inclinada	Muy Baja
2	Inclinada	Baja
3	Muy inclinada	Media
4	Abrupta	Alta
5	Escarpada	Muy Alta

**Tabla 6.** Valores de calificación Susceptibilidad de la rugosidad.

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Susceptibilidad</b>
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

**NOTA:** Ante la carencia del insumo de Rugosidad con el fin de evitar un exceso o en el caso contrario defecto, se optó por darle una calificación intermedia.

**Tabla 7.** Clasificación de la Susceptibilidad del atributo Acuenca.

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Susceptibilidad</b>
1	Divisoria de Aguas o Lomos	Muy Baja
2	Escorrentía Lenta	Baja
5	Flujo Acumulado	Muy Alta
3	Drenaje no permanente	Media
1	Quebradas, Ríos	Muy Baja

**Tabla 8.** Calificaciones de las unidades Morfogenéticas

Código	Unidad	Ambiente	PGenético	Modelado	CalMgen
Ac	Canteras	2	1	1	4
Aca	Canal Artificial	2	1	0	3
Aemb	Embalses	0	1	0	1
Aemc	Explotación minera	2	1	0	3
Ap	Presa	0	1	0	1
Ar	Planos y campos de llenos antrópicos	2	1	1	4
Arb	Rellenos de basuras	2	1	1	4
Are	Rellenos de escombros y/o escombreras	2	1	1	4
Asa	Salinas	0	1	0	1
Ase	Excavaciones	2	1	0	3
Asp	Superficies de explanación	2	1	0	3
Ata	Terrazas agrícolas	2	1	0	3
Da	Altiplano	2	1	0	3
Dc	Clima	2	1	0	3
Dco	Cono o lóbulo coluvial y de solifluxión	2	1	1	4
Dcr	Collina residual	2	1	0	3
Dcnd	Collina residual disectada	2	1	0	3
Dcre	Collina remanente	2	1	0	3
Dcred	Collina remanente disectada	2	1	0	3
Dcrem	Cerro remanente o relicto	2	1	0	3
Dcremd	Collina remanente muy disectada	2	1	0	3
Dcndm	Collina residual muy disectada	2	1	0	3
Dcrs	Cerro residual	2	1	0	3
Dot	Cono flujos de detritos	2	1	1	4
Ddl	Cono de deslizamiento Indiferenciado	2	1	1	4
Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	2	1	1	4
Ddtr	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	2	1	1	4
Deem	Escarpe de erosión mayor	2	1	0	3
Deeme	Escarpe de erosión menor	2	1	0	3
Def	Escarpe facetado	2	1	0	3
Dfe	Cono de talus	2	1	1	4
Dft	Cono o lóbulo de Flujo Indiferenciado	2	1	1	4
Dg	Glacis	2	1	1	4
Dga	Glacis de acumulación	2	1	1	4

Dge	Glacia de erosión	2	1	0	3
DI	Inselberg	2	1	0	3
DI	Lomeríos Indiferenciados	2	1	0	3
Dicad	Cono o lóbulo de avalancha de detritos	2	1	0	3
Dicar	Cono o lóbulo de avalancha de rocas	2	1	0	3
Did	Loma denudada	2	1	0	3
Difd	Cono o lóbulo de flujo de detritos	2	1	1	4
Difi	Cono o lóbulo de flujo de lodo	2	1	1	4
Dlor	Loma residual	2	1	0	3
Dires	Lomo residual	2	1	1	4
Dmo	Montículo y ondulaciones denudacionales	2	1	0	3
Dp	Planicie	2	1	0	3
Dpa	Pedimentos de acumulación	2	1	1	4
Dpad	Planos aterrazados o durcostras	2	1	0	3
Dpcd	Planicie colinada denudada	2	1	0	3
Dpcr	Planicie colinada residual	2	1	0	3
Dpd	Pedimentos	2	1	1	4
Dpe	Pedimentos de erosión	2	1	0	3
Dpn	Penillanura o peneplanicie	2	1	0	3
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	2	1	0	3
Dsd	Sierra denudada	2	1	0	3
Dsr	Sierra residual	2	1	0	3
Dtos	Terrazas o mesas calcetras o sillcretas	2	1	0	3
Dts	Terrazas sobreelevadas "colgadas"	2	1	1	4
Eb	Barjanas o Barchanes	1	1	1	3
Edln	Dunas costeras sin diferenciar	1	1	1	3
Edl	Dunas Longitudinales	1	1	1	3
Edp	Dunas parabólicas	1	1	1	3
Edr	Campo de dunas remontantes	1	1	1	3
Eds	Campo de dunas de sombra	1	1	1	3
Edtr	Dunas Transversales	1	1	1	3
Edu	Dunas	1	1	1	3
Edua	Dunas antiguas	1	1	1	3
Ema	Mantos de arena eólica	1	1	1	3
Eml	Mantos de Loess	1	1	1	3
Ed	Superficies de deflación (blowouts)	1	1	0	2
Fa	Albardones o dique natural	0	1	1	2
Faa	Abanico fluviotorrential	0	1	1	2

Fbc	Barra compuesta	0	1	1	2
Fbl	Barra longitudinal	0	1	1	2
Fbp	Barra puntual	0	1	1	2
Fca	Cauce aluvial	0	1	0	1
Fcd	Cuenca de decantación (Basines)	0	1	1	2
Fody	Cono de deyección	0	1	1	2
Fdd	Delta de desborde natural	0	1	1	2
Fdl	Delta lacustrino	0	1	0	1
Fea	Escarpe de abanico fluvial	0	1	0	1
Fig	Laguna	0	1	0	1
Fim	Lago en media luna	0	1	0	1
Fma	Meandro abandonado	0	1	1	2
Fpa	Plano anegadizo	0	1	1	2
Fpac	Planicie aluvial confinada	0	1	1	2
Fpl	Plano o llanura de inundación	0	1	1	2
Fpl	Plano y artesa lagunar	0	1	1	2
Fpla	Planicie y delta lacustrino	0	1	1	2
Fta	Terraza de acumulación	0	1	1	2
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	0	1	0	1
Ftan	Terraza de acumulación antigua	0	1	1	2
Ftas	Terraza de acumulación subrecente	0	1	1	2
Fte	Terraza de erosión	0	1	0	1
Ftee	Escarpe de terraza de erosión	0	1	0	1
Ga	Aguja glaciar (Horn)	2	1	0	3
Gc	Circo glaciar y de nivación	2	1	0	3
Gce	Cuesta estructural glaciada	2	1	0	3
Gogf	Conos glaciofluviales	2	1	1	4
Gclc	Ladera estructural de cuesta estructural glaciada	2	1	0	3
Gcle	Ladera estructural de cuesta estructural glaciada	2	1	0	3
Gclg	Cono o lóbulo de gelifración	2	1	1	4
Gd	Drumlin	2	1	0	3
Gee	Espolón estructural glaciado	2	1	0	3
Geg	Espinazo glaciado	2	1	0	3
Geglc	Ladera en contrapendiente de espinazo glaciado	2	1	0	3
Gegle	Ladera estructural de espinazo glaciado	2	1	0	3
Gfv	Fiancos de valle Glaciar	2	1	0	3
GFV	Flujo volcánico glaciado	2	1	1	4
Gg	Masa Glaciar	2	1	1	4

