

**CARACTERIZACION Y ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD POR
MOVIMIENTOS EN MASA, EN LA CUENCA LA QUEBRADA LA AYURÁ:
TRAMO CERROS ASTILLEROS- PARQUE ECOLÓGICO EL SALADO,
MUNICIPIO DE ENVIGADO-ANTIOQUIA.**

**PROYECTO DE GRADO
Para optar el título de Geólogo**

**Autoras:
XIMENA NARANJO GONZALEZ
YORELYS GUTIERREZ ROJAS**

**Asesores:
JAFED NARANJO GUARIN
LUIS GABRIEL CORREA OCAMPO**

**MEDELLIN
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
UNIVERSIDAD EAFIT
2017**

AGRADECIMIENTOS

Haber logrado culminar este trabajo como requisito para obtener el título de geólogas se lo debemos sobre todo al Dios todopoderoso que nos regaló las facultades, salud y sabiduría, por ello se lo queremos agradecer en primera instancia a Él.

Agradecer a cada una de nuestras familias, por su apoyo, paciencia y comprensión durante todos estos años de estudio que nos han subsidiado y patrocinado.

Un agradecimiento muy especial a nuestros asesores JAFED NARANJO GUARIN y LUIS GABRIEL CORREA OCAMPO, por su profesionalismo, conocimiento, paciencia, apoyo, dedicación, motivación, y aliento que nos inyectaron a cada momento del desarrollo de este trabajo de grado, gracias porque siempre nos sentimos acompañadas y orientadas.

Agradecimiento y reconocimiento a las personas adscritas a nuestra Universidad EAFIT, por su apoyo, orientación y acompañamiento en el pregrado y en nuestra formación académica en busca del título de geólogas.

No podemos dejar de agradecer a la Alcaldía de Envigado y sus funcionarios del área de gestión de Riesgo quienes nos proporcionaron la atención, información y documentos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado.

Mención especial para el profesor Marco Fidel Gamboa Ramírez por sus consejos y orientaciones académicas en todo momento.

Muchas gracias!

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
1.3 Alcances y limitaciones	15
1.4 Metodología	15
1.5 Conceptualización.....	16
2. INSUMOS BÁSICOS	19
2.1 Cartográfica Base.....	19
2.2 Modelo de Elevación Digital –DEM.....	20
3. GENERALIDADES	23
3.1 Localización	23
3.2 Clima.....	25
3.3 Vegetación	26
3.4 Fisiografía	27
4. GEOLOGIA	29
4.1 GEOLOGIA REGIONAL Y MARCO TECTÓNICO	29
4.2 GEOLOGIA LOCAL.....	31
4.2.1 ROCAS METAMORFICAS	32
4.2.1.1 Migmatitas de Puente Peláez (PRmpp):.....	32
4.2.1.2 Gneises de las Migmatitas de Puente Peláez (PRmpp-Gn):	33
4.2.1.3 Esquistos de Cajamarca (PZeC):.....	34
4.2.1.4 Esquistos Grafitosos de Cajamarca (PZec-G):	35

4.2.2 DEPÓSITOS	36
4.2.2.1 Depósito de deslizamiento (Qd):	36
4.2.2.2 Depósito de Flujo de escombros y/o lodos (Qfd):	37
4.2.2.3 Depósito Aluviotorrencial (Qar):	38
4.2.2.4 Depósitos Aluviales (Q2al):	38
4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	39
4.3.1 Falla Marginal:	41
4.3.2 Falla La Cachona	41
4.3.3 Falla La Ayurá	41
5. GEOMORFOLOGÍA	43
5.1 Escarpe de erosión mayor (Deem)	46
5.2 Altiplano colinado (Da)	48
5.3 Lomeríos residuales (Dires)	51
4.4 Subunidades de Ambiente Aluvial	54
6. MORFODINAMICA DE LA QUEBRADA LA AYURÁ	57
6.1 Deslizamientos Rotacionales	59
6.3 Flujos	62
7. VARIABLE PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUCEPTIBILIDAD	64
7.1 Pendientes	64
7.2 Curvatura	66
7.3 Rugosidad	67
7.4 Relieve relativo	69
7.5 Distancia fallas	71
7.6 Distancia drenajes	73
7.7 Cobertura	74

8. SUCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	77
8.1 Método geomorfológico directo.....	77
8.3 Método Univariado	81
8.4 Método estadístico Bivariado	83
9. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	85
10. CONCLUSIONES.....	90
11. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA.....	94
ANEXOS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología del proyecto.	16
Figura 2. Cartografía básica de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	19
Figura 3. Modelo de elevación digital de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	20
Figura 4. Modelo sombras de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	21
Figura 5. Ortofotografía para el área de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	22
Figura 6. Cubrimiento de Google Earth para la zona de estudio. Municipio de Envigado, Antioquia.	22
Figura 7. Localización general de la zona de estudio en la cuenca La Ayurá. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	23
Figura 8. Mapa Hidrológico de la Cuenca La Ayurá. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	24
Figura 9. Ciclo anual de pluviosidad tomada en la estación pluviométrica de la Quebrada La Ayurá del año 2016. Tomado de Consorcio Riesgos de Envigado, 2014.	26
Figura 10. Mapa de cobertura de suelos del Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	27
Figura 11. Mapa de la geología regional del Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000.	30
Figura 12. Geología de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	31
Figura 13. Mapa estructural regional del municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000. ..	40
Figura 14. Datos estructurales de la Quebrada La Cachona graficados en Stereo32.	42
Figura 15 Datos estructurales de la Quebrada La Cachona graficados en Stereo32.	42
Figura 16. Mapa geomorfológico regional del municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000.	44

Figura 17. Mapa de geomorfología local. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	45
Figura 18. Localización de Escarpes de erosión mayor del flanco norte y este del Cerro Astilleros. Tomado de Google Earth.	46
Figura 19. Ladera larga, cóncava, disectada y de pendiente escarpada.	47
Figura 20. Ladera moderada, irregular y de pendiente abrupta.	47
Figura 21. Ladera larga, convexa y de pendiente escarpada.	48
Figura 22. Localización de los Altiplanos identificados en la zona de estudio. Tomado de Google Earth.	48
Figura 23. Ladera larga, irregular y de pendiente inclinada.	49
Figura 24. Ladera larga, convexa, de pendiente inclinada.	49
Figura 25. Ladera corta, irregular y de pendiente suave.	50
Figura 26. Ladera corta, irregular y de pendiente inclinada.	50
Figura 27. Ladera corta, convexa y de pendiente inclinada.	51
Figura 28. Cima del Altiplano de la zona este en la cuenca de La Ayurá.	51
Figura 29. Localización de los Lomeríos Residuales identificados en la zona de estudio. Tomado de Google Earth.	52
Figura 30. Ladera corta, ondulada y de pendiente abrupta.	52
Figura 31. Ladera larga, convexa y de pendiente abrupta.	53
Figura 32. Ladera larga, ondulada y de pendiente inclinada.	53
Figura 33. Ladera larga, disectada, ondulada y de pendiente inclinada.	54
Figura 34. Ladera corta, cóncava y de pendiente abrupta.	54
Figura 35. Localización de una de las superficies de explanación. Sede de zootecnia de la universidad CES.	56
Figura 36. Mapa de movimientos de masa en la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	58
Figura 37. Deslizamiento rotacional Ubicado en el escarpe que se encuentra al este de la zona de estudio, cerca de la Qda. La Cachona.	59
Figura 38. Mapa de pendientes de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	65
Figura 39. Mapa de curvatura de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	67
Figura 40. Mapa de rugosidad de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	69
Figura 41. Mapa de relieve relativo de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	71

Figura 42. Mapa de distancia a Fallas de la zona de estudio en el Municipio de Envigado, Antioquia.	72
Figura 43. Mapa de distancia a drenajes de la zona de estudio en el Municipio de Envigado, Antioquia.	74
Figura 44. Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio, Municipio de Envigado, Antioquia.	75
Figura 45. Metodología empleada en el método geomorfológico directo.	77
Figura 46 Mapa geomorfológico directo. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	78
Figura 47. Metodología del análisis jerárquico para susceptibilidad de deslizamientos.	79
Figura 48. Mapa obtenido con el método Jerárquico. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	80
Figura 49. Metodológico de susceptibilidad, para el método estadístico Univariado.	82
Figura 50. Mapa obtenido con el método Univariado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	82
Figura 51. Esquema metodológico de susceptibilidad, para el método estadístico Bivariado.	84
Figura 52. Curva ÉXITO obtenida con el método Bivariado.	86
Figura 53. Curva ROC obtenida con el método Bivariado.	86
Figura 54. Resultado del método Bivariado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.	89

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Cauce de la Quebrada la Ayurá en la parte baja de la cuenca.....	25
Foto 2. Briofitas presentes en el Cerro Astilleros, en el nacimiento de diferentes arroyos.	28
Foto 3. Migmatitas de Puente Peláez ubicada aguas arriba en la Quebrada El Palo.	33
Foto 4. Gneis de las Migmatitas de Puente Peláez entre la Qda. La Cachona y Qda. La Ayurá.	33
Foto 5. Suelo desarrollado por las Migmatitas de Puente Peláez. Localizado al este de la Qda. El Palo.	34
Foto 6. Esquistos cuarzo sericíticos del Complejo de Cajamarca localizados en el Cerro Astilleros. Con venas y boudines de Cuarzo.	34
Foto 7. Esquistos Grafíticos del Complejo Cajamarca localizados a margen izquierda de la Quebrada La Ayurá.....	35
Foto 8. Suelo desarrollado por los Esquistos de Cajamarca. Localizado en uno de los movimientos de masa en el escarpe del Cerro Astilleros.	35
Foto 9. Depósito de Deslizamiento, localizado en la Qda. El Palo, cerca de su desembocadura en la Qda. La Ayurá.....	37
Foto 10. Depósito de flujo de escombros y/o lodo, ubicada en la bocatoma de la Qda. Cañada Honda.....	37
Foto 11. Depósito Aluviotorrencial. Quebrada La Cachona a unos 50 metros de su desembocadura en la Ayurá.	38
Foto 12. Planicie de inundación en la desembocadura de la Qda. El Palo en la Qda. La Ayurá.	55
Foto 13. Terraza de acumulación. Ubicada a margen izquierda de la quebrada El Palo.....	56
Foto 14. Perfil de suelo típico en movimientos rotacionales asociados a los Esquistos de Cajamarca. Ubicado en la Qda. La Ayurá.	60
Foto 15. Perfil de suelo desarrollado por Migmatitas de Puente Peláez, ubicada en la margen izquierda de la Quebrada El Palo.	61
Foto 16. Deslizamiento Traslacional ubicado en la Quebrada El Palo.....	62
Foto 17. Deslizamiento Traslacional ubicado en la vía que conduce del parque Ecológico El Salado hasta las trucheras, a margen derecha de la Qda. La Ayurá.	62
Foto 18. Flujo de lodo y escombros activo. Ubicado en el Cerro Astilleros. A. Movimiento Tomado por Drone. B Corona del Movimiento en masa. C Diagrama del comportamiento de un flujo.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los movimientos. Tomado de Varnes, (1978).....	18
Tabla 2. Rango de características para descripción de subunidades.	44
Tabla 3. Distribución de la variable de pendientes para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.....	64
Tabla 4. Distribución del atributo Curvatura para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.....	66
Tabla 5. Distribución de la variable rugosidad para la zona de estudio, Municipio de Envigado.....	68
Tabla 6. Distribución del variable relieve relativo para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.....	70
Tabla 7. Distribución del variable de distancia de fallas para la zona de estudio.	72
Tabla 8. Distribución de la variable de distancia de drenajes en la zona de estudio.	73
Tabla 9. Distribución de la cobertura vegetal en la zona de estudio.	75
Tabla 10. Descripción de susceptibilidad para el mapa geomorfológico directo.	79
Tabla 11. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método jerárquico	81
Tabla 12. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método Univariado.	83
Tabla 13. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método Bivariado	84

ANEXOS

<i>Anexo 1. Antecedentes de eventos en la cuenca La Ayurá.</i>	103
<i>Anexo 2. Inventario de Movimientos en masa.</i>	107
<i>Anexo 3. Matriz de ponderaciones.</i>	108
<i>Anexo 4. Curvas del método jerárquico.</i>	109
<i>Anexo 5. Curvas del método jerárquico.</i>	110

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo corresponde al Proyecto de grado para obtener el título de Geólogo de la Universidad EAFIT, presentado y desarrollado por las estudiantes Yorelys Andreina Gutiérrez Rojas y Ximena Naranjo González.

Este estudio se realizó en el municipio de Envigado en la zona 6 que comprende los barrios El Chinguí, y El Salado y el área limítrofe entre las veredas El Escobero de la zona 10 y El Vallano de la zona 11, con la finalidad de evaluar y zonificar las susceptibilidad por movimientos de masa, desde el nacimiento de la cuenca La Ayurá en el Cerro Astilleros hasta el Parque Ecológico El Salado (parte alta y media-alta respectivamente de la cuenca de La Ayurá); usando una metodología estadística de mapas temáticos en conjunto con las variables de interés analizadas mediante el software de ArcGis (versión 10.5).

El sur del municipio de Envigado, se encuentra expuesto a diferentes amenazas naturales como movimientos en masa, los cuales a través de la historia han tenido lamentables repercusiones, principalmente en las riberas de la Quebrada La Ayurá, que atraviesa el municipio desde su nacimiento en el Cerro Astilleros hasta su desembocadura en el Río Medellín. Fundamentado en los antecedentes de la Quebrada, en la recopilación de información y datos tomados en campo, se proyectó elaborar un modelamiento para la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en la zona de estudio.

En los capítulos del 1 al 3 se describe las generalidades de la zona de estudio a continuación en los capítulos 4 y 5 se da a conocer la geología y geomorfología de la zona, tanto regional como local. En los capítulos 6 y 7 se hace referencia a la morfodinámica de la cuenca La Ayurá y las variables necesarias para llegar al análisis de la susceptibilidad. En el capítulo 8 se hace la interpretación y análisis de los resultados de susceptibilidad de la zona; y posteriormente se presentan las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1.1 Objetivo General

Caracterizar los movimientos en masa de la parte alta de la Cuenca La Ayurá y realizar una zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa para esta zona, definida desde el nacimiento de la Quebrada en El Cerro Astilleros hasta el Parque Ecológico El Salado, Municipio de Envigado- Antioquia.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar, describir e interpretar los antecedentes por movimientos en masa que se encuentran en la cuenca La Ayurá
- Realizar cartografía preliminar geomorfológica, litológica y estructural escala (1:10.000) en la zona de estudio.
- Identificar zonas homogéneas de susceptibilidad por medio de fotointerpretación y recorridos de campo.
- Identificar los puntos críticos de procesos activos e inactivos que afecten la cuenca La Ayurá.
- Definir mediante la herramienta SIG las zonas de alta, media y baja susceptibilidad por movimientos en masa.
- Interpretar la información obtenida para elaborar conclusiones y proponer recomendaciones necesarias en el área de estudio con respecto a susceptibilidad por movimientos en masa.