Gktg	Kame y Terraza de gelifración	2	1	1	4
Glg	Laguna Glaciar	0	1	0	1
Gma	Morrena de ablación	2	1	1	4
Gmf	Morrena de fondo	2	1	1	4
Gml	Morrena lateral	2	1	1	4
Gmt	Morrena terminal o frontal	2	1	1	4
Gpcs	Planos y conos de sobrelavado glaciar	2	1	1	4
Gpgl	Plano Glaciolacustrino	2	1	1	4
Gsag	Sierra anticlinal glacida	2	1	0	3
Gsalc	Ladera contrapendiente sierra anticlinal glacida	2	1	0	3
Gsale	Ladera estructural sierra anticlinal glacida	2	1	0	3
Gshg	Sierra homoclinal glacida	2	1	0	3
Gshic	Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal glacida	2	1	0	3
Gshle	Ladera estructural de sierra homoclinal glacida	2	1	0	3
Kcñ	Plano encajonado por carstificación	1	1	0	2
Kd	Dolina	1	1	0	2
Klc	Lomo de carstificación	1	1	0	2
Kp	Polje	1	1	0	2
Kpo	Ponor	1	1	0	2
Ks	Sima	1	1	0	2
Ktc	Torre carstica	1	1	0	2
Ku	Uvala	1	1	0	2
Kvc	Valle ciego	1	1	0	2
Kvca	Valle carstico	1	1	0	2
Ma	Acantilado	0	1	0	1
Mas	Abanico de sobrelavado	0	1	1	2
Mba	Bajos arrecifales	0	1	0	1
Mbe	Barra espiga o Barrera (cordón litoral, bahía barrera, isla barrera, barriers, barriers spits, baymouth barrier)	0	1	1	2
Mbl	Barras litorales	0	1	1	2
Mbr	Beachrocks	0	1	1	2
Mcc	Complejos de crestas y artesas de playa (planos de crestas de playa, playas antiguas)	0	1	1	2
Mcpy	Complejo de crestas y artesas de playa	0	1	1	2
Mdf	Delta de flujo de marea	0	1	1	2
Mdpd	Lobulos y planos deltaicos actuales	0	1	1	2
Mdps	Llanuras deltaicas subrecientes	0	1	1	2
Mdr	Delta de refujo de marea	0	1	1	2
Mds	Deltas de sobrelavado de playas	0	1	1	2

Sp	Plancha	3	0	1	4
Ssae	Ladera estructural de sierra anticlinal	3	0	1	4
Ssan	Sierra anticlinal	3	0	1	4
Ssbe	Sierra de barras estructurales	3	0	1	4
Ssh	Sierra homoclinal	3	0	1	4
Sshic	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	3	0	1	4
Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal	3	0	1	4
Sslp	Sierra y lomos de presión	3	0	1	4
Ssp	Laguna de falla	0	1	0	1
Sss	Sierra sinclinal	3	0	1	4
Sssic	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	3	0	1	4
Sssle	Ladera estructural de sierra sinclinal	3	0	1	4
Svc	Plano aluvial confinado	3	0	1	4
Svl	Volcán de lodo	3	0	1	4
Vc	Cráter volcánico	2	0	0	2
Vce	Escarpe de cráter	2	0	1	3
Vcf	Campo fumarólico	2	0	0	2
Vch	Campo de hummocks	2	0	0	2
Vcl	Cono lahárico	2	0	1	3
Vcoe	Cono de escoria o cono de ceniza	2	0	1	3
Vcr	Caldera	2	0	0	2
Vd	Domo volcánico remanente	2	0	1	3
Ve	Volcán o edificio volcánico	2	0	1	3
Vee	Estratovolcán ó cono compuesto	2	0	1	3
Ves	volcán escudo	2	0	1	3
Vfl	Flujo de lava	2	0	1	3
Vfla	Flujo lahárico aterrazado	2	0	1	3
Vflaa	Flujo de lava en bloque (aa)	2	0	1	3
Vflae	Escarpe de flujo lahárico aterrazado	2	0	1	3
Vflal	Flujo de lava almohadillada	2	0	1	3
Vflc	Flujo de lava cordada (pahoehoe)	2	0	1	3
Vfle	Escarpe de flujo de lava	2	0	1	3
Vflp	flujo piroclástico aterrazado	2	0	1	3
Vflpe	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	2	0	1	3
VI	Ladera volcánica	2	0	1	3
Vlg	Laguna volcánica	0	1	0	1
Vm	Maar	2	0	1	3
Vmp	Manto de proclastos	2	0	1	3

Me	Espiqa (Flecha litoral, barra espiqa, puntales)	0	1	1	2
Ml	Isia	0	1	0	1
Mlc	Laguna costera (albufera, ensenadas, lagoons)	0	1	0	1
Mll	Llanura Intermareal (llanuras de marea, planos mareales, tidal fans)	0	1	0	1
Mpa	Plataforma de abrasión (plataforma marina, rasa litoral, shore platform, Wave-cut plataform)	0	1	0	1
Mpl	Planos de Inundación (zonas bajas de inundación, cubetas de derrame, swale)	0	1	0	1
Mpl	Playas	0	1	1	2
Mplr	Pilares	0	1	0	1
Mpv	Planos y llanuras con vegetación halófila (Pantano Intermareal, marismas, Pantanos de manglar, saltmarshes )	0	1	0	1
Mtc	Tómbolo	0	1	1	2
Mtm	Terrazas marinas (terrazas costeras, plataforma arrecifal)	0	1	1	2
Sbf	Terraza o berna de fallamiento	3	0	1	4
Sbh	Barra homoclinal	3	0	1	4
Sc	Cuesta	3	0	1	4
Scce	Cerro estructural	3	0	1	4
Sclc	Ladera de contrapendiente de cuesta	3	0	1	4
Scle	Ladera estructural de cuesta	3	0	1	4
Scor	Comisa estructural	3	0	1	4
Sct	Cuenca de tracción	3	0	0	3
Sdd	Domo diapírico	3	0	1	4
Se	Espinazo	3	0	1	4
Sefo	Espolón facetado	3	0	0	3
Sefes	Espolón festoneado	3	0	1	4
Seic	Ladera de contrapendiente de espinazo	3	0	1	4
Sele	Ladera estructural de espinazo	3	0	1	4
Ses	Espolón	3	0	1	4
Sft	Faceta triangular	3	0	0	3
Sgf	Gancho de flexión	3	0	1	4
Sles	Ladera escalonada	3	0	1	4
Slf	Lomos de falla	3	0	1	4
Sife	Escarpe de línea de falla	3	0	0	3
Sift	Lomo de falla con faceta triangular	3	0	0	3
Slo	Lomo de obturación	3	0	1	4
Sm	Meseta estructural	3	0	1	4
Sme	Escarpe de meseta	3	0	0	3
Smle	Superficie tabular de meseta	3	0	1	4

### 4.2.3. Morfodinámica

Esta característica representa cartográficamente el transporte de suelos, por medio de un inventario de visitas de campo, fotointerpretación y del modelo de elevación digital (DEM) donde se deben agrupar aspectos tales como: Relieve relativo (tabla 9) e inclinación de la ladera (tabla 10).

**Tabla 9.** Calificación del relieve relativo.

INTERVALOS DE ALTURA	DESCRIPCION DEL RELIEVE	RESISTENCIA RELATIVA DEL MATERIAL	CALRELIE
< 50m	Muy bajo.	Materiales muy blandos y erosionables.	1
50 – 200 m	Bajo.	Blando erosionable.	1
200 – 400 m	Moderado.	Moderadamente blando y erosión alta.	2
400 – 1000 m	Alto.	Resistente y erosión moderada.	3
1000 – 2500 m	Muy alto.	Muy resistente y erosión baja.	3
> 2500 m	Extremadamente alto.	Extremadamente resistente y erosión muy baja.	3

**Tabla 10.** Calificación de la inclinación de la ladera

INCLINACION (Grados)	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL Y	CALINCLI
< 5	Plana a suavemente	Muy blanda y Muy baja susceptibilidad a MM.	1
5 – 10	Inclinada.	Blanda y baja MM.	1
10 – 15	Muy Inclinada.	Moderadamente Blanda y Moderada susceptibilidad a MM.	2
15 – 20	Abrupta.	Moderadamente Resistente y Moderada susceptibilidad a MM.	2
20 – 30	Muy abrupta.	Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	3
30 - 45	Escarpada.	Muy Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	3
> 45	Muy Escarpada.	Extremadamente Resistente y Alta susceptibilidad a MM.	3

### 4.3. Asignación de valores de peso para las unidades del Suelo

Este parámetro fue tomado del mapa de suelos del departamento de Caldas (IGAC), (figura 11) y se clasificó por categorías como textura (tabla 11), taxonomía (tabla 12), drenaje natural (tabla 13), profundidad (tabla 14) y tipo de arcilla (tabla 15); donde se le asignó los valores de peso.

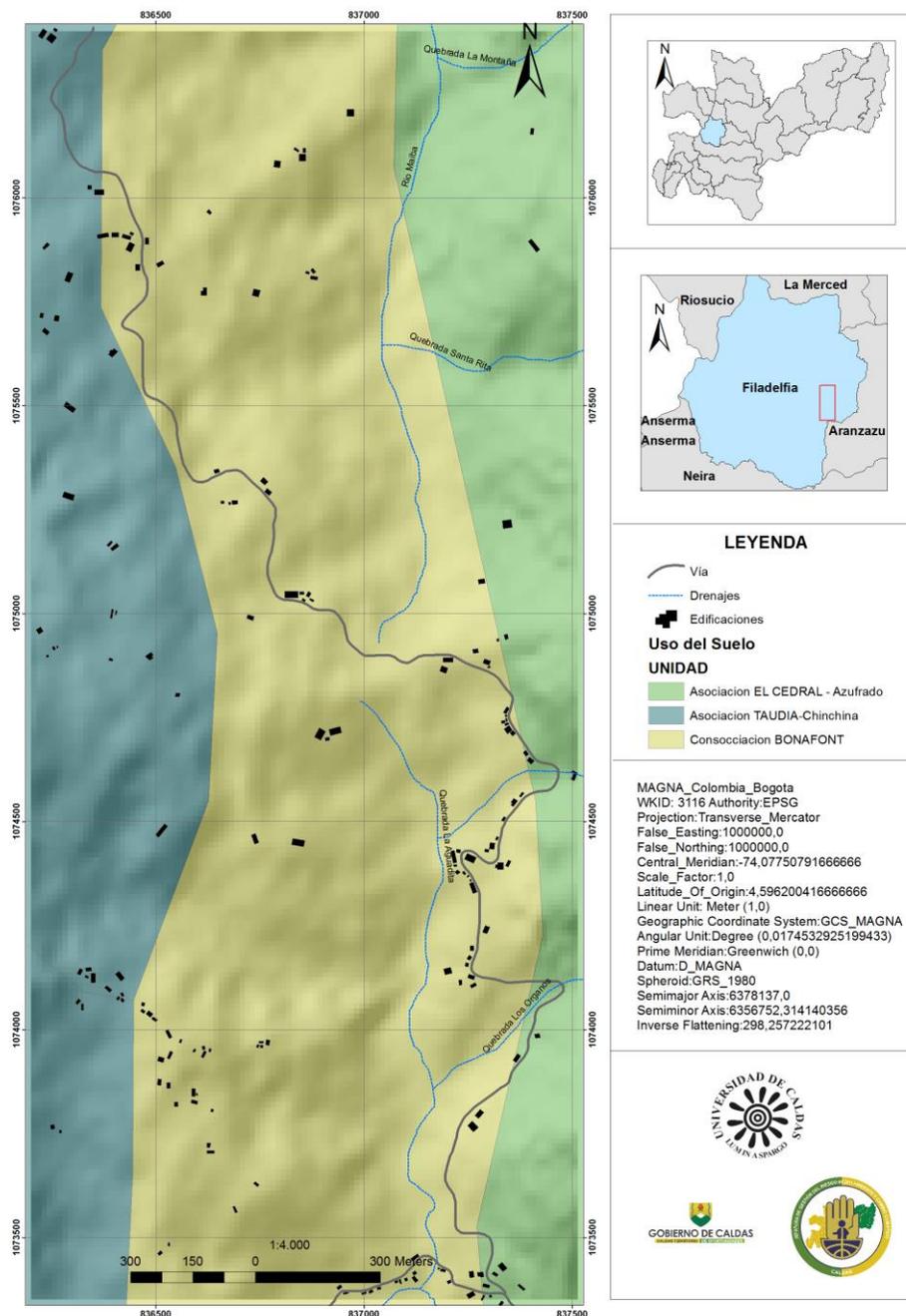


Figura 11. Mapa de suelos. Tomado del mapa de suelos del Departamento de Caldas (IGAC).

**Tabla 11.** Calificación de la textura de suelos.

Clase textural	Calificación
Gr, A, FAGrP, AGr, AFP	1
AF, FAGr, FArAGr, FArGr, FGr, FGrP	2
ArA, ArGr, FA, FArLGr, ArLGr, FLGr, ArAGr	3
F, F-Org, FAr, FArA, FArL, FL, FLOrg,	4
Ar, ArL,	5

A= Arena; L= Limo; Ar= Arcilla; F= Franco; Gr= Grava; P= Piedra; Org= Orgánico.

**Tabla 12.** Calificación de la taxonomía de suelos a nivel de Orden

Orden de suelos	Calificación
Oxisol, Ultisol.	1
Alfisol.	2
Mollisol, Andisol, Espodosol.	3
Vertisol, Aridisol.	4
Inceptisol, Entisol, Histosol.	5

**Tabla 13.** Calificación del drenaje natural del suelo. Tomado y modificado de INAT, 1.996. IDEAM, 2009

Clase	Características	Categoría de susceptibilidad
Excesivo	No retienen agua después de las lluvias.	1
Moderado excesivo	No retienen agua para las plantas después de las lluvias. El nivel freático nunca sube por encima de 2 metros.	
Bueno (Bien)	Suelos óptimos para el abastecimiento de agua y aire a los cultivos. Nivel freático siempre por debajo de 80 cm.	2
Moderado	El agua es removida lentamente hasta el nivel freático (40-80 cm. en época de lluvias). Requiere drenaje para cultivos permanentes.	3
Imperfecto	Suelos con capas impermeables que impiden percolación en época de lluvias.	4
Pobre	Agua removida lentamente y los perfiles están mojados en la época de lluvias. Se requiere drenaje.	
Muy pobre	Agua freática cerca o sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	5
Pantanosos	Agua freática sobre la superficie. Encharcamientos permanentes. Se requiere drenaje.	

**Tabla 14.** Calificación de profundidad total, tomado IDEAM, 2009

<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Categoría</b>	<b>Calificación</b>
0-25	Muy baja o muy superficial	1
25-50	Baja o superficial	2
50-100	Media o moderadamente profunda	3
100-150	Alta o profunda	4
mayor a 150	Muy alta o muy profunda	5