Hipótesis central: La cuenca La Ayurá presenta características geomorfológicas marcadas por las fuertes pendientes, laderas erosionadas que se ven afectadas por factores como altas precipitaciones y la intervención antrópica las cuales tienen la potencialidad de generar susceptibilidad a movimientos en masa, que aumentan la posibilidad de ocurrencia de desastres naturales, exponiendo a las comunidades asentadas en su zona de influencia.

El método Bivariado demuestra que las zonas no afectadas por movimientos en masa, pueden identificarse por características similares a las zonas donde se presentan procesos morfodinámicos.

Pregunta: ¿Por qué es necesaria la caracterización y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en la parte alta de la cuenca La Ayurá en el municipio de Envigado?

1.3 Alcances y limitaciones

Con el presente estudio se exploró y analizó los movimientos en masa que representan susceptibilidad para el municipio de Envigado, principalmente en las riberas de la parte alta de la Quebrada La Ayurá, que afecta directa e indirectamente la mayor parte de la cuenca, quedando los habitantes expuestos a fenómenos naturales.

Este proyecto se realiza en compañía de la oficina de Gestión del Riesgo del municipio de Envigado, universidad EAFIT, Alcaldía de Envigado y otras instituciones a quienes van dirigidos los resultados de la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa para esta zona del municipio, y así éstas podrán tomar medidas de mitigación y reducción de los riesgos posiblemente ocasionados por movimientos de masa que pueden combinarse con avenidas torrenciales, e inundaciones en épocas de altas precipitaciones originadas en la parte alta de la cuenca La Ayurá.

1.4 Metodología

La metodología del trabajo se basó en la recopilación de información y mapeo de las zonas homogéneas por susceptibilidad por movimientos en masa ubicadas en la parte alta de la cuenca La Ayurá, para su posterior análisis y generación de resultados en beneficio de la comunidad (Caballero, 1988). Para la elaboración del proyecto se realizaron tres etapas descritas a continuación: Los pasos llevados a cabo para este proyecto se dividieron en tres etapas:

Etapas 1 (Pre campo): Recopilar la información de: los antecedentes de ocurrencia de eventos (movimientos en masa), características geológicas, usos de suelo, condiciones topográficas e inventario de procesos activos y no activos, obtenidos de los registros de la oficina de Gestión del Riesgo del municipio de Envigado, Alcaldía de Envigado, Universidad EAFIT, fotografías aéreas, Modelo de Elevación Digital (DEM), modelo de sombras, mapa de pendientes, etc. Esta información será utilizada para la elaboración de mapas preliminares a escala 1: 10.000 de la cuenca, y definir los recorridos de campo identificando puntos estratégicos donde la comunidad se vea afectada por la ocurrencia de eventos que puedan perturbar de manera negativa la cuenca de la Quebrada La Ayurá (*Anexo 1*).

Etapas 2 (Campo): elaboración de mapas geomorfológico, geológico y morfométrico. De esta manera, se generará un nuevo inventario de procesos morfodinámicos activos y no activos de la zona de estudio (*Anexo 2*), que

ayudarán a identificar las zonas de alta, media y baja susceptibilidad en la cuenca, que ameriten intervención por parte de las autoridades competentes. Cabe destacar que solo se tomaron en cuenta movimientos en masa con longitudes mayores a 20 metros para la realización de polígonos en la herramienta ArcGis.

Etapa 3 (Post Campo): Realizar los mapas de unidades geológicas, geomorfológicas y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:10.000, por medio de la herramienta ArcGis, posteriormente se entregará resultados y análisis del informe final (*figura 1*).



Figura 1. Metodología del proyecto.

1.5 Conceptualización

A continuación se presenta el marco conceptual que guía el desarrollo de este proyecto. De esta manera, se define los términos propuestos para uso nacional y se describe el significado de los términos relacionados con el tema, a saber:

- **Zonificación:** Varnes (1984) define zonificación como la división de la superficie del terreno en áreas y la clasificación de acuerdo con el grado actual

o potencial por susceptibilidad por deslizamientos u otros movimientos en masa en las laderas (SGC, 2015)

- **Susceptibilidad** : Evaluación de factores intrínsecos presentes en un suelo de una región determinada, sin tener en cuenta un tiempo específico ni factores detonantes que puedan ser propensos a generar deslizamientos (incluyendo procesos de movimientos presentes en el sector a estudiar) (SGC, 2013).
- **Amenaza**: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. (Ley 1523 de 2012)
- **Riesgo**: Medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos (SGC, 2015)
- **Movimiento en masa**: un movimiento de masa como todo desplazamiento de material litológico y/o de escombros hacia abajo (vertical o en dirección del pie de una ladera) debido a la gravedad.(Vargas,2000)
- **Inventario y catálogo de movimientos en masa**: Base de datos que contenga información de localización, clasificación, volumen, actividad, fecha de ocurrencia y otras características de los movimientos en masa en un área (SGC, 2015). Actualmente la clasificación de los deslizamientos más aceptada es la de Varnes (1978), quien la estableció según la dinámica del movimiento y la clase de material desplazado (suelo o roca) (*tabla 1*).

CLASIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS DE MASA, Tomado de Varnes, (1978).				
Tipo de MM		Tipo de material		
		Roca	suelo	
			predomina grueso	predomina fino
Caídas		caída de roca	caída de escombros	caída de tierra
Volcamientos		Volcamientos de roca	volcamientos de escombros	Volcamiento de tierra
Deslizamientos	Rotacional	Deslizamiento. Rocoso	Deslizamiento. De escombros	Deslizamiento. De tierra
	Traslacional	Deslizamiento. De bloques Rocosos	Deslizamiento de bloques de escombros	Deslizamiento de bloques de tierra
Propagación lateral		Propagación. rocosa	Propagación de escombros	Propagación de tierra
Flujos		Flujo de roca	flujos de escombros	flujo de tierra
Complejos		Combinación de dos o más tipos de MM.		

Tabla 1. Clasificación de los movimientos. Tomado de Varnes, (1978).

2.2 Modelo de Elevación Digital –DEM

Los modelos de elevación se han convertido en una herramienta de gran utilidad en las ciencias de la tierra, en las tareas de identificación, análisis e interpretación de diferentes características del terreno, y por ello para el presente estudio, se generó un modelo de elevación digital del terreno del Municipio de Envigado. A partir de curvas de nivel (cada 10 m). Este modelo consiste en una malla continua de celdas o píxeles (Raster) a la cual se le da el nombre de Modelo Digital de Elevación DEM generado a partir de curvas de nivel y la red de drenajes de la cartografía básica. Dicha malla de puntos podría tener el tamaño de píxel o celda deseado, en este caso se usó el tamaño de píxel de 10 m x 10 m, debido a la escala del trabajo 1:10.000 (figura 3).

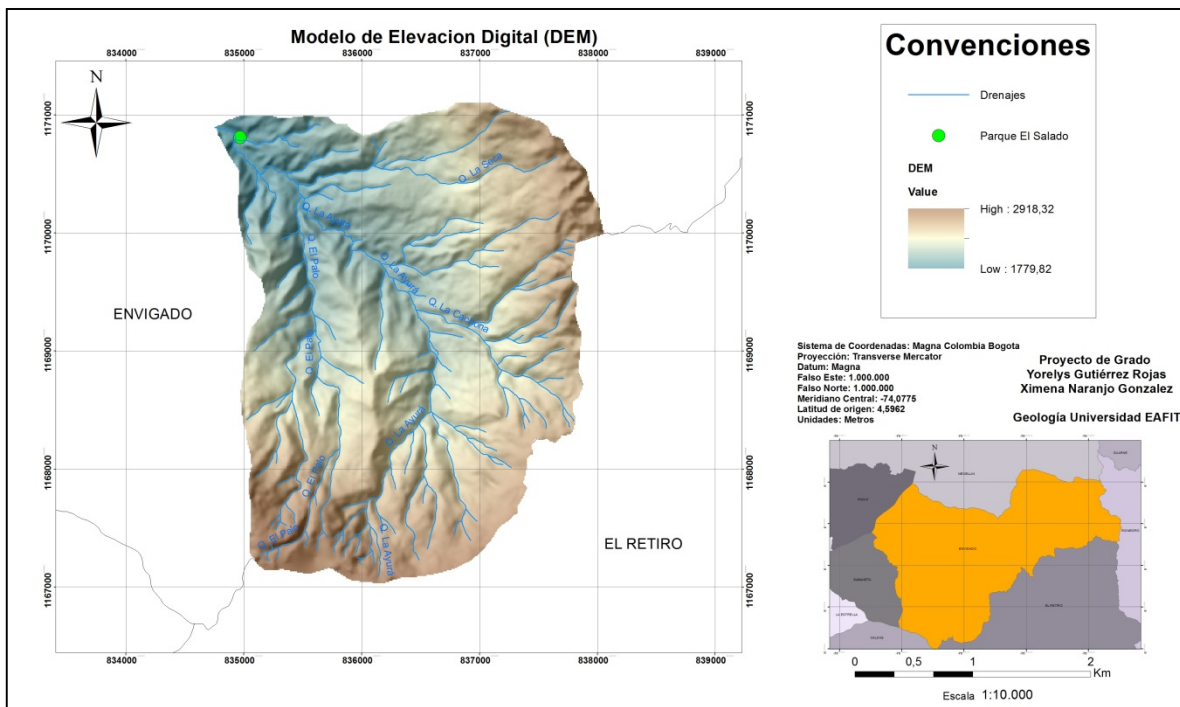


Figura 3. Modelo de elevación digital de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

2.3 Modelo de Sombras

El modelo de sombras, se elaboró a partir del modelo de elevación digital, en conjunto con la base cartográfica. Fue utilizado para definir las unidades

geomorfológicas y los procesos morfodinámicos presentes en el área superficial de la zona de estudio.

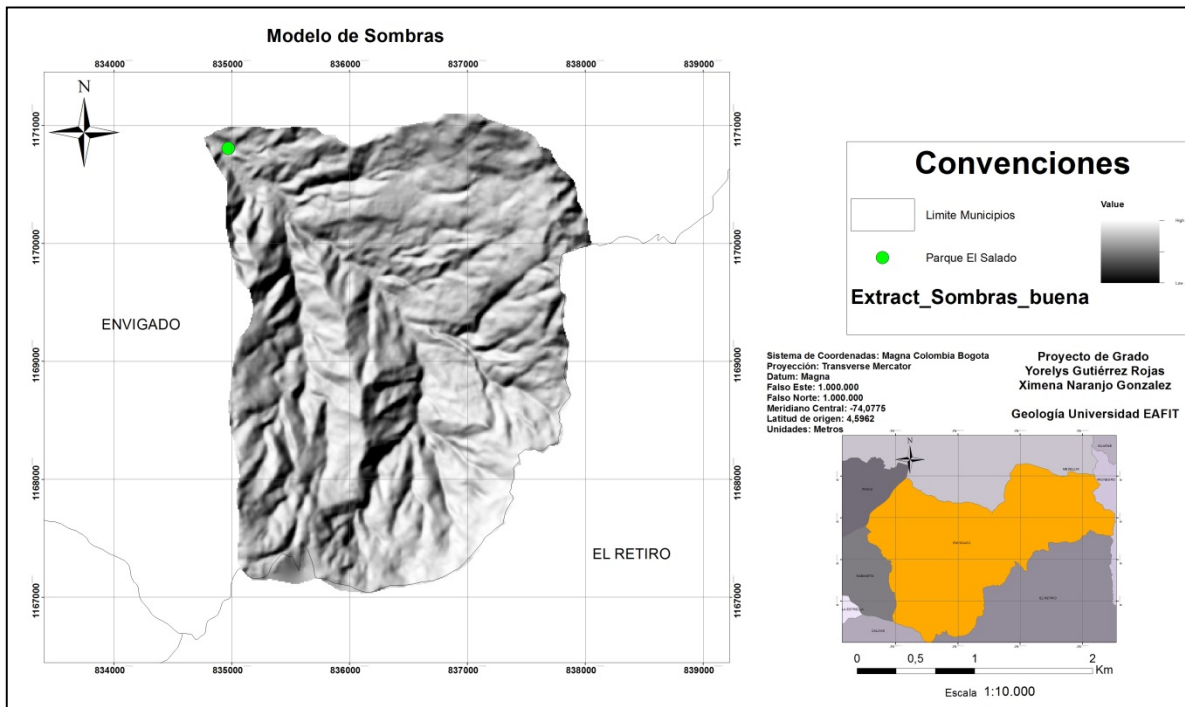


Figura 4. Modelo sombras de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

2.4 Sensores Remotos

La utilidad de los sensores remotos en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa es transversal al desarrollo de todas las etapas del trabajo. Actualmente, se dispone de documentos técnicos relacionados con el uso de sensores remotos en los levantamientos temáticos (SGC, 2015). Dichos sensores remotos sirvieron a la delimitación de unidades geomorfológicas y procesos morfodinámicos. Entre los sensores remotos se encontró con la disponibilidad de:

Ortofotos: fueron suministradas por la Alcaldía de Envigado y la Universidad EAFIT; de los años 2004, 2014 y 2015. Teniendo un cubrimiento parcial de la zona de estudio (figura 5).

Fotografías aéreas: se utilizaron 78 fotografías aéreas, a escalas 1: 11.200, 1:10.500 y 1:5.100 pertenecientes a las fajas 02, 03, 05 y 2/3 del año 1993; 06S, 09S, 09C y 08C del año 2003; 06c y 12 del año 2007, respectivamente, del municipio de Envigado, para realizar interpretación de geofomas e inventario de

movimientos de masa.

Google Earth: Esta herramienta fue útil para la delimitación de unidades geomorfológicas y cartografía de procesos, además presento un cubrimiento total de la zona de estudio (figura 6).

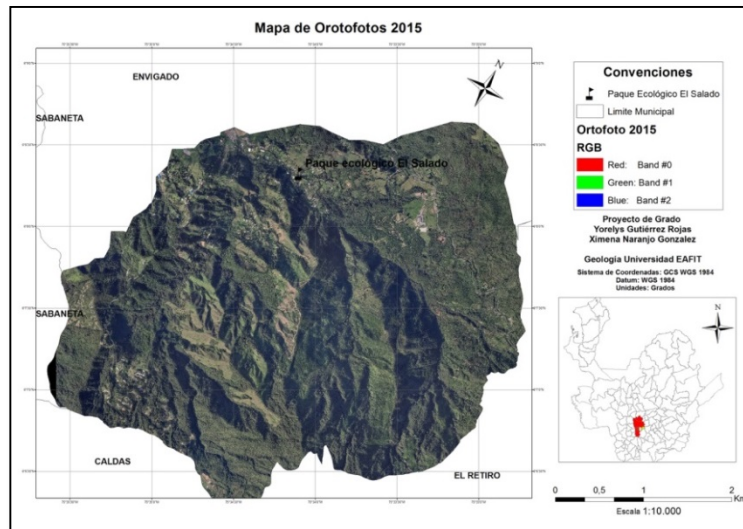


Figura 5. Ortofotografía para el área de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.



Figura 6. Cubrimiento de Google Earth para la zona de estudio. Municipio de Envigado, Antioquia.

3. GENERALIDADES

3.1 Localización

El municipio de Envigado está situado al Sur de Medellín, en el departamento de Antioquia (Colombia); con una variación altitudinal entre 1.518 y 2.880 metros sobre el nivel del mar (msnm). Presenta temperaturas entre 22 y 18 °C y una humedad relativa del 70%. En la *figura 7* se observa la localización de la zona de estudio que hace parte del sector alto de la cuenca de la Quebrada La Ayurá

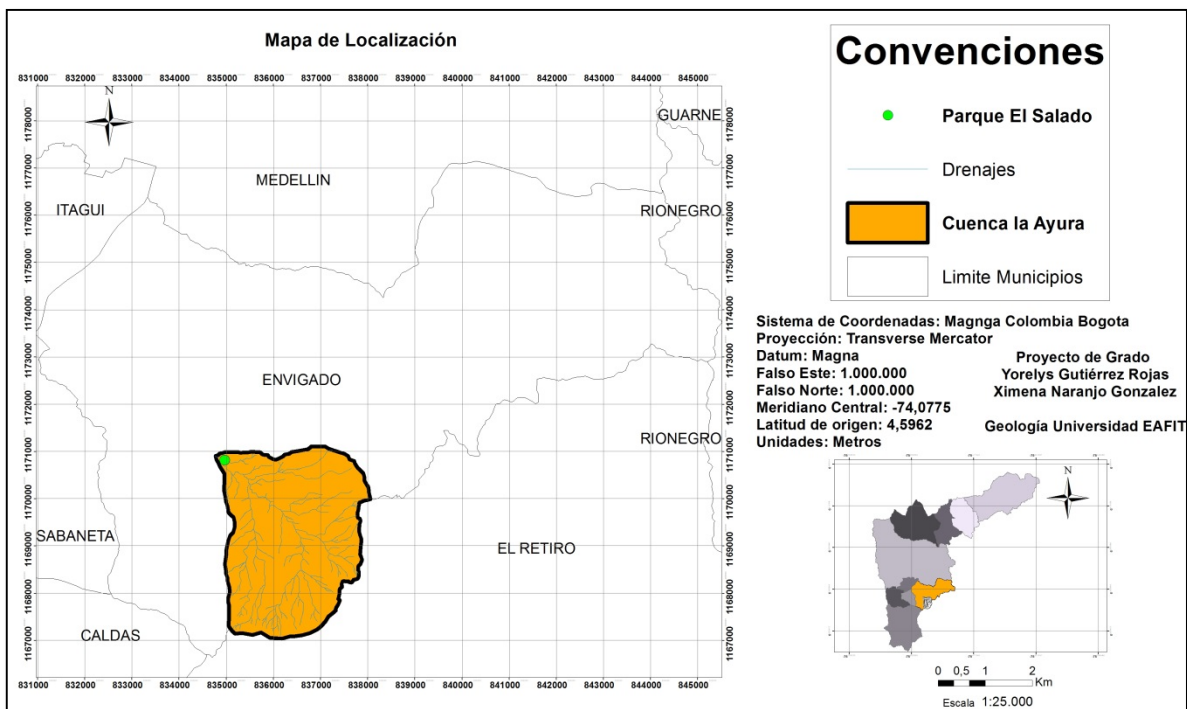


Figura 7. Localización general de la zona de estudio en la cuenca La Ayurá. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

La cuenca La Ayurá se localiza en las laderas orientales del Valle de Aburra, al suroriente del Área Metropolitana, atravesando todo el municipio de Envigado. La quebrada La Ayurá nace en el Cerro Astilleros a 2.880 msnm, tiene un área de 38,14 Km² y su velocidad media es de 0,933 m/s con una pendiente de 17%. Desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Medellín tienen una longitud de 15 Km y perímetro de 30,66 Km (POT Envigado 2011).



Foto 1. *Cauce de la Quebrada la Ayurá en la parte baja de la cuenca.*

3.2 Clima

Según el Estudio Hidrológico y de Modelación Hidráulica de la Quebrada La Ayurá, (2017), elaborado en la parte media- baja de la quebrada, se registran datos de pluviosidad en dos estaciones pluviométricas, una de ellas ubicada en Quebrada La Ayurá (cerca al Hospital Manuel Uribe Ángel) y la otra en el alto Las Palmas, propiedad de empresas Públicas de Medellín (EPM). Con estos sistemas se pueden establecer dos periodos de lluvias en el año, cada uno de tres meses: abril, mayo y junio; y septiembre, octubre y noviembre, arrojando resultados de datos pluviométricos desde 1832 mm hasta 1968 mm (*figura 9*).

La temperatura no presenta variaciones significativas durante el año, teniendo promedio de 16°C para la parte alta de la cuenca y 22°C para la parte baja.

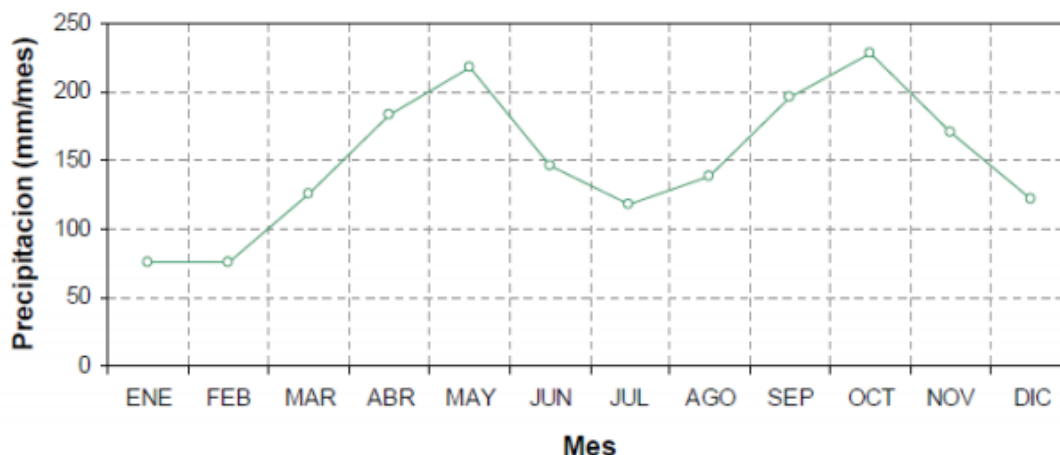


Figura 9. Ciclo anual de pluviosidad tomada en la estación pluviométrica de la Quebrada La Ayurá del año 2016. Tomado de Consorcio Riesgos de Envigado, 2014.

3.3 Vegetación

La vegetación que aún se encuentra está constituida en su mayor parte por rastrojos altos y bajos y pastos enmalezados, presentándose fragmentos nativos del bosque original o primario, así como manchas de bosque secundario en distintas etapas sucesionales, localizadas en las zonas altas de las cadenas montañosas, comprendido en los pisos térmicos de montano y pre montano según POMCA, 2005.

La cobertura de suelos a nivel regional, está compuesto en su gran mayoría por mosaico de cultivos, pastos enmalezados y bosques naturales fragmentados, localizados principalmente en la zona rural de la vereda El Vallano y la vereda El Escobero. En la zona de estudio se encuentra principalmente: Al norte, tejidos urbanos discontinuos, donde se localizan algunas fincas privadas, El Parque Ecológico El Salado y las trucheras de Envigado; al noreste se observan manchas de Bosque natural fragmentado con presencia de arbustos y matorrales; al este se encuentra plantaciones de aproximadamente 3 km de longitud de coníferas y algunos pinos y pequeñas manchas de pastos limpios sin intervenciones y en la parte central y oeste del área de estudio se encuentra una masa extensa de bosque natural fragmentado con pastos y cultivos (*figura 10*).

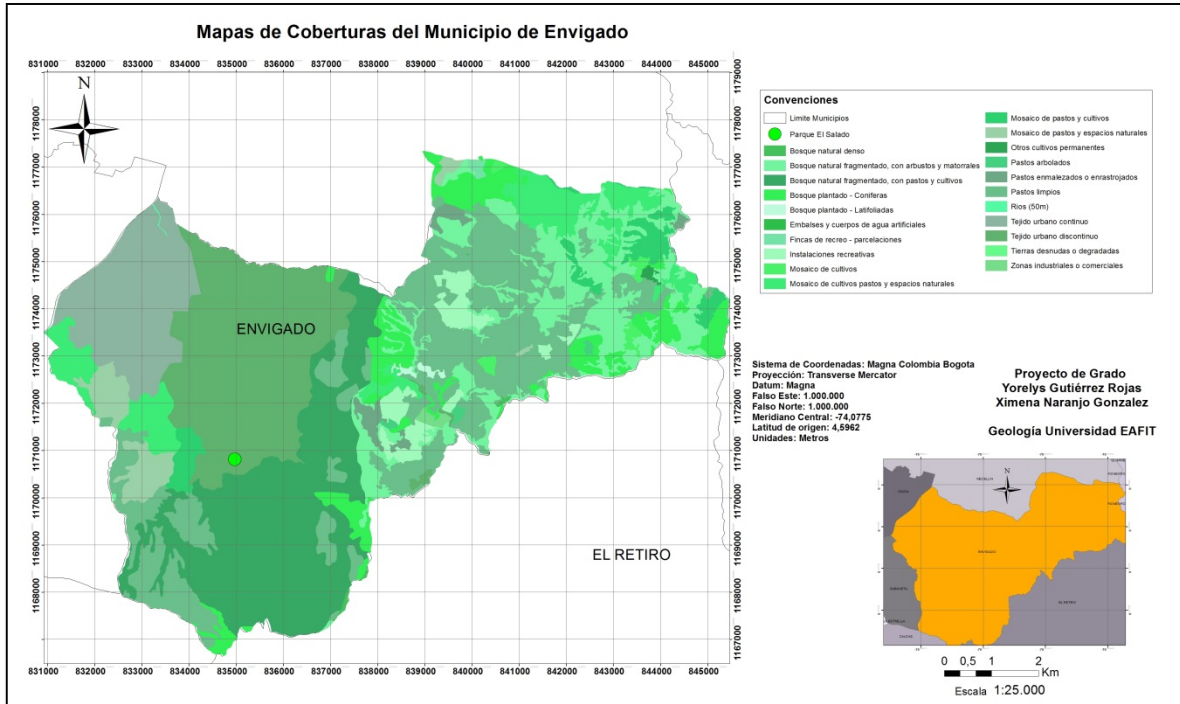


Figura 10. Mapa de cobertura de suelos del Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

3.4 Fisiografía

La caracterización de las pendientes de la Cuenca en la parte alta de la Quebrada La Ayurá, son relativamente suaves cerca al parque Ecológico El Salado, de aproximadamente 10° a 15° en su margen izquierda y de 15° a 30° aproximadamente, para la margen derecha. Estas laderas son cóncavas en su mayoría, con surcos y cárcavas productos de la precipitación intensa y algunas obras antropogénicas hacia sus riberas, especialmente por el uso de cuatrimotos.

En general las laderas están recubiertas por briofitas que indican un ambiente saturado de agua de donde nacen pequeños arroyos, y son un gran factor detonante para los movimientos de masa en esta zona (foto 2).



Foto 2. *Briofitas presentes en el Cerro Astilleros, en el nacimiento de diferentes arroyos.*

4. GEOLOGIA

4.1 GEOLOGIA REGIONAL Y MARCO TECTÓNICO

A nivel regional, el Valle de Aburrá está vinculado a la continua y compleja evolución del norte de los Andes en la esquina noroccidental de Suramérica. Este borde enmarca complejos procesos de convergencia, subducción y acreción entre las placas oceánica del Caribe y Nazca bajo el continente suramericano, que datan desde tiempos del Cretácico tardío hasta hoy (Taboada 2000, Pindell and Kennan, 2009;). Sumado a esta triple convergencia, el levantamiento final de los Andes del norte y la evolución de sus cuencas intramontanas ha sido fuertemente influenciado por la colisión e interacción del bloque Panamá- Chocó con el borde noroccidental de los Andes en el noroccidente de Colombia (Duque-Caro, 1990, Cediell et al., 2003). El inicio de esta colisión ha sido considerada más antigua de lo planteado, hacia el Mioceno Inferior (Montes et al., 2015), implicando nuevas consideraciones e interrogantes en la evolución geológica del noroccidente de Colombia y en particular de sus cuencas intramontanas, entre ellas la cuenca del Valle de Aburrá.

El municipio de Envigado se encuentra ubicado geológicamente en medio del flanco occidental de la Cordillera Central de los Andes Colombianos. A nivel regional la Cordillera Central está compuesta por un basamento polimetamórfico pre-Mesozoico que incluye rocas oceánicas y continentales (McCourt et al. 1984 en Taboada, 2000), (definido por Restrepo y Toussaint en 1982 basados en dataciones radiométricas y estudios petrográficos detallados), donde se encuentran rocas con edades desde el Precámbrico hasta el Cretáceo, que se generaron en por lo menos cuatro eventos metamórficos regionales superpuestos, lo que ha permitido la formación de una faja de alto grado de metamorfismo en la zona central (las Anfibolitas de Medellín y las Granulitas de El Retiro), rodeada a ambos lados por cinturones de roca de un grado de metamorfismo cada vez menor (esquistos y gneis) y en los límites con las cordilleras Occidental y Oriental por rocas metasedimentarias. El flanco este de la Cordillera Central está compuesto principalmente por rocas ígneas y metamórficas, con edades que van desde el Precámbrico hasta el Jurásico y que se extienden hacia el Valle Medio del Magdalena y son suprayacidas por rocas sedimentarias de edades Jurásicas hasta Terciarias.

Las rocas metamórficas de la Cordillera Central han sido estudiadas desde principios del siglo pasado por Ospina (1911) y Scheibe (1919), asignándoles una edad Precámbrica, pero sin realizar sobre ellas una definición estratigráfica formal. Posteriormente, Botero en 1963 define estas rocas como Grupo Ayurá – Montebello, dentro del cual se incluyen todas las rocas metamórficas de la parte central de Antioquia de edad Paleozoica. Echeverría (1973), divide estas rocas según el grado de metamorfismo, como Zona Montebello, conformada por rocas de bajo grado, que comprende esquistos cuarzo sericíticos, esquistos cuarzo micáceos, cuarcitas, esquistos actinolíticos y esquistos verdes; y Zona Ayurá

conformada por rocas de alto grado donde se incluyen anfibolitas, gneises biotíticos con granate y sillimanita, y esquistos biotíticos con sillimanita y grafito (GSM, 2002).

El levantamiento posterior de la Cordillera se dió durante el Mioceno (de 5 a 23 M.a.) en el evento conocido como Orogenia Andina. Como resultado de este proceso, muchas de las geofomas de la Cordillera son relativamente jóvenes y presentan intensos procesos erosivos (Arismendy, 2003). A nivel regional tanto en la zona de estudio como en sus alrededores, se encuentran rocas metamórficas e ígneas, además de depósitos recientes (*figura 11*).