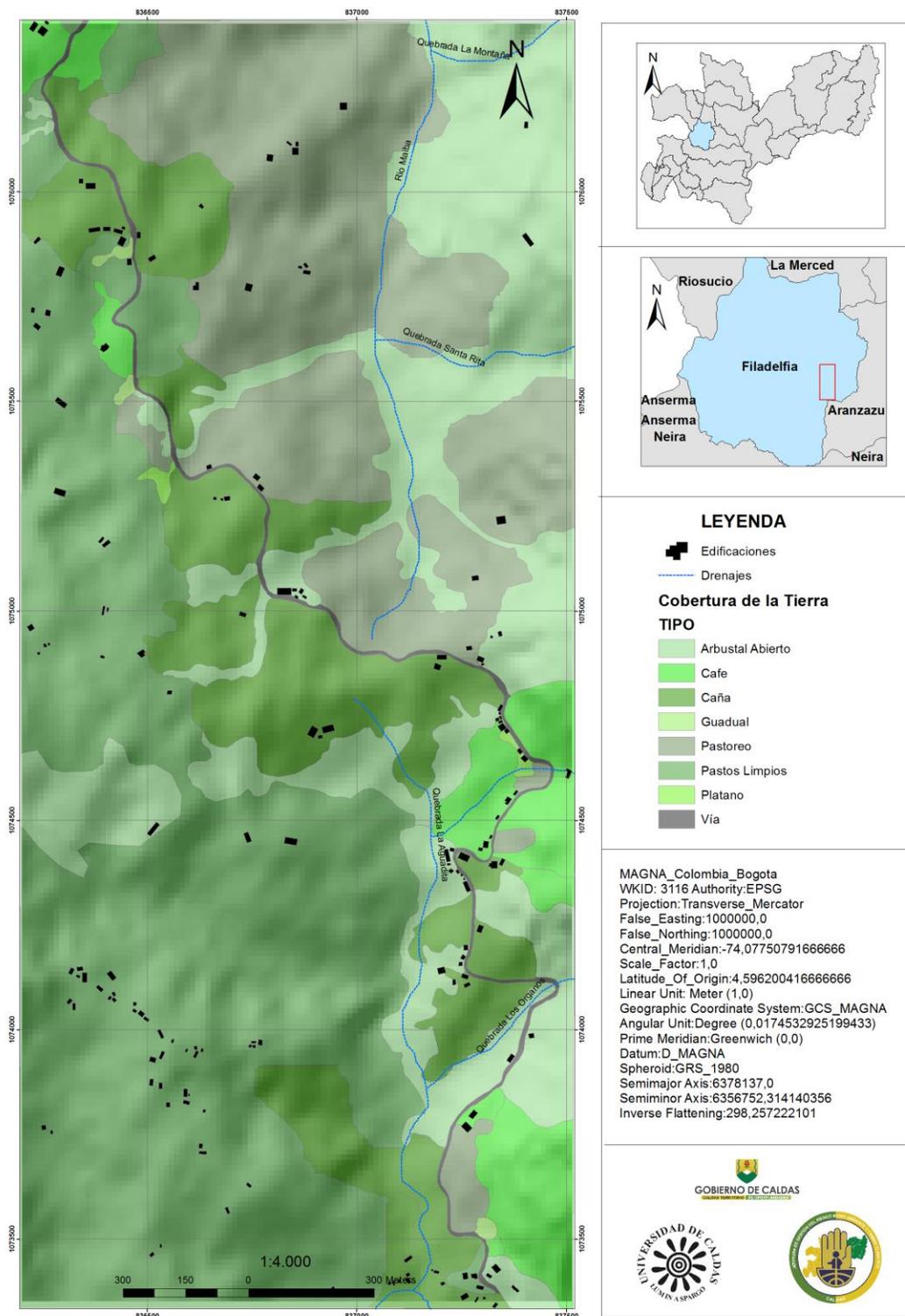
**Tabla 15.** Calificación del tipo de arcilla. Tomado INGEOMINAS IDEAM 2009

<b>Grupos de tipo de arcilla</b>	<b>Calificación</b>
Caolinita Caolinita, Biotita	1
Halloisita	2
Caolinita, Montmorillonita, Vermiculita Caolinita, Muscovita, Montmorillonita	3
Montmorillonita, Clorita, Caolinita Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	4
Alófana, Gipsita, Montmorillonita, Vermiculita Muscovita, Illita, Vermiculita, Montmorillonita Muscovita, Montmorillonita, Vermiculita Talco, Muscovita, Vermiculita, Montmorillonita	5

#### **4.4. Asignación de valores de peso para el atributo coberturas de la Tierra**

En campo se determinaron los tipos de coberturas y se digitalizaron los límites por medio de una imagen satelital de Google Earth (figura 12).

En valoración de la cobertura se tuvo en cuenta aspectos tales como: drenaje profundo (tabla 16), profundidad radicular (tabla 17), número de estratos (tabla 18) y evapotranspiración (tabla 19) clasificados por medio de las siguientes tablas.



**Figura 12.** Mapa de Coberturas de la Tierra. Nótese como la mayor parte de la zona corresponde a pastos limpios. Fuente propia.

**Tabla 16.** Categorización y calificación de la variable Drenaje Profundo.

<b>DRENAJE PROFUNDO</b>	<b>Rango (%)</b>	<b>Susceptibilidad</b>	<b>Categorización</b>	<b>Coberturas Asociadas</b>
Muy Superficial	0 - 10	5	Muy alta	Pastos
Superficial	10,1 -- 20	4	Alta	Áreas Agrícolas
Moderadamente Profundo	20,1 - 30	3	Media	Arbustales abiertos
Profundo	30,1 - 40	2	Baja	Arbustales densos
Muy Profundo	Mayor de 40	1	Muy Baja	Zonas boscosas

**Fuente.** Criterio del Temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012.

**Tabla 17.** Categorización y calificación de la profundidad efectiva.

<b>Profundidad Efectiva</b>	<b>Rango (cm)</b>	<b>Susceptibilidad</b>
Muy Superficial:	Menos de 25 cm	5
Superficial	25-50 cm	4
Moderadamente Profundo	50-100 cm	3
Profundo	110-150 cm	2
Muy Profundo	Mayor de 150 cm	1

**Fuente.** Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA-2007).

**Tabla 18.** Categorización y calificación de la variable Número de Estratos.

<b>Estratos de la Cobertura</b>	<b>Rango(No de estratos verticales)</b>	<b>Susceptibilidad</b>
No presenta	0	5
Baja densidad Estructural	1	4
Media densidad Estructural	2	3
Moderadamente Alta	3	2
Alta densidad Estructural	4	1

**Fuente.** Criterio del temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012

**Tabla 19.** Categorización y calificación de la variable evapotranspiración

<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN</b>	<b>Rango del coeficiente</b>	<b>Susceptibilidad</b>
Muy Baja	0 - 0,5	5
Baja	0,51 - 0,8	4
Media	0,81-1	3
Alta	1,1-1,5	2
Muy Alta	Mayor de 1,5	1

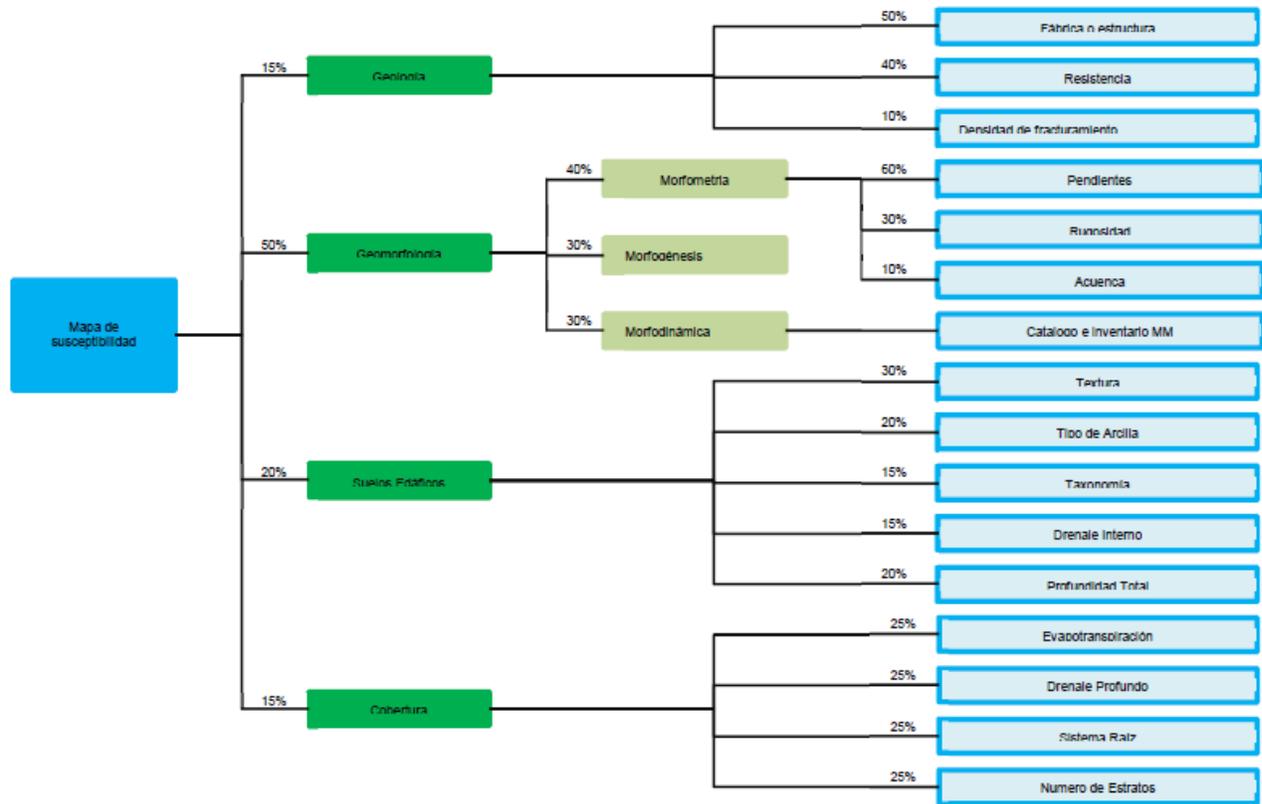
**Fuente.** Criterio del temático. Servicio Geológico Colombiano. 2012

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA**

Según el Decreto 1807 del 2014 la susceptibilidad corresponde a la fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad a sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente.

Para este caso en particular que se busca analizar la susceptibilidad por movimientos en masa se considera la clasificación, área y distribución espacial de los deslizamientos; el cual se enfoca en los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno sumado a la elaboración de mapas temáticos que se le asignan valores ya establecidos en la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC), dependiendo de su influencia a la ocurrencia de movimientos en masa (figura 13).



**Figura 13.** Diagrama de Jerarquía para la elaboración del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, con sus respectivos porcentajes. (Servicio Geológico Colombiano 2013)

### 5.1.1. Resultados del mapa de susceptibilidad de unidades cartográficas geológicas

El cruce de las variables geología y fallas da como resultado la susceptibilidad de las unidades cartográficas geológicas; donde se pudo evidenciar que las unidades litológicas con mayor susceptibilidad son la Formación Amagá y el Complejo Arquía en las cuales predominan pendientes entre 11 y 60 grados de inclinación. Donde la Formación Amagá es la que presenta mayor vulnerabilidad a movimientos en masa por estar en una cuenca controlada tectónicamente y bordeada por las fallas principales del sistema de fallas Romeral, que actualmente están activas y contribuyen a ser la mayor fuente de inestabilidad de la zona, además de estar compuesta por rocas sedimentarias de tipo areniscas, lodolitas y arcillolitas de color rojizo. Por otra parte el Complejo Quebradagrande presenta una susceptibilidad media, ya que sigue estando expuesta a la actividad de la falla, sin importar que las rocas que la componen sean mucho más duras que las de las otras unidades, sumado a los agentes externos que la erosionan.

### **5.1.2. Resultados del mapa de susceptibilidad de unidades Morfogénéticas**

Para este punto se tienen en cuenta los atributos morfogénesis, Morfometría y Morfodinámica donde la mayor susceptibilidad se presenta en las unidades de escarpe de línea de falla (Slfe) y ladera erosiva (Dle) en las cuales se presentan pendientes entre 19 y 60 grados de inclinación. Estas unidades presentan pendientes abruptas y son sometidas a procesos erosivos intensos como cárcavas y surcos que las vuelven más vulnerables a generar movimientos en masa, sin dejar de lado el ambiente de formación asociado a la zona de falla.

### **5.1.3. Resultados del mapa de susceptibilidad de las coberturas de la Tierra**

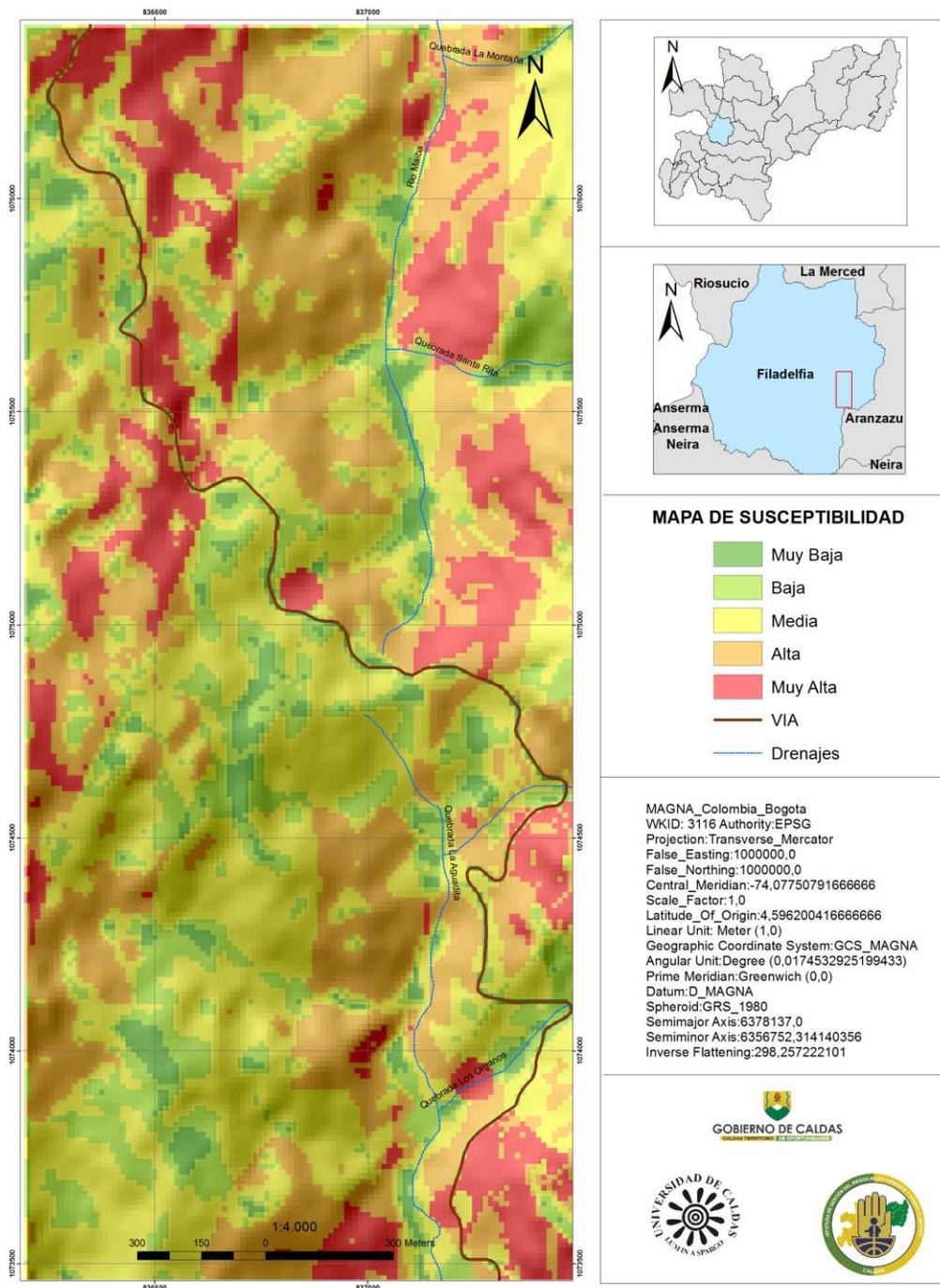
Como resultado de la susceptibilidad de las coberturas de la tierra, la mayor vulnerabilidad se presentó en cultivos de caña panelera, café y plátano; ya que estos exponen el suelo a ser erodado y no poseen raíces que le generan una buena compactación al terreno, mientras que en las áreas más arbustivas la susceptibilidad es más baja, debido a que son de raíces mucho más profundas que contraen el suelo y además contribuyen al adecuado flujo de aguas de escorrentía.

### **5.1.4. Resultados del mapa de susceptibilidad de suelos edáficos**

Como resultado de la susceptibilidad de los suelos edáficos, la vulnerabilidad fue de tipo intermedio para los tres tipos de suelos denominados Asociación El Cedral-Azufrado, Bonafont y Taudia- Chinchiná ya que presentan características similares, donde se da prioridad a la textura porque nos da una idea de la evolución de los suelos, en este caso se presenta una textura entre arenosa, franco arenosa y franco arcillosa, que indican suelos bien drenados y proporcionan suelos óptimos para el flujo y aire de los cultivos, además el tipo de arcilla es en mayor proporción caolinita, vermiculita y montmorillonita.

## **6. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA**

En base a los resultados obtenidos por medio de los mapas de susceptibilidad de cada uno de los mapas temáticos empleados para este estudio, se procede a la zonificación apoyados en el diagrama jerárquico empleado por el Servicio Geológico Colombiano mostrado en la figura 13 anteriormente mencionada, se aplican los porcentajes para cada variable y se obtiene como mapa final la Susceptibilidad por movimientos en masa (figura 14).