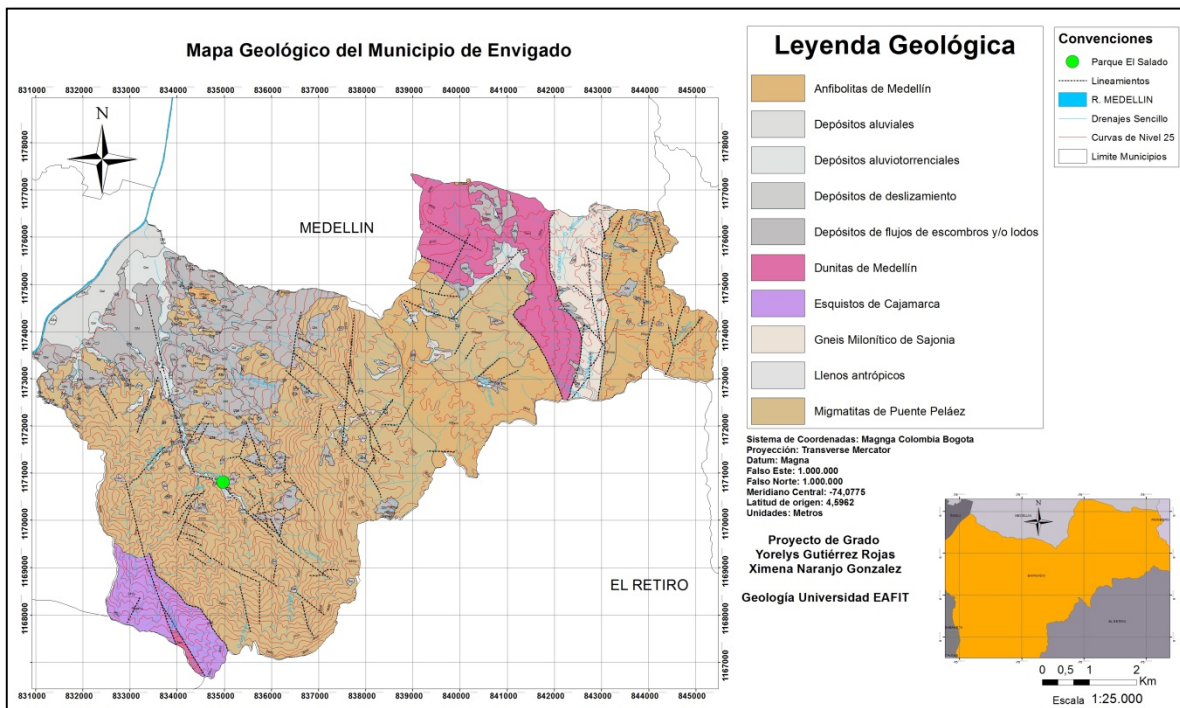


Figura 11. Mapa de la geología regional del Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000.

4.2 GEOLOGIA LOCAL

El municipio de Envigado está conformado por rocas metamórficas e ígneas en menor proporción; además de diversos tipos de depósitos de vertiente.

Las rocas metamórficas que se observan en la zona de estudio hacen parte del Complejo Cajamarca definidos como Esquistos de Cajamarca cuarzo sericíticos (PZeC), y en algunas zonas altamente grafitosos (PZeC-G), las Migmatitas de Puente Peláez, descritos como gneises (PRmpp-GN) y migmatitas (PRmpp) los cuales son incluidas dentro del Complejo El Retiro en este proyecto. Se observó diferentes depósitos de vertiente localizados principalmente en los cauces de las quebradas y en las zonas donde han ocurrido movimientos en masa a causa de los diferentes detonantes y agentes externos a la cuenca (*figura 12*).

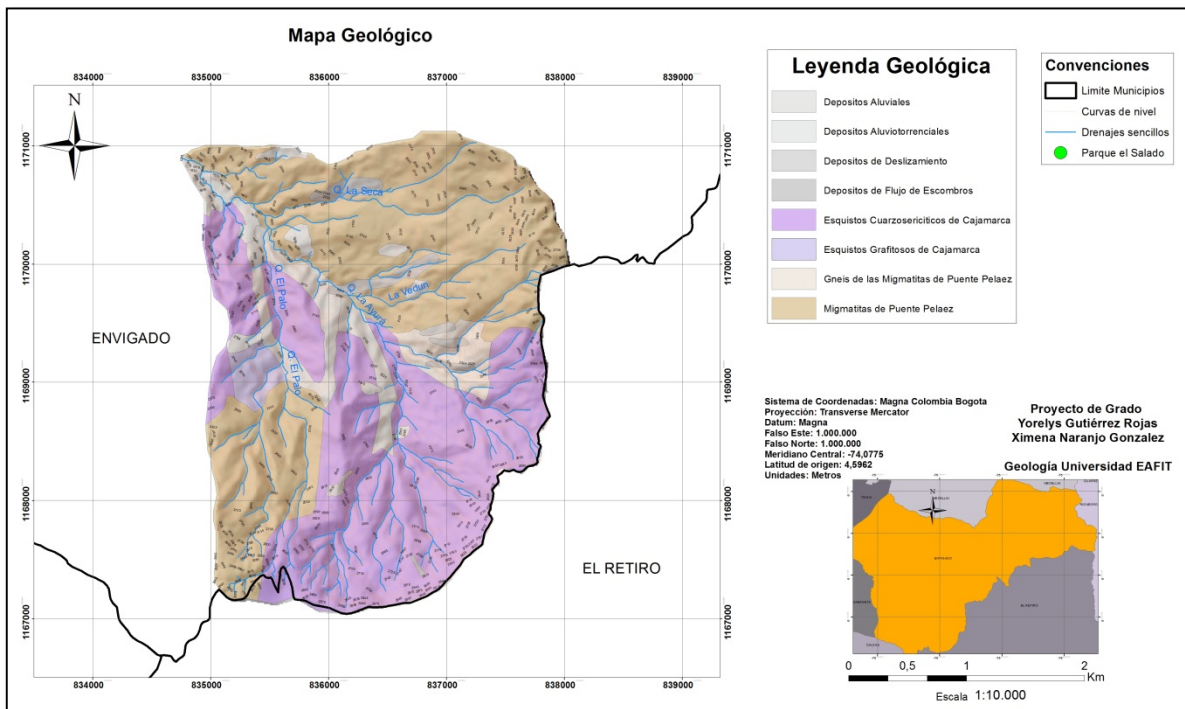


Figura 12. Geología de la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

4.2.1 ROCAS METAMORFICAS

Estas rocas han sido estudiadas desde principios de siglo pasado por Ospina (1911) y Scheibe (1919), asignándoles una edad Precámbrica pero sin realizar sobre ellas una definición estratigráfica formal. Posteriormente, (Botero 1963), define estas rocas como Grupo Ayurá – Montebello, dentro del cual se incluyen todas las rocas metamórficas de la parte central de Antioquia de edad Paleozoica (Echeverría 1973), divide estas rocas según el grado de metamorfismo, como Zona Montebello, conformada por rocas de bajo grado, que comprende esquistos cuarzo sericíticos, esquistos cuarzo micáceos, cuarcitas, esquistos actinolíticos y esquistos verdes y Zona Ayurá conformada por rocas de alto grado donde se incluyen anfibolitas, gneises biotíticos con granate y sillimanita y, esquistos biotíticos con sillimanita y grafito.

Finalmente, Toussaint y Restrepo (1982), basados en diferentes dataciones radiométricas proponen llamar estas rocas como Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, con al menos tres eventos metamórficos regionales importantes, dos de ellos durante el Paleozoico y uno cretácico.

4.2.1.1 *Migmatitas de Puente Peláez (PRmpp):*

González (1980) estudia las rocas del sur de Antioquia y norte de Caldas e identifica migmatitas con intercalación de gneises, discordantemente cuarcitas a las cuales denomina Migmatitas de Puentes Peláez. Los afloramientos de esta unidad corresponde a gneises micáceos, y migmatitas, los cuales son el producto de un metamorfismo regional anterior al periodo Mesozoico, posiblemente de edad Caledoniana., por lo que se considera de la época Paleozoica (Toussaint y Restrepo, 1984).

Las rocas con textura migmatíticas se observaron principalmente en la parte alta de la Quebrada El Palo, aguas arriba de una bocatoma construida sobre la quebrada; y en la zona de la Quebrada Cañada Honda. En muestra macroscópica son rocas plegadas con tonalidades de grises a negro con bandeamiento milimétrico de cuarzo, de igual manera presenta textura augen y boudines de cuarzo lechoso (*foto 3*).



Foto 3. Migmatitas de Puente Peláez ubicada aguas arriba en la Quebrada El Palo.

4.2.1.2 Gneises de las Migmatitas de Puente Peláez (PRmpp-Gn):

Los gneises que se observaron a lo largo de los recorridos de campo en la zona de estudio están compuestos en un 60% de cuarzo y feldespato, con bandeamientos centimétricos de micas (biotita), ferromagnesianos y algunos con sillimanita, que son evidencia de un metamorfismo de alto grado (*foto 4*).

Las migmatitas de Puente Peláez desarrollan suelos areno-arcillosos de color amarillo pardo con un espesor aproximado de tres metros. Presentan bloques de roca angulosos saprolitizados, donde se pierde toda clase de textura original de la roca y se observan algunos minerales ferromagnesianos, además de ser rica en micas y cuarzo (*foto 5*).



Foto 4. Gneis de las Migmatitas de Puente Peláez entre la Qda. La Cachona y Qda. La Ayurá.



Foto 5. Suelo desarrollado por las Migmatitas de Puente Peláez. Localizado al este de la Qda. El Palo.

4.2.1.3 Esquistos de Cajamarca (PZeC):

Los esquistos encontrados en esta zona, también llamados Esquistos de Ancón, están incluidos en este complejo metamórfico debido a su posición tectónica al este de la falla San Jerónimo. (Rodríguez; et. al., 2005). Estas rocas son representativas de un bajo a medio grado de metamorfismo.

Macroscópicamente estas rocas están conformados por 60% de cuarzo aproximadamente, 20% de micas principalmente sericita y 20% de feldespato y minerales ferromagnesianos, con algunas intercalaciones de grafito y estructuras como venas y boudines de cuarzo lechoso; por lo que se denominan Esquistos Cuarzo sericíticos. La roca presenta una foliación fina preferencial aproximada de N60W, con planos ondulados y rugosos; muy fracturados y diaclasados a lo largo de toda la zona (foto 6).



Foto 6. Esquistos cuarzo sericíticos del Complejo de Cajamarca localizados en el Cerro Astilleros. Con venas y boudines de Cuarzo.

4.2.1.4 Esquistos Grafitosos de Cajamarca (PZec-G):

Son esquistos de medio a alto grado de metamorfismo, que están formados por más de un 70% de grafito en su composición química, con lentes de cuarzo más cristalino y micas como biotita y clorita (?). Son rocas masivas poco fracturadas y sin diaclasamiento, con delgados bandeamientos de cuarzo blanco (foto 7).



Foto 7. Esquistos Grafitosos del Complejo Cajamarca localizados a margen izquierda de la Quebrada La Ayurá.

Estas rocas metamórficas desarrollan suelos de color rojo, ricos en arcillas desarrolladas por la meteorización física y química de las micas, con presencia de minerales ferromagnesianos de color negro y cristales centimétricos de cuarzo lechoso, que evidencian ser más resistentes a la meteorización (foto 8).



Foto 8. Suelo desarrollado por los Esquistos de Cajamarca. Localizado en uno de los movimientos de masa en el escarpe del Cerro Astilleros.

4.2.2 DEPÓSITOS

Estos depósitos están formados por la acumulación de materiales emplazados por movimientos en masa superficiales. (Naranjo, 1994) Factores tales como la gravedad, tectonismo, clima, etc., mueven materiales producto de meteorización química o roca inalterada hacia niveles cada vez más bajos. (POT, 2011) Los movimientos pueden ser repentinos, en forma de grandes deslizamientos de tierra y de desprendimientos de roca, pero a menudo suceden casi imperceptiblemente como el lento resbalamiento del suelo a lo largo de terrenos de alta pendiente (INGERCIVIL, 2014)

Están constituidos por bloques heterométricos, con un grado de meteorización de moderado a extremo, son de formas angulosas a subangulosas, irregulares. Matriz con diferentes texturas cuya granulometría varía de arcillosa hasta arenosa, los colores más comunes son terrosos como el ocre, café y diferentes tonos de rojo y amarillo; (INGERCIVIL, 2014) se caracterizan por el predominio de la fracción gruesa (bloques y fragmentos de roca) sobre la fracción fina. Estos flujos de escombros tienen espesores muy variados que oscilan entre 20 m y 50 m; en algunas ocasiones recubren alineamientos o estructuras mayores, sin embargo no fue posible observar rasgos de actividad neotectónica en ellos.

Esta unidad litológica desarrolla suelos residuales rojizos de textura arcillosa, debido a que la presencia de micas en la roca parental son de gran abundancia, además de clastos de líticos de las diferentes rocas metamórficas de la zona.

4.2.2.1 Depósito de deslizamiento (Qd):

Estos depósitos son el producto de fenómenos de movimientos en masa recientes ocurridos en los terrenos inclinados (vertientes) y que fueron generados por una combinación de factores tales como: la gravedad, el agua y la intervención antrópica, pudiendo haber sido detonados en algunas ocasiones por movimientos sísmicos, aguaceros torrenciales o intervenciones constructivas mal planeadas (Rendón, 1999).

Los depósitos de deslizamiento se encuentran principalmente en las zonas más escarpadas, caracterizados por ser matriz soportados, compuesta por bloques de rocas metamórficas, especialmente esquistos y gneises con una matriz lodosa. Los bloques tienen una forma angulosa a subredondeadas y pueden alcanzar hasta tres metros de diámetro (*foto 9*).



Foto 9. Depósito de Deslizamiento, localizado en la Qda. El Palo, cerca de su desembocadura en la Qda. La Ayurá.

4.2.2.2 Depósito de Flujo de escombros y/o lodos (Qfd):

Este tipo de depósitos son el producto de la acumulación de materiales provenientes de las partes altas de las vertientes, su dinámica puede estar asociada a saturación, condición que disminuye marcadamente sus propiedades de resistencia y cohesión, haciéndolos vulnerables a fenómenos como fuertes precipitaciones o sismos. (POT ,2011).

Estos depósitos se encuentran distribuidos en el área de manera desigual, formando en la pata de las laderas superposición de flujos, asociando a geoformas de abanicos de aproximadamente 3 metros de longitud. Están conformados por bloques subredondeados de hasta un metro de diámetro, de composición esquistosa y gnéisica en su mayoría; con una matriz de fina a muy fina de color café amarillento y algunos rojas (foto 10).

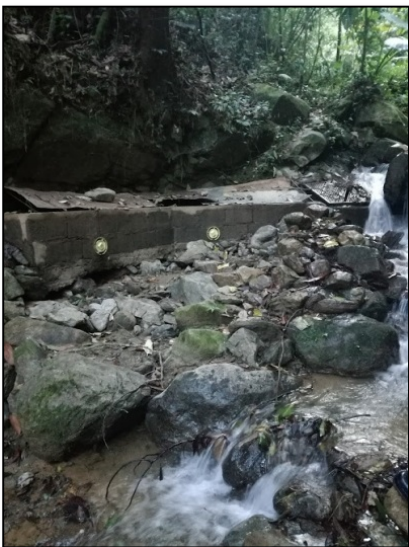


Foto 10. Depósito de flujo de escombros y/o lodo, ubicada en la bocatoma de la Qda. Cañada Honda.

4.2.2.3 Depósito Aluviotorrencial (Qar):

Son generadas los eventos de alta energía en el cauce de la Quebrada principalmente cuando hay fuertes precipitaciones o sismos, donde las corrientes de agua que socaban y drenan las aguas superficiales aumentando así las posibilidades de desprendimiento de tierra, generando avenidas torrenciales que arrastran a su paso todo material que encuentre como rocas, materia orgánica y lodo, los cuales cuando baja la energía tienen una depositación caótica ladera abajo.

Estos depósitos se observan claramente en quebradas como la Cachona, El Palo y algunas zonas de la quebrada La Ayurá, que demuestran la energía que pueden llegar a tener y así tener catastróficas repercusiones aguas abajo.

La principal características son los bloques de tamaños hasta de 4.5 metros, subangulosos, depositados sin ningún tipo de selección, envueltos en una matriz areno- arcillosa de color amarillo (*foto 11*).



Foto 11. Depósito Aluviotorrencial. Quebrada La Cachona a unos 50 metros de su desembocadura en la Ayurá.

4.2.2.4 Depósitos Aluviales (Q2al):

Los depósitos aluviales están asociados a inundaciones periódicas de la Quebrada La Ayurá y algunos de sus afluentes. Éstos, presentan gran variación

en el espesor, puesto que depende de la profundidad del basamento. Están compuestos por sedimentos tales como arcillas, limos, arenas y gravas gruesas, presentando generalmente gradación normal. (Rendón, 1999).

Dentro de estos depósitos se pueden diferenciar las llanuras de inundación (*foto 12*) y las terrazas aluviales (*foto 13*). Los primeros corresponden a la acumulación de material predominantemente grueso de origen sedimentario cuya expresión principal es la llanura o planicie aluvial del río y los segundos son depósitos dejados por la Quebrada a lo largo de su cauce.



Foto 12. *Terraza de la Finca El Palo.*



Foto 13. *Depósito Aluvial. Llanura de inundación de la desembocadura de la Quebrada El Palo en la Ayurá.*

4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Como parte de los estudios, se realizaron investigaciones enfocadas a identificar evidencias o indicios de actividad de las fallas que se encuentran en la zona de estudio. Para esto, se recopiló la información e interpretación de fotografías aéreas y salidas de campo.

Según el G.S.M. (2002), la cuenca de la quebrada La Ayurá está dominada por el sistema de fallas Cauca – Romeral, las cual atraviesan el Valle de Aburrá en una dirección aproximada NS, Toro y Velásquez (1984) las agrupan en dos dominios:

Romeral, al oeste del río Medellín con fallas NS – NW, y Oriental representado por alineamientos con tendencia predominante NW.

A nivel regional la cuenca La Ayurá está afectada por alineamientos NS paralelos a las trazas de la falla de Romeral y por fallas inferidas entre las quebradas La Miel, El Salado y La Ayurá, que se pierden o son cortados y desplazados por fallas con dirección NW, al llegar a las terrazas del río Medellín. (G.S.M., 2002)

En la Cuenca de La Ayurá se pueden reconocer regionalmente tres fallas del dominio oriental: La falla La Cachona de dirección N50W definida por Toro y Velásquez (1984), la falla La Ayurá en la parte baja de la Subcuenca y la falla Marginal en la flanco oriental y parte alta de la Quebrada La Ayurá (*figura 13*).

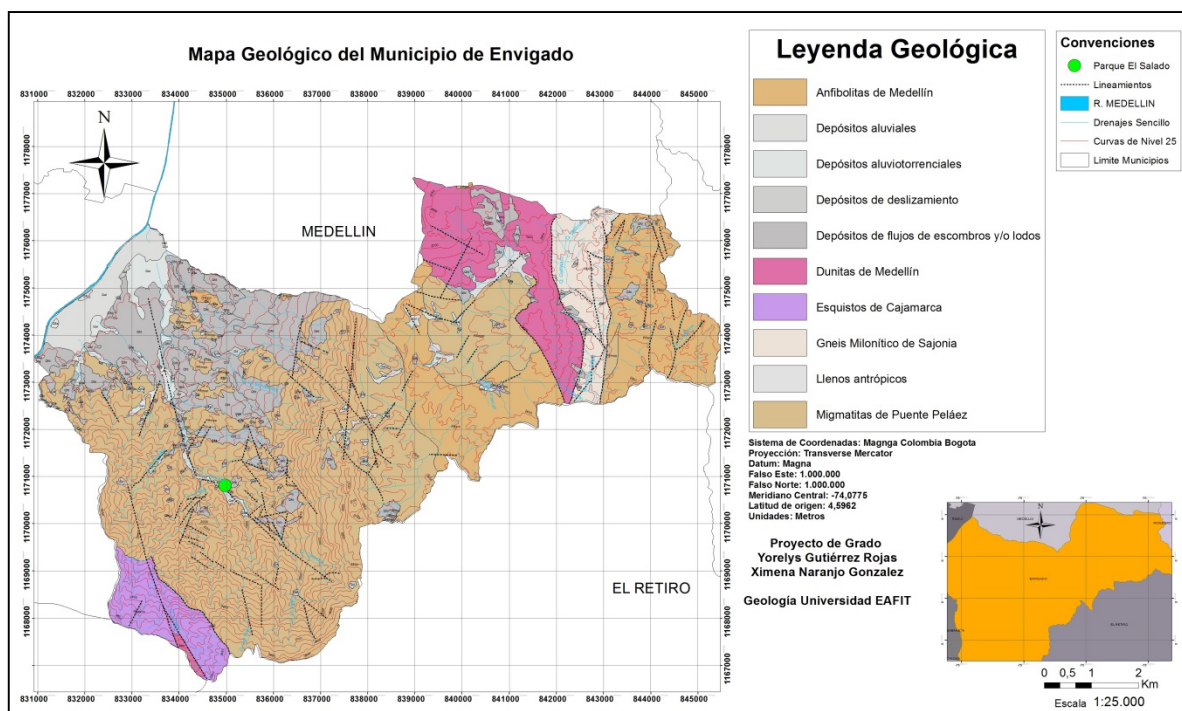


Figura 13. Mapa estructural regional del municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000.

Por la cobertura vegetal tan espesa sobre la zona de estudio, acompañado del valle estrecho de la Quebrada La Ayurá aguas arriba, se hizo difícil la toma de datos estructurales en las zonas que a continuación se describen, sin embargo se lograron corroborar con puntos de control estructural de los drenajes y geoformas por la fotointerpretación y datos de la bibliografía.

4.3.1 Falla Marginal:

Reportada por Echeverría (1973), se convierte en el límite del altiplano oriental y la divisoria de aguas entre las quebradas La Ayurá y Las Palmas, y presenta una dirección S-N.

4.3.2 Falla La Cachona

Esta falla inferida por Toro y Velásquez (1984), muestra un alineamiento del drenaje en dirección N60°W que controla el curso de la quebrada La Cachona y parte del tramo medio alto de la quebrada La Ayurá.

Esta falla controla los depósitos de vertiente compuestos por flujos de escombros de la parte más sur oriental de la cuenca La Ayurá, y a su vez esta encubierta por éstos con dirección N45-60E, ubicados en sectores de la vía Escobero, y en su cauce principal dirección NW, paralela al cauce de la Quebrada La Ayurá.

4.3.3 Falla La Ayurá

Esta falla fue descrita por Toro y Velásquez (1984), con algunas evidencias como alineamientos del drenaje. A partir de un control estructural con dirección N 53° W hacia la parte alta de la quebrada La Ayurá, y N21° W en la cuenca baja, hasta llegar al casco urbano del municipio de Envigado. La principal dirección del control es en sentido NW.

Con el software Stereo32, se graficaron los datos estructurales tomados en puntos de control de recorridos de campo con los que se pudieron corroborar la dirección de las fallas La Cachona y La Ayurá que se muestran a continuación.

En la *figura 14*, se observan los datos estructurales tomados sobre la quebrada la Cachona, donde se observa que tienen direcciones distribuidas preferencialmente al NW, que va desde el Cerro Astilleros hasta su desembocadura en La Ayurá. Los datos se presentan en diagrama de rosas y en diagrama de dispersión de datos, donde está toda la concentración de los datos.

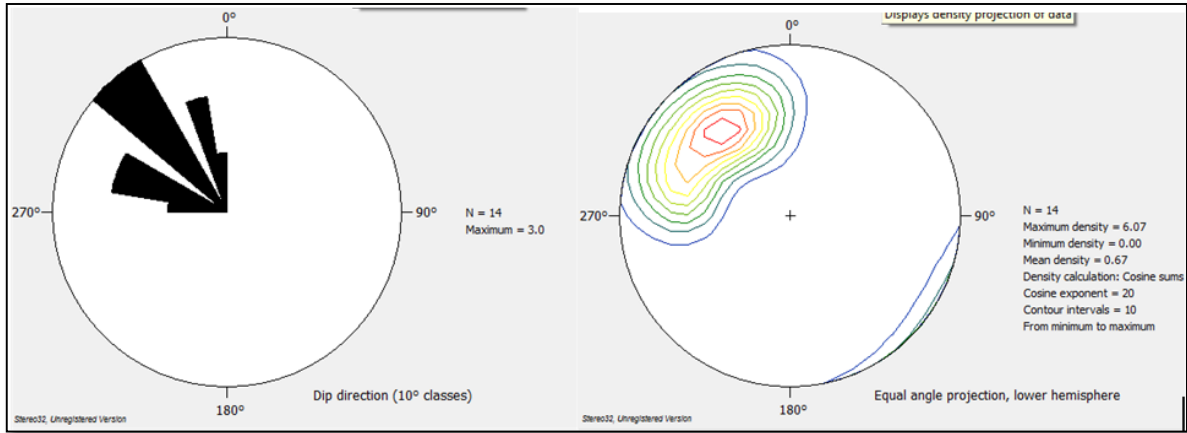


Figura 14. Datos estructurales de la Quebrada La Cachona graficados en Stereo32.

En el caso de la Quebrada La Ayurá. Se graficaron datos que corroboran la dirección de la falla La Ayurá en la parte más alta de la cuenta (Cerro Astilleros), donde tienen una dirección preferencial al NW (figura 15), distribuidas uniformemente en una dirección casi NS.

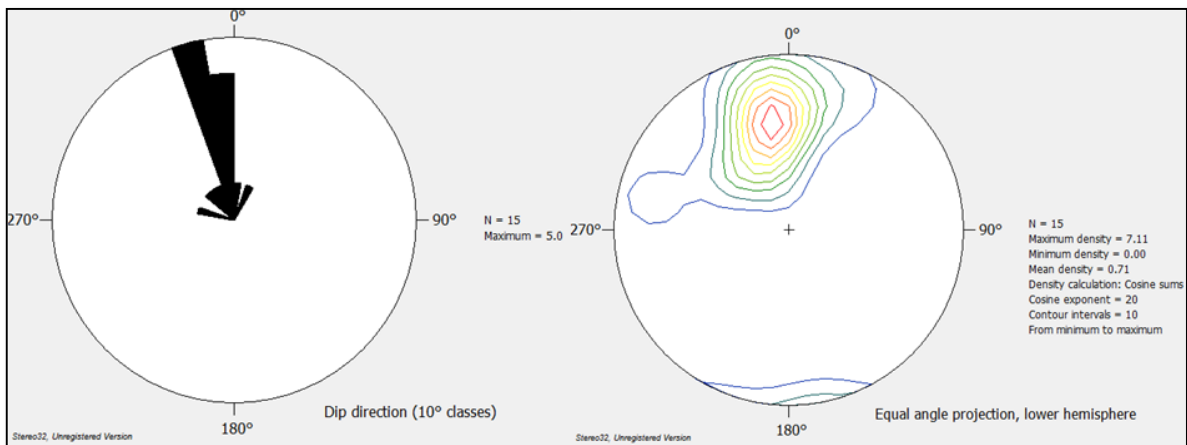


Figura 15 Datos estructurales de la Quebrada La Ayurá graficados en Stereo32.

5. GEOMORFOLOGÍA

En esta sección se presenta un mapa geomorfológico del tramo Cerro Astilleros y El Parque Ecológico El Salado de la Quebrada La Ayurá a escala 1:10.000. Como parte de este estudio se analizaron criterios tenidos en cuenta para la jerarquización y clasificación de unidades geomorfológicas, utilizando la metodología para la identificación de unidades y subunidades geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2014).

En Envigado se pueden encontrar geofomas que se extienden desde los 1.530 msnm hasta los 2.880 msnm, las cuales en su mayoría se encuentran distribuidas hacia la cuenca de La Ayurá. Las Unidades Geológicas Superficiales se consideran como un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros, e Incluyen rocas metamórficas con diferentes grados de meteorización y fracturamiento, así como suelos y depósitos no consolidados.

La identificación de las unidades geomorfológicas es de gran importancia para la zona de estudio, debido a que estas son un insumo necesario para la identificación de las zonas con mayor grado de susceptibilidad ante fenómenos naturales producidos por la morfodinámica del terreno.

En la parte alta de la Quebrada La Ayurá, se identificaron tres unidades geomorfológicas principales que abarcan toda el área de estudio: de ambiente denudacionales se identificaron escarpes de erosión mayor, Altiplanos colinados y lomeríos residuales; de ambiente fluvial y antrópico se encontró planicies de inundación y terrazas de acumulación, y superficies de explanación, respectivamente.

Las subunidades geomorfológicas identificadas son: laderas onduladas, laderas cóncavas, irregulares, cimas, planicies y terrazas de acumulación aluvial y superficies antrópicas. En la *figura 16* se presenta el mapa geomorfológico de la zona de estudio y a continuación se describen las subunidades definidas, donde se pueden observar los movimientos en masa asociados en algunas de ellas (de color rojo).