**Figura 14.** Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en masa. Fuente de información Jefatura de Gestión del Riesgo, Medio Ambiente y Cambio Climático (JEDEGER), Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

### **6.1. Susceptibilidad Muy Baja**

La susceptibilidad muy baja pertenece a áreas planas a suavemente inclinadas con pendientes menores a 7 grados de inclinación, cubiertas por arbustales abiertos y pastos limpios usados en su mayor proporción para actividades agrícolas, la composición litológica son depósitos de roca sedimentaria de origen continental. La baja tendencia a generar movimientos en masa se le atribuye a sus pendientes suaves y a su uso del suelo.

### **6.2. Susceptibilidad baja**

La susceptibilidad baja pertenece a áreas inclinadas con pendientes entre 7 y 11 grados de inclinación, cubiertas por pastos limpios, caña panelera y arbustales, la composición litológica son depósitos de la formación Amagá. La baja tendencia a generar movimientos en masa se asocia a sus pendientes suaves y por su cobertura densa.

### **6.3. Susceptibilidad media**

La susceptibilidad moderada pertenece a zonas muy inclinadas con pendientes entre 11 y 19 grados de inclinación, donde su composición litológica son rocas de origen sedimentario de la formación Amagá cubiertas por pastos limpios, caña panelera, plátano y arbustales abiertos, donde a pesar de sus pendientes y de la influencia de la falla su cobertura densa le proporciona estabilidad.

### **6.4. Susceptibilidad alta**

La susceptibilidad alta está asociada al sistema de fallas Romeral que separa las tres unidades litológicas cubiertas por pastos limpios, caña panelera y arbustales abiertos con pendientes entre 19 y 40 grados de inclinación y geoformas de origen denudacional. La alta tendencia a movimientos en masa es debida a sus pendientes abruptas y a estar asociada a la zona de influencia de las fallas.

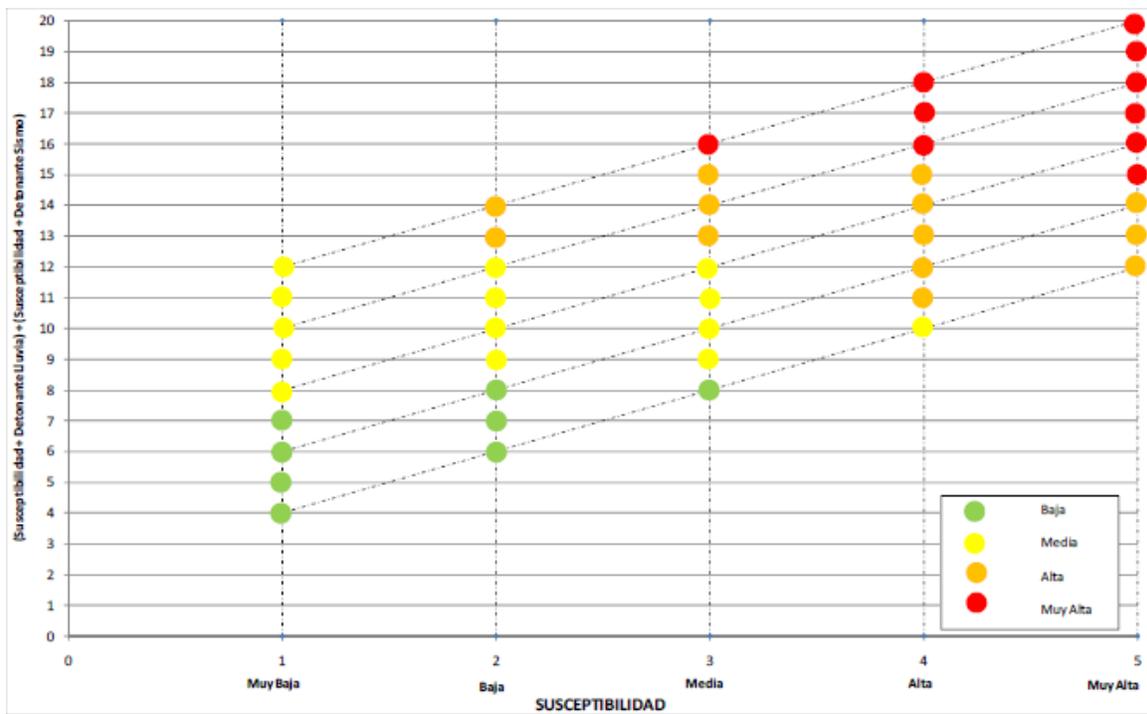
### **6.5. Susceptibilidad muy alta**

La susceptibilidad muy alta se presenta en una gran área de la vereda Balmoral y hacia el noroccidente de la vereda Frutales, en las fallas Silvia-Pijao que ponen en contacto las tres unidades geológicas con coberturas de tipo pastos limpios, café, caña panelera, plátano y arbustales abiertos, que exponen el terreno favoreciendo la infiltración de grandes cantidades de agua. La tendencia alta a movimientos en masa es debida en mayor proporción a la influencia de las fallas y a las pendientes escarpadas mayores a 40 grados de inclinación sumado a geoformas de origen estructural.

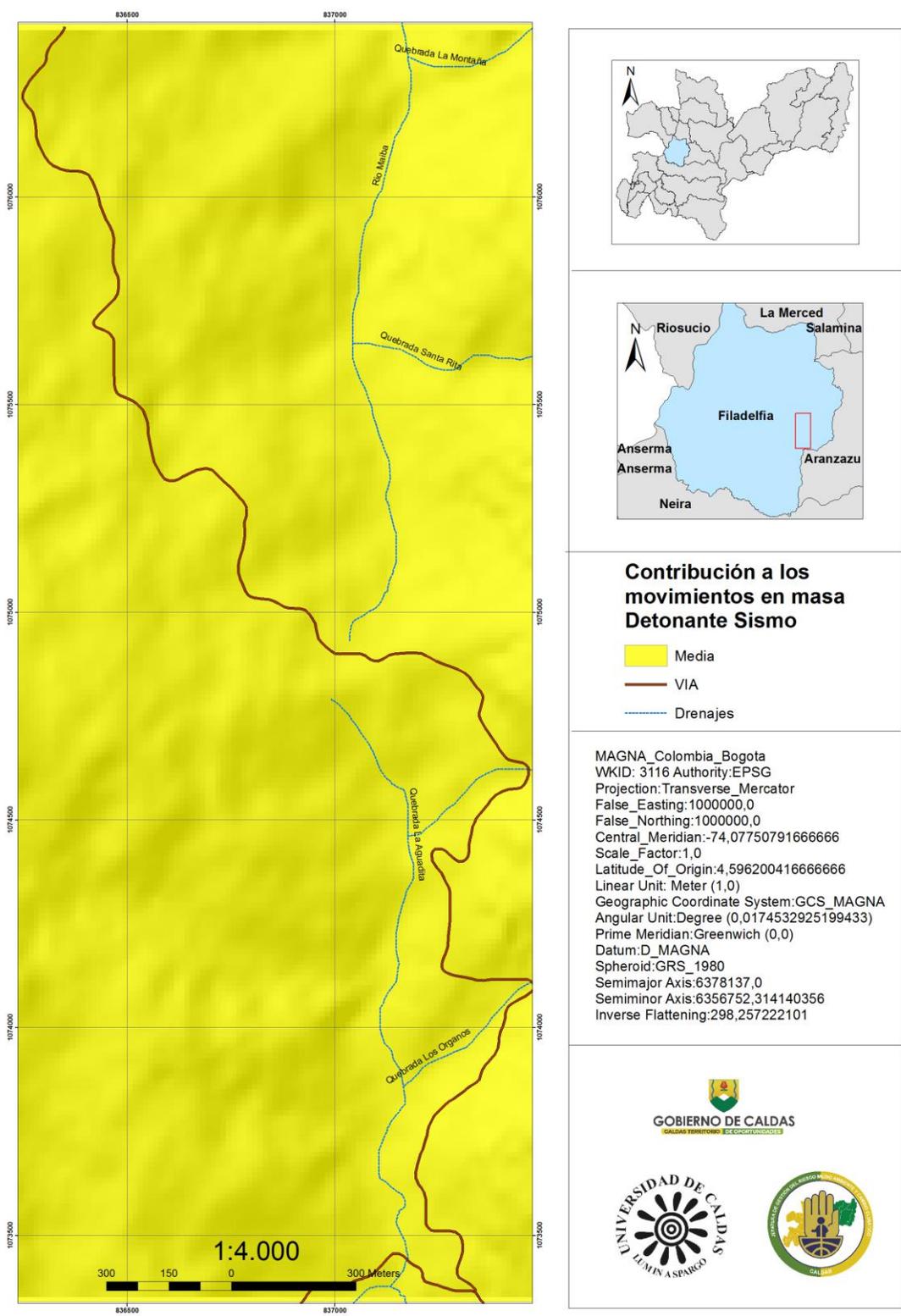
## 7. ZONIFICACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