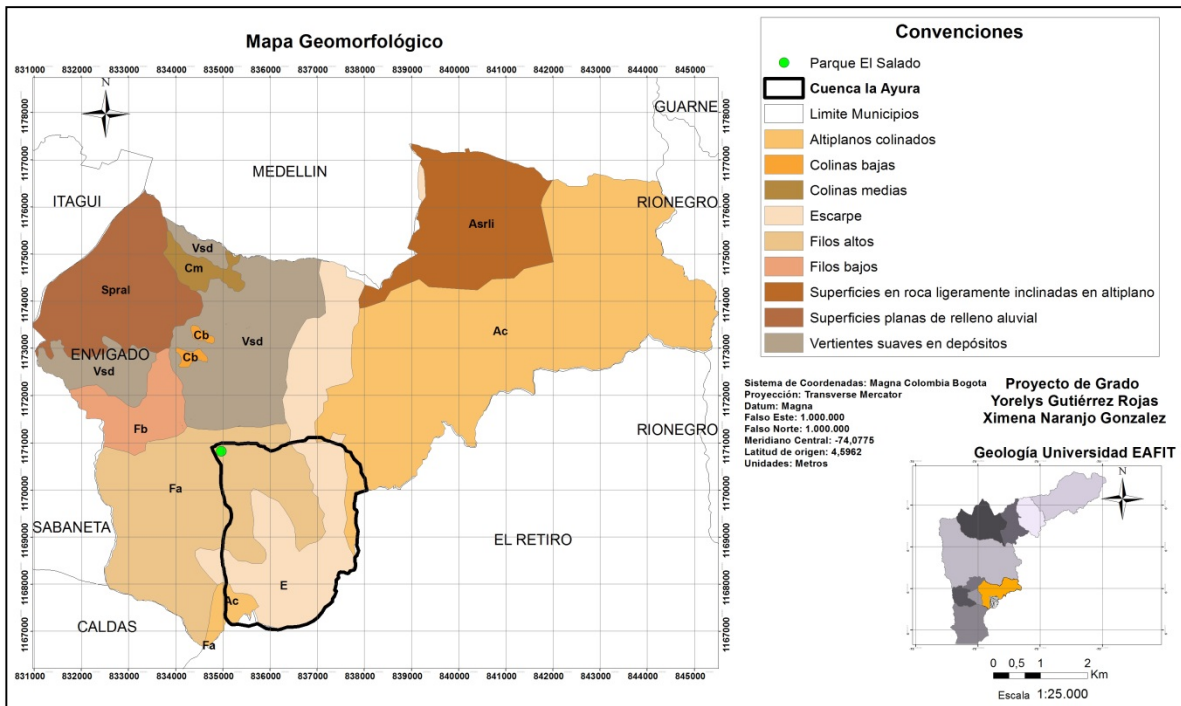


Figura 16. Mapa geomorfológico regional del municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:25.000..

Para la descripción de las subunidades de la cuenca se utilizó la siguiente tabla de caracterización de rangos (*tabla 2*).

LONGITUD (m)	FORMA	INCINACIÓN	FORMA DE TOPES
Larga (>1000)	Cóncava	Suave (0-10%)	Redondeados
Moderada (250-500)	Convexa	Inclinada (10-25%)	Subredondeados
Corta (<250)	Irregular	Abrupta (25-50%)	Angulosos
	Ondulada	Escarpa (>50%)	

Tabla 2. Rango de características para descripción de subunidades.

En la (*Figura 17*) contiene las unidades geomorfológicas detalladas en la zona de estudio.

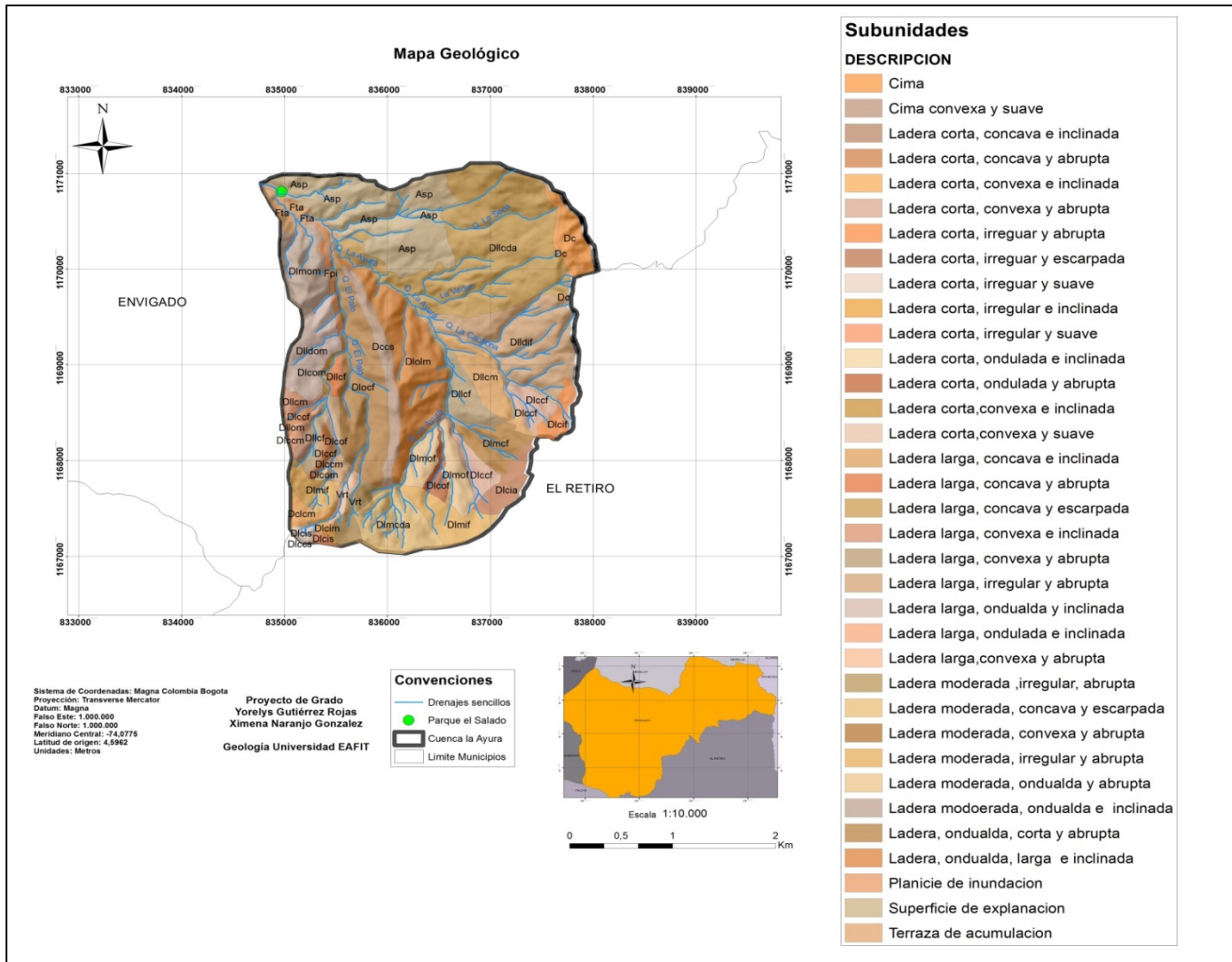


Figura 17. Mapa de geomorfología local. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

5.1 Escarpe de erosión mayor (Deem)

Localizado en el flanco norte y este del Cerro Astilleros, caracterizada por tener una pendiente escarpada (mayor al 50%), de longitud larga; con aproximadamente 1330 metros de longitud y muy disectada debido a que allí nace la mayoría de las quebradas de la zona, incluida La Ayurá. Esta unidad geomorfológica está caracterizada además, por presentar la mayoría de los movimientos en masa tipo deslizamientos rotacional y algunos flujos de lodo y/o escombros, asociados a los esquistos de Cajamarca y Migmatitas de Puente Peláez.

En esta unidad se identificaron 3 subunidades diferenciadas de acuerdo con su morfología, longitud y grado de inclinación (*figura 18*).

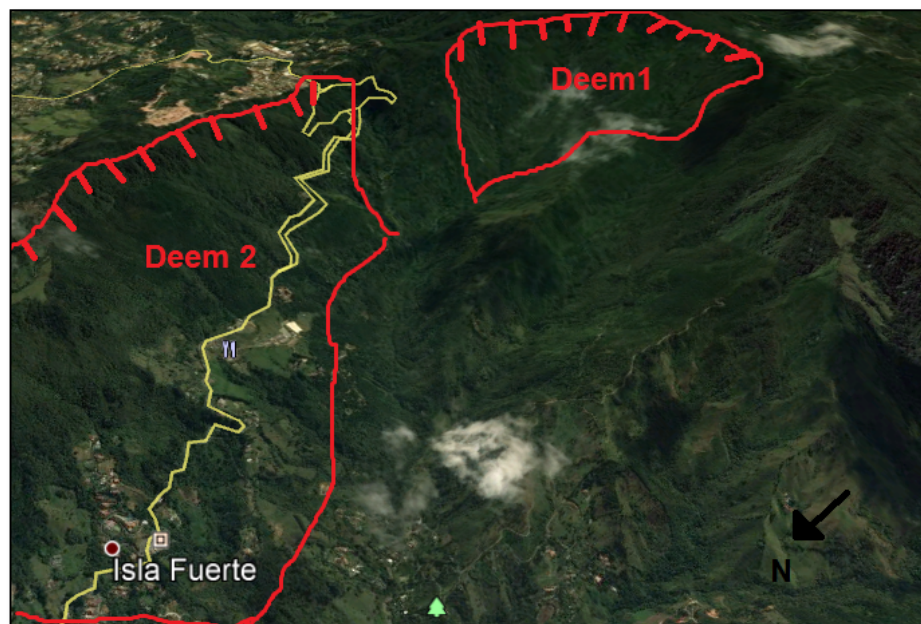


Figura 18. Localización de Escarpes de erosión mayor del flanco norte y este del Cerro Astilleros. Tomado de Google Earth.

- *Ladera larga, cóncava y de pendiente escarpada (Dilce)*: localizadas en el escarpe al este de la zona de estudio, limitada por la incisión de diferentes quebradas como la Cachona, la Verdun y otros tributarios. Estas laderas se conformaron en la superficie de las Migmatitas de Puente Peláez, que en esta zona poseen un alto grado de meteorización química y física (*figura 19*).

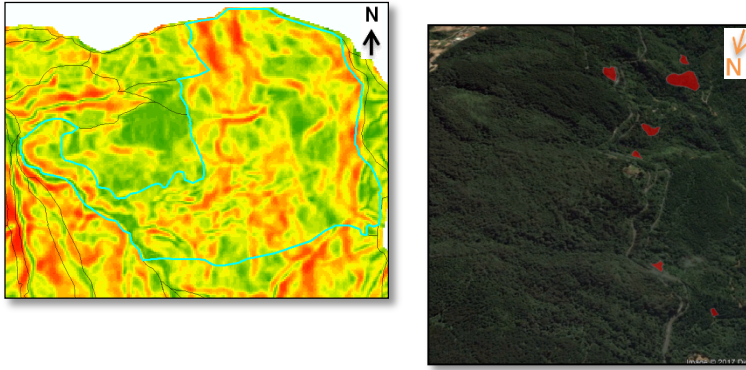


Figura 19. Ladera larga, cóncava, disectada y de pendiente escarpada.

- *Ladera moderada, irregular y de pendiente abrupta (Dlmia):* estas laderas se encuentran en el escarpe de Cerro Astillero. Se caracterizan por ser superficies irregulares debido a la erosión a causa de las precipitaciones y las fuertes pendientes. Se observan movimientos de masa activos de tamaño considerable (figura 20).

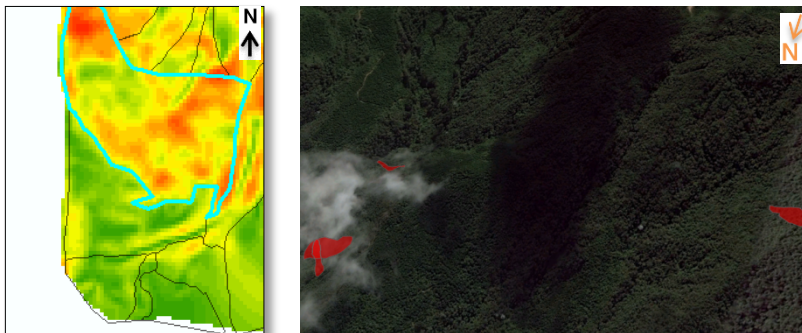


Figura 20. Ladera moderada, irregular y de pendiente abrupta.

- *Ladera larga, ondulada y de pendiente escarpada (Dlloe):* son superficies con pequeñas colinas (de longitudes <35m) y superficies convexas, originadas por la erosión de escorrentía y precipitaciones. Se observan diferentes movimientos de masa, principalmente flujos de lodo y/o escombros (figura 21).

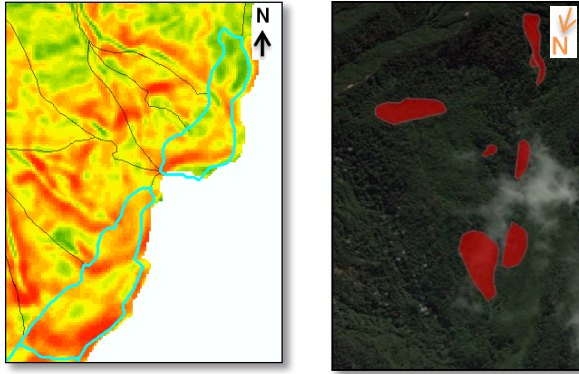


Figura 21. Ladera larga, convexa y de pendiente escarpada.

5.2 Altiplano colinado (Da)

Ubicado al suroeste (Da1) y al noreste de la zona (Da2), en la vereda el Penasco; reconocida por ser una superficie semiplana con pendientes suaves, limitada por el escarpe erosivo mencionado anteriormente. En la parte superior se identifican geoformas alomadas con pendientes suaves a moderadas, afectadas por proceso denudacionales, que se mencionaran a continuación (*figura 22*).



Figura 22. Localización de los Altiplanos identificados en la zona de estudio.
Tomado de Google Earth.

- *Ladera larga, irregular y de pendiente inclinada (DlIii):* se encuentran ubicadas al oeste del escarpe del cerro Astilleros, cerca al nacimiento de la Qda. El palo, aunque no está disectada por ninguna quebrada (*figura 23*).

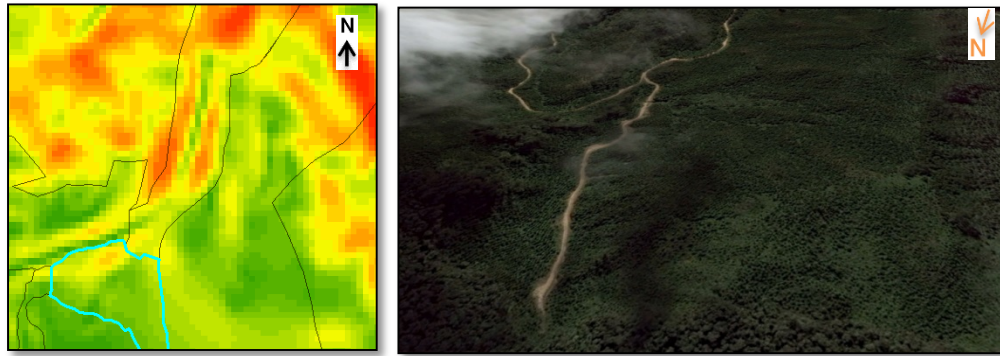


Figura 23. *Ladera larga, irregular y de pendiente inclinada*

- *Ladera larga, convexa y de pendiente inclinada (DIIci):* ubicadas en el flanco oeste del cerro astilleros en una de las colinas más pronunciadas de la zona del Altiplano. Caracterizada principalmente por tener una cobertura de cultivo y pastoreo, además de modificada por diferentes caminos en la zona (figura 24).