La amenaza se define como el peligro latente de que un evento físico de origen natural ocurra, donde se analiza la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno en un período de tiempo y espacio determinado; por lo tanto se tienen en cuenta factores intrínsecos asociados a la susceptibilidad, adicional a factores extrínsecos como son los detonantes sismo y lluvia que provocan un movimiento en masa (figura 18).

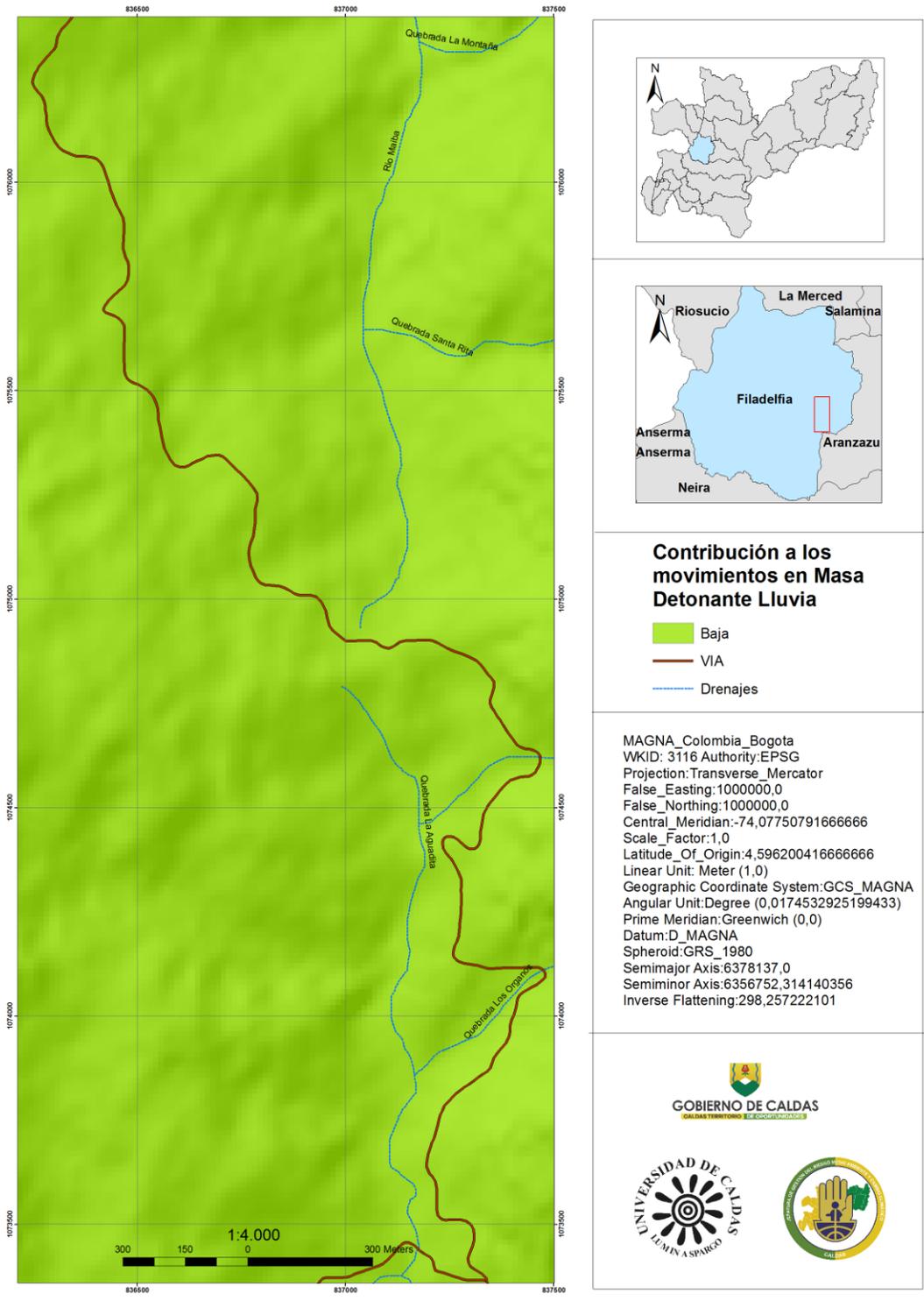
Debido a que para el presente estudio no se contaba con los suficientes insumos como un inventario de los sismos ocurridos en los últimos años y además de la carencia de información pluviométrica (temperatura media anual, precipitación media anual y lluvia máxima diaria), se optó por tomar los mapas de detonante sismo (figura 16) y detonante lluvia (figura 17) en escala 1:100.000 realizados por el servicio geológico Colombiano y modificados para la zona de estudio. Teniendo ya estos mapas de detonantes sumados al mapa de susceptibilidad se realiza un comparativo de estas variables y se le asigna el grado de amenaza (figura 15).



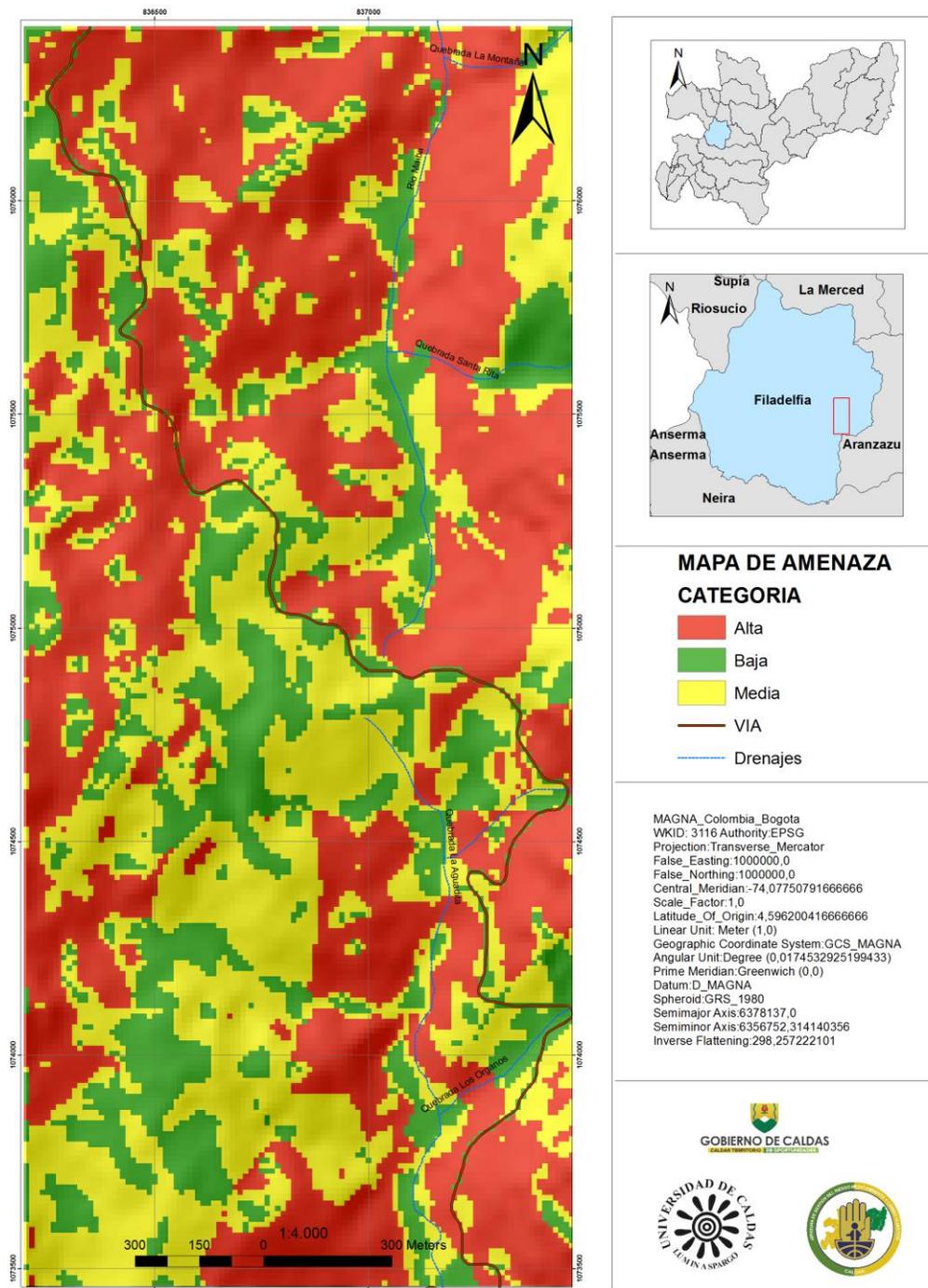
**Figura 15.** Clasificación del mapa de zonificación de amenaza relativa por movimientos En masa (Adaptado de: INGEOMINAS, 2009).