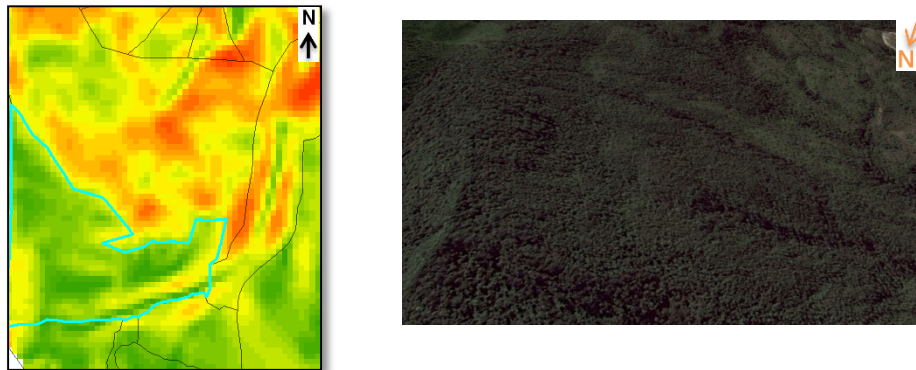


Figura 24. *Ladera larga, convexa, de pendiente inclinada.*

- *Ladera corta, irregular y de pendiente suave (DIIis):* Ubicada en la zona oeste del cerro Astilleros, es una de las partes con pendientes más suaves de la zona, poco colinada o alomada (figura 25).

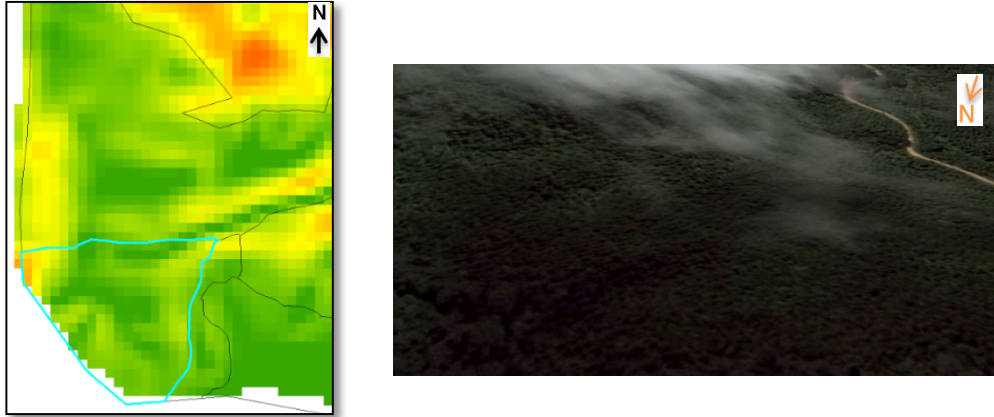


Figura 25. Ladera corta, irregular y de pendiente suave

- *Ladera corta, irregular y de pendiente inclinada (Dlcii):* se localiza en el flanco derecho de la subunidad mencionada anteriormente. Se caracteriza por tener una superficie irregular desarrollada por el exceso del pastoreo y la erosión fluvial de la zona (*figura 26*).

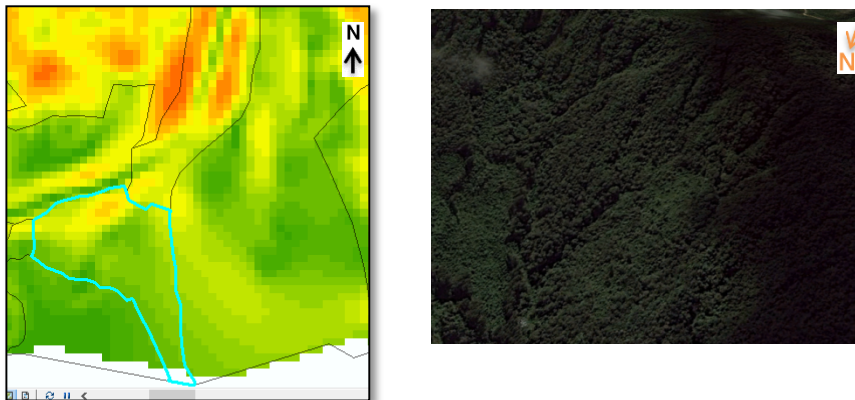


Figura 26. Ladera corta, irregular y de pendiente inclinada.

- *Ladera corta, convexa y de pendiente inclinada (Dlcci):* es una de las laderas del escarpe de donde tiene origen la Qda. El Palo, caracterizada por pequeñas protuberancias convexas con pendientes moderadas (*figura 27*).

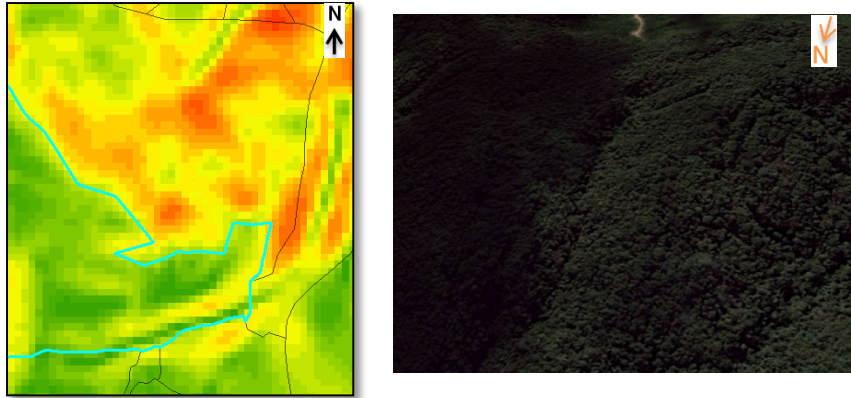


Figura 27. Ladera corta, convexa y de pendiente inclinada.

- *Cima (Dc): se localiza en el Altiplano al oeste de la zona de estudio, con pendientes muy suaves casi planas, limitada por el escarpe de erosión mayor (figura 28).*

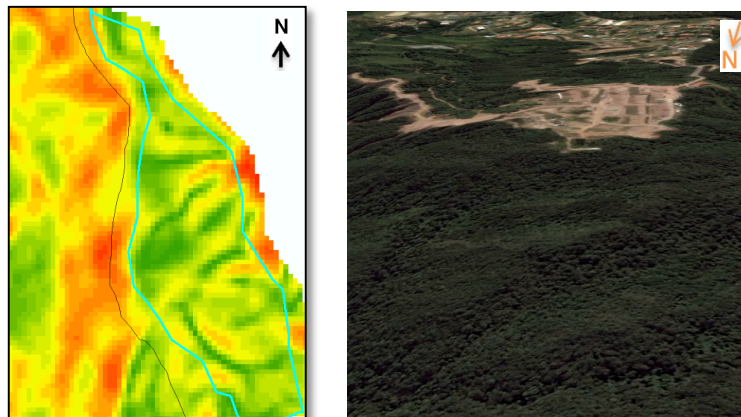


Figura 28. Cima del Altiplano de la zona este en la cuenca de La Ayurá.

5.3 Lomeríos residuales (Dires)

Se encuentran al suroeste de la quebrada El Palo y entre ésta quebrada y la Ayurá. Se identifican como geoformas alargadas y alomadas con dirección SN, con una elevación de 2405 msnm aproximadamente, con laderas cortas a moderadamente largas, cóncavas a irregulares, desarrolladas sobre rocas metamórficas muy meteorizadas (figura 29).

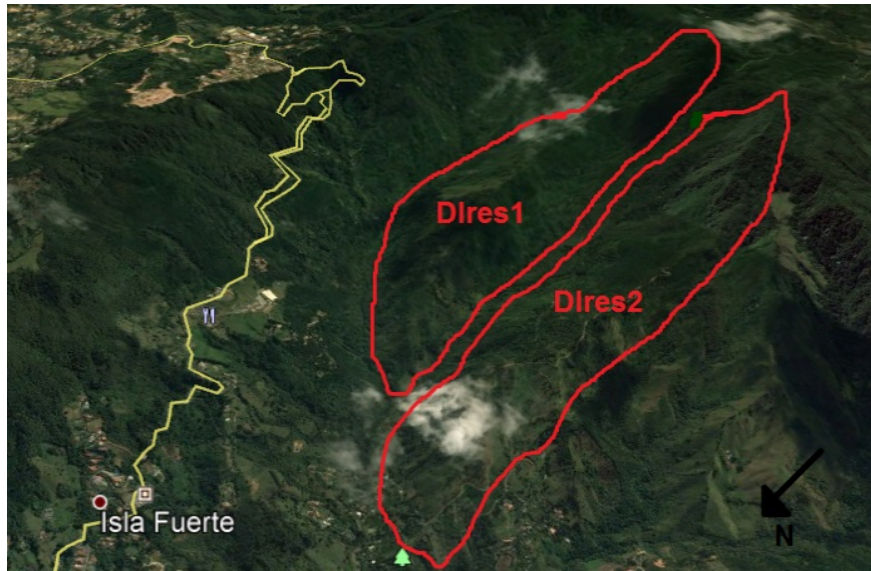


Figura 29. Localización de los Lomeríos Residuales identificados en la zona de estudio. Tomado de Google Earth.

- *Ladera corta, ondulada y de pendiente abrupta (Dlcoa):* se localizan principalmente en el lomerio que se desprende del flanco suroeste del Cerro Astilleros (figura 30).

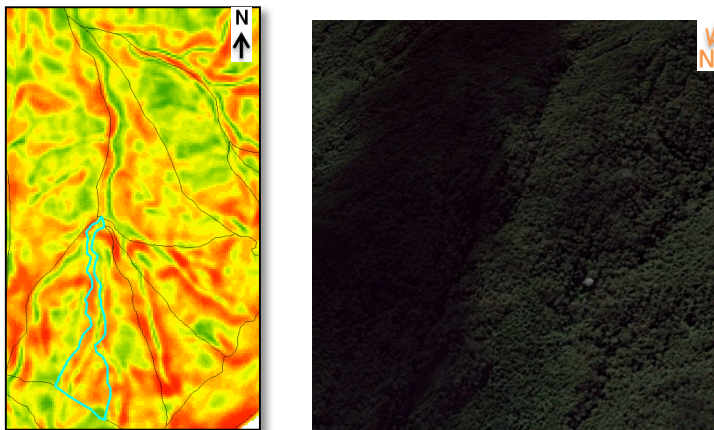


Figura 30. Ladera corta, ondulada y de pendiente abrupta.

- *Ladera larga, convexa y de pendiente abrupta (Dlca):* es la ladera ubicada en el margen izquierdo de la quebrada La Ayurá. Se caracteriza por ser una superficie convexa producto de la erosión y la escorrentía (figura 31).



Figura 31. Ladera larga, convexa y de pendiente abrupta.

- *Ladera larga, ondulada y de pendiente inclinada (Dlloi):* ubicada en el lomerio al oeste del nacimiento de la Qda. El Palo; identificada por tener ondulaciones debido a la erosión (*figura 32*).

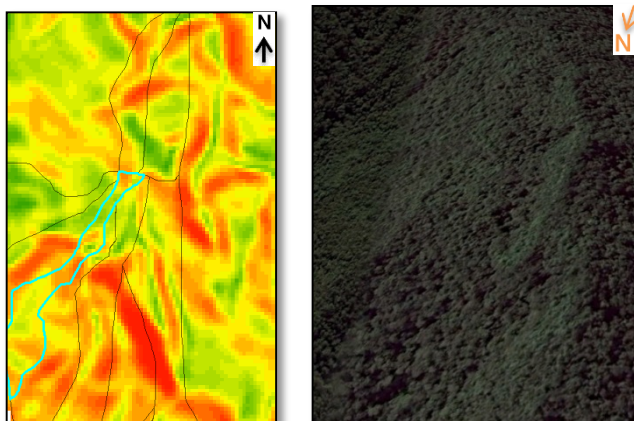


Figura 32. Ladera larga, ondulada y de pendiente inclinada.

- *Ladera larga, ondulada y de pendiente inclinada (Dlloi):* se localiza a margen izquierda de la Qda. El Palo, donde se empieza a encañonar este afluente. Caracterizada por pendientes suaves a moderadas, disectada por pequeños afluentes (*figura 33*).

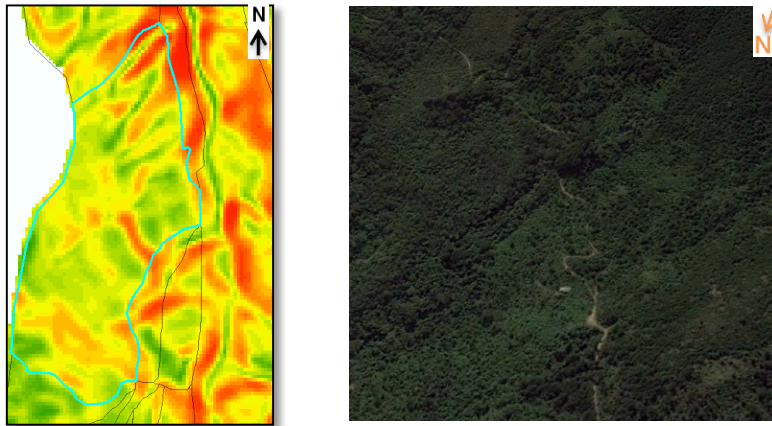


Figura 33. *Ladera larga, disectada, ondulada y de pendiente inclinada.*

- *Ladera corta, cóncava y de pendiente abrupta (Dlcca):* se encuentra en uno de los lomeríos a margen izquierda de la Qda. El Palo, con superficie cóncava debido a la erosión fluvial y de escorrentía; con pendientes fuertes a moderadas (*figura 34*).

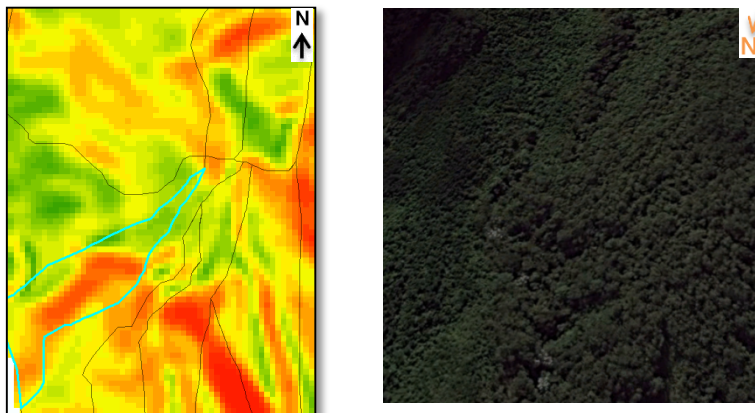


Figura 34. *Ladera corta, cóncava y de pendiente abrupta.*

4.4 Subunidades de Ambiente Aluvial

Este ambiente incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. En la zona de estudio estas geoformas están asociadas a los

depósitos de la Quebrada La Ayurá aguas abajo, después de la desembocadura de la Quebrada el Palo, con el material tiene mayor espacio de acomodación. Las subunidades asociadas se definen a continuación:

- *Planicie de inundación (Fpi)*: se identifican como una superficie con morfología plana, de pendientes suaves, ondulada y eventualmente inundable (SGC, 2013). Se localiza bordeando los cauces de las quebradas donde el valle es amplio y permite la acumulación de material transportado por la quebrada. En la Quebrada La Ayurá, se localizan principalmente de la desembocadura de la quebrada Verdun hasta el Parque Ecológico el Salado (foto 12).