**Figura 16.** Mapa Detonante Sismo. Fuente servicio Geológico Colombiano (SGC)



**Figura 17.** Mapa detonante lluvia. Fuente Servicio Geológico Colombiano (SGC).



**Figura 18.** Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa. Fuente de información Jefatura de Gestión del Riesgo, Medio Ambiente y Cambio Climático (JEDEGER), Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

### **7.1.Amenaza Baja**

La amenaza baja se presenta en zonas con pendientes suaves que no superan los 7 grados de inclinación y en donde las coberturas son poco densas, con geoformas de origen denudacional y con intensidad de lluvia baja, además de una actividad sísmica intermedia. Aunque la amenaza para esta zona es baja hay que tener presente que una gran parte de los deslizamientos ocurren en esta área y se hace necesario mitigar el riesgo ya existente.

### **7.2.Amenaza Media**

La amenaza media se presenta en zonas similares a la anterior aunque abarca un área mucho más grande y sus pendientes varían entre 7 y 11 grados de inclinación, hace parte de la zona de influencia de las fallas sumado al material fino-granular y arcilloso que por efectos de la infiltración de agua y eventos sísmicos provocan los deslizamientos.

### **7.3.Amenaza Alta**

La amenaza alta está localizada en todo el sistema de fallas Romeral, lo que nos confirma que la mayor fuente de ocurrencia de movimientos en masa para la zona de estudio son estas fallas; ya que por estas se libera la energía provocada durante un evento sísmico, sumado a intensas temporadas de lluvia donde el suelo está expuesto por su inadecuado uso; ya sea por la cobertura poco densa o por intensas actividades agrícolas en pendientes muy abruptas, generando así mayor probabilidad de un movimiento en masa.

## 8. CONCLUSIONES

- Con los estudios realizados se llega a la conclusión de que la zona presenta una susceptibilidad entre media y alta, donde la composición litológica son depósitos de origen continental producto de la erosión de las demás unidades litológicas, lo que hace que sea un material frágil y que absorbe con facilidad el agua, además del uso del suelo con coberturas como caña, café, pastos limpios, plátano y arbustales abiertos que lo exponen a que sea más fácilmente erodable.
- La mayor cantidad de deslizamientos ocurre en zonas donde las pendientes son abruptas y varían entre 11 y 40 grados de inclinación.
- La susceptibilidad y amenaza más altas se generan en áreas con pendientes muy inclinadas, abruptas y hasta escarpadas, ya que presentan geformas de origen denudacional y estructural generándose fácilmente cárcavas y surcos que erosionan y exponen las unidades litológicas a meteorización, adicional a esto, están las fallas geológicas actualmente activas que son la mayor fuente de inestabilidad de la zona.
- Por medio del análisis multitemporal se pudo concluir que las coberturas de la tierra influyen mucho en la estabilidad del terreno, ya que dependiendo de cuales se usen pueden favorecer o al contrario contribuir a su deterioro.
- Al realizar la zonificación de la vía, se concluyó que las partes más críticas; es decir, donde la carretera está totalmente sin pavimentar están asociadas totalmente al sistema de fallas que atraviesan la zona y esto se confirma con la zonificación donde la mayor susceptibilidad y amenaza fue en estos lugares.
- La menor susceptibilidad y amenaza se dio en sectores donde la cobertura son arbustales abiertos y pastos limpios con pendientes suaves a muy inclinadas que mitigan el riesgo, mientras que en zonas donde la cobertura son caña panelera, café y plátano se presenta la mayor susceptibilidad y amenaza.

## 9. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios geotécnicos detallados directamente relacionados con una solución estructural al tramo de vía afectado, teniendo en cuenta que el sistema de fallas atraviesa toda la zona y seguirá generando inestabilidad en esta.
- Desde la Jefatura de Gestión del riesgo, medio ambiente y cambio climático continuar con las capacitaciones que se les brinda a las comunidades donde se les concientiza de que un fenómeno natural no puede predecirse, pero sí puede evitarse con el monitoreo constante de los terrenos. Además sumarle a esto simulacros que aumenten la capacidad de reacción ante un fenómeno amenazante como el de movimientos en masa.
- Dado que la mayor parte de los movimientos en masa se están presentando en las coberturas de tipo caña panelera se recomienda hacer una reconversión de uso en este sector con cultivos de raíces más profundas que puedan ayudar a la estabilidad del terreno y de no ser posible implementar obras de contención bioingenieriles que permitan aminorar el efecto negativo de esta cobertura sobre la estabilidad del suelo.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- AGUIRRE, Y; ZAPATA, J.A. Estudio geomorfológico y estructural de las vertientes sobre el río Maibá, 1989.
- CUBILLOS, V.H; SALAZAR, J.P. Zonificación de Amenazas geológicas en el municipio de Filadelfia (Caldas), 1992.
- FUENTES, C.E. Origen tectónico de la cuenca sedimentaria Filadelfia- La Merced Filadelfia (Caldas), 1990.
- GALLEGO, C. Cartografía geológica y determinación de material arcilloso en áreas ubicadas en los municipios de Manizales, Palestina, Filadelfia y Quinchía, 1990.
- LINCE, L.A; OROZCO, A.M. Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa y caracterización geotécnica de los materiales en el área de influencia del acueducto de Filadelfia (Caldas), 2001.
- MAYA, M; GONZALEZ, H. Unidades litodémicas en la cordillera Central de Colombia.
- NARANJO, J.L. Modelo de evolución morfotectónica del sistema de falas de Romeral entre Pereira (Risaralda) y Filadelfia (Caldas), 2005.
- OSORIO, C; RODAS, R.D. Análisis facial de las unidades aflorantes en la sección ubicada entre el sector de Tareas y Varsovia, cuenca Neógena de Filadelfia Caldas (parte sur), 2011.
- RAMIREZ, A.F; VASQUEZ, P.A. Caracterización de procesos erosivos y zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en la Microcuenca Maibá (Caldas) escala 1:25.000, 2003.
- SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (SGC). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa en escala 1:100.000, 2016.
- SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (SGC). Glosario de unidades y subunidades Geomorfológicas.
- TABARES, F.A. Zonificación de la amenaza relativa por movimientos en masa para las subregiones del departamento de caldas centro sur, nor occidente y sur occidente a escala 1:100.000, 2018.