Foto 12. Planicie de inundación en la desembocadura de la Qda. El Palo en la Qda. La Ayurá.

- *Terraza de acumulación (Fta)*: Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. (SGC, 2013). Geológicamente, son acumulaciones antiguas de material no consolidado, compuesto principalmente por bloques de roca de diferentes tamaños sumergidos en una matriz areno- arcillosa de color amarillo pardo; con una pendiente de 20% aproximadamente, y una longitud de 70 metros con una altura de 20 metros (foto 13).



Foto 13. Terraza de acumulación. Ubicada a margen izquierda de la quebrada El Palo.

4.5 Subunidades de Ambiente Antrópico

Las geformas de este ambiente son aquellas que han tenido intervención antrópica y que cambien el paisaje natural con diferentes características que las diferencian entre sí como:

- *Superficies de explanación (Asp)*: son superficies que han sido transformadas en superficies planas en laderas de roca o material no consolidado con el fin de adecuar terrenos para la construcción o para la estabilización de laderas. Están localizados al norte de la zona de estudio, donde se encuentran la sede de zootecnia de la universidad CES, y otros predios privados (figura 35).



Figura 35. Localización de una de las superficies de explanación. Sede de zootecnia de la universidad CES.

6. MORFODINAMICA DE LA QUEBRADA LA AYURÁ

Para la caracterización de los movimientos de masa identificados en el tramo Cerro Astilleros- Parque Ecológico El Salado se utilizaron ortofotos y fotografías aéreas desde el año 1993 hasta 2014, inventario de procesos vistos en campo (tomado y modificado de la Guía Metodológica para estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos de masa del SGC, 2015) y de las variables morfométricas (geología, geomorfología, pendientes, rugosidad, aspecto, curvatura, cobertura, relieve relativo, distancia de fallas y distancia de drenajes) calculadas y obtenidas en el software ArcGis; con lo cual se delimitaron todos los procesos morfodinámicos. Toda las variables se analizaron, unas con respecto a otras, con el fin de identificar las zonas con mayor presencia de movimientos, y posteriormente cuales zonas eran las más susceptibles ante la ocurrencia de estos procesos.

La zona de interés estudiada presenta características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas que son susceptibles ante la ocurrencia de movimientos de masa, por lo que los principales procesos son generados principalmente por detonantes naturales como las fuertes precipitaciones, acompañado de las altas pendientes y en algunos casos más puntuales de pastoreo. Pero también es importante mencionar que en el área del cerro Astilleros hay intervenciones antrópicas; como el acondicionamiento de caminos para cuatrimotos que incluyen un grado significativo de desforestación, remoción y desestabilización de suelos que contribuyen al origen de procesos morfodinámicos.

Los movimientos de masa se localizan en las zonas con pendientes fuertes y moderadas, principalmente en los escarpes y en las laderas de los lomeríos residuales, teniendo como resultados una mayor densidad de procesos en la zona central del proyecto, siendo los más recurrentes movimientos tipo flujo de lodo y/o escombros y movimientos rotacionales y se tomaron en cuenta los procesos mayores a 20 metros de longitud (*figura 36*).

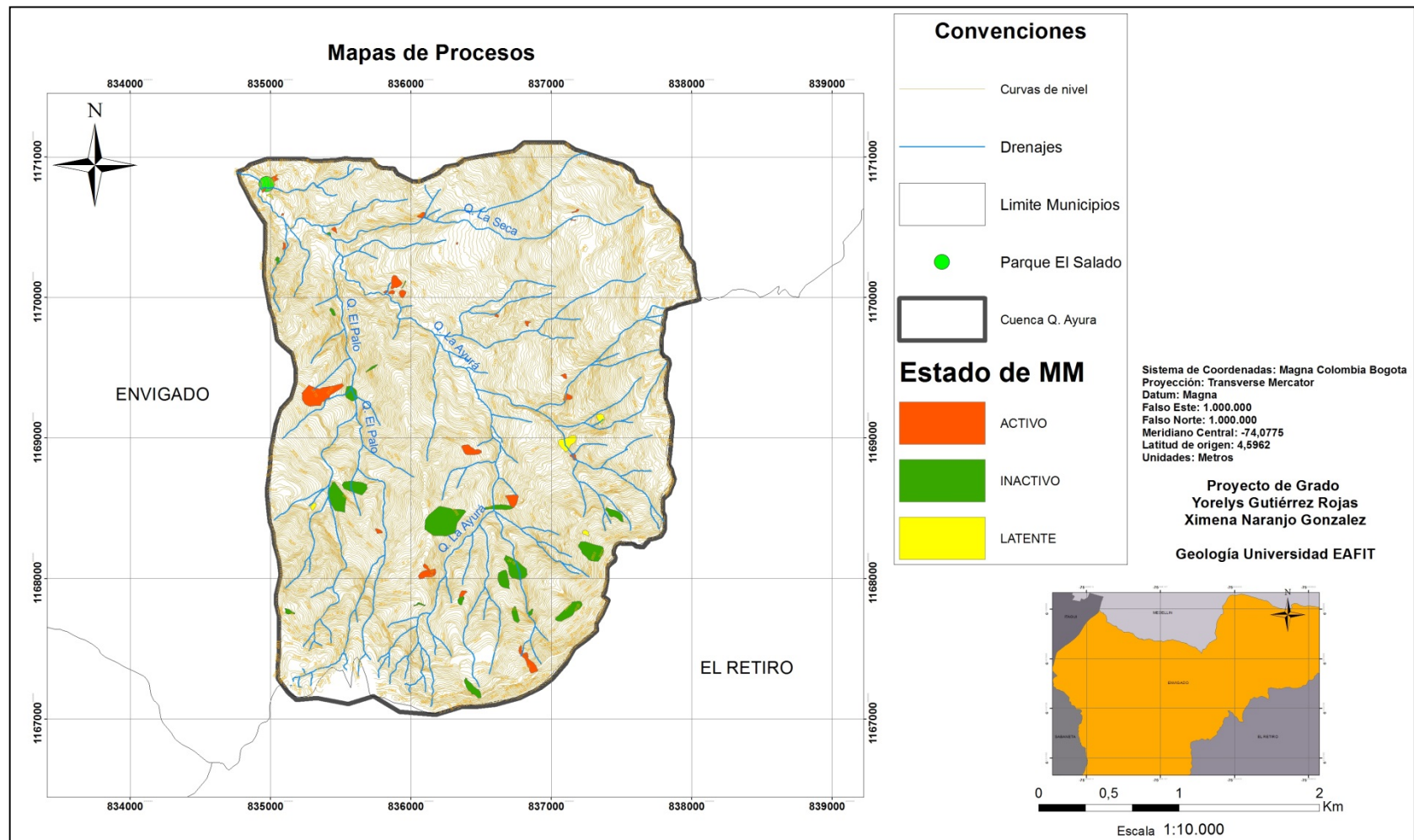


Figura 36. Mapa de movimientos de masa en la zona de estudio. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

6.1 Deslizamientos Rotacionales

Los movimientos rotacionales son los más comunes en esta zona, donde la superficie de ruptura es cóncava y el material se desplaza rotacionalmente con respecto al eje paralelo a la superficie y transversalmente al deslizamiento, formándose de esa manera una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan, de forma diferente, en la cabeza y en el pie del deslizamiento (Suarez, 2007) (figura37).

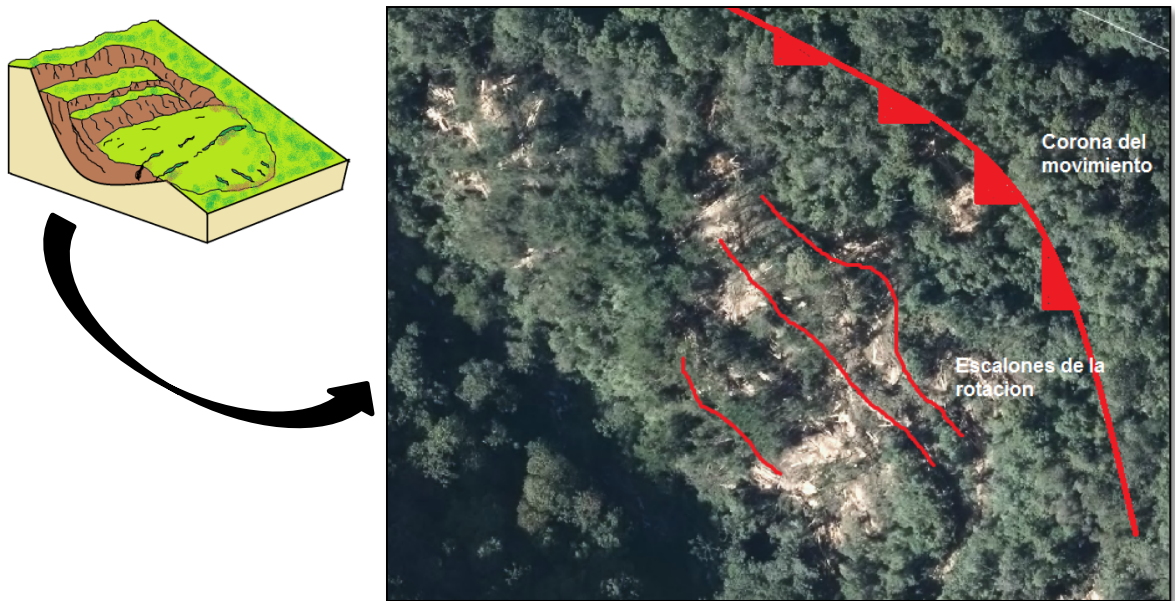


Figura 37. Deslizamiento rotacional Ubicado en el escarpe que se encuentra al este de la zona de estudio, cerca de la Qda. La Cachona.

Estos procesos están distribuidos en toda la zona de estudio, principalmente en las unidades de Migmatitas de Puente Peláez y los Esquistos de Cajamarca, caracterizados por encontrarse en las laderas de los escarpes de erosión mayor, con un alto grado de meteorización tanto física como química, que conforman suelos amarillos a tonalidades rojas, asociados a los grados de meteorización VI, V, IV Y III; descritos por Dearman en 1974.

En la *foto 14*, se observa un perfil de suelo típico asociados a los Esquistos de Cajamarca, donde se pueden diferenciar los grados de meteorización, que a lo largo de los recorridos de campo se lograron medir suelos de hasta seis metros.



Foto 14. Perfil de suelo típico en movimientos rotacionales asociados a los Esquistos de Cajamarca. Ubicado en la Qda. La Ayurá.

Se ubicaron 26 deslizamientos rotacionales en la zona de estudio, mayores a 20 metros de longitud; asociados a laderas de pendientes abruptas a escarpadas, generalmente con longitudes largas y onduladas producto de la erosión por incisión de quebradas o arroyuelos y altas precipitaciones.

En la *foto 15*, se observa un perfil de suelo desarrollado en parte de un movimiento rotacional sobre la unidad de Migmatitas de Puente Peláez, en el cual se observan espesores de hasta 10 metros de altura y hasta 40 metros de longitud. Se observan horizontes de meteorización asociados a los grados IV, V, IV Y III.

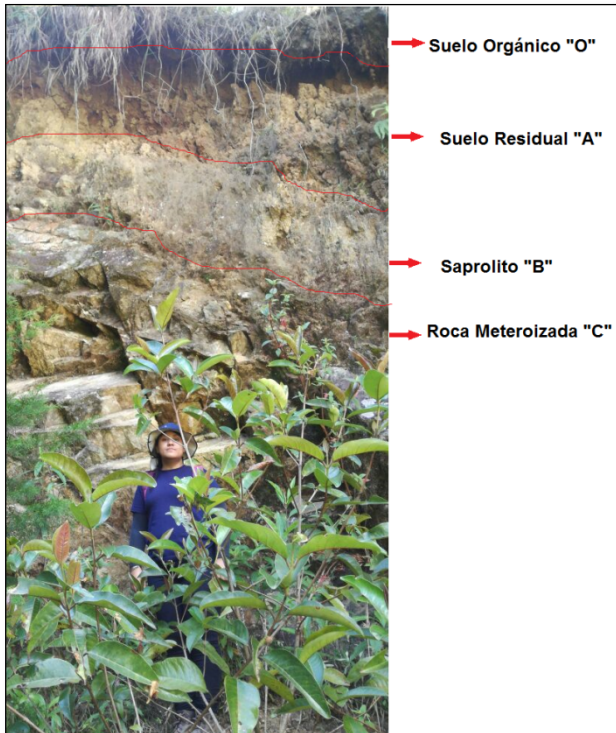


Foto 15. Perfil de suelo desarrollado por Migmatitas de Puente Peláez, ubicada en la margen izquierda de la Quebrada El Palo.

6.2 Deslizamientos traslacionales

Estos deslizamientos consisten en un desplazamiento de una o varias superficies a lo largo de una superficie de falla de manera gradual (Suarez, 2007).

En la zona de estudio estos deslizamientos se encuentran a menor escala, de longitudes menores a 20 metros en la parte central y sur, como también en la vía que conduce del parque ecológico el salado a las trucheras.

Estos movimientos de masa se encuentran relacionados a perfiles de suelo altamente meteorizados de colores amarillos a rojizos, y principalmente a depósitos aluviales no consolidados, (Foto 16), por lo que al identificar los horizontes presentes en este tipo de movimientos están asociados a los grados de meteorización IV, V y raramente IV; por ende, se pueden determinar suelo orgánico (menores a 50cm), suelo residual de gran espesor (de 5 a 10 metros aproximadamente) y saprolito, en la que no se logran identificar las texturas de la roca madre (de 2 a 5 metros de espesor).

Están asociados directamente a laderas cortas y onduladas, geológicamente relacionadas a Migmatitas de Puente Peláez y depósitos aluviales (foto 17).



Foto 16. Deslizamiento Traslacional ubicado en la Quebrada El Palo.



Foto 17. Deslizamiento Traslacional ubicado en la vía que conduce del parque Ecológico El Salado hasta las trucheras, a margen derecha de la Qda. La Ayurá.

6.3 Flujos

En un flujo ocurren movimientos de partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie, que por gravedad fluyen en forma similar a un líquido viscoso. (Suarez, 2007).

En la cuenca de la Quebrada La Ayurá, se presentan gran cantidad de flujos, asociados principalmente a laderas con pendientes fuertes, por las cuales fluyen

gran cantidad de agua escorrentía que socava y desestabiliza el terreno. En algunos casos se originan desde la aparición de movimientos traslacionales (*foto 18*).

Estos movimientos tienen la característica de presentar surcos y cárcavas de extensión y profundidad significativas (mayores a 50m) a ambos lados del movimiento, donde las quebradas de la zona de estudio llegan a aumentar su caudal originando así avenidas torrenciales que son devastadoras aguas abajo en la comunidad del Municipio de Envigado.

Estos movimientos en masa esta asociados a los suelos residuales desarrollados principalmente por las Migmatitas de Puente Peláez y a los Esquistos de Cajamarca, presentando una coloración rojiza, ubicados en las laderas de pendiente abrupta y cóncavas, por las cuales fluye el material ladera abajo hasta llegar a áreas con inclinación suave o plana.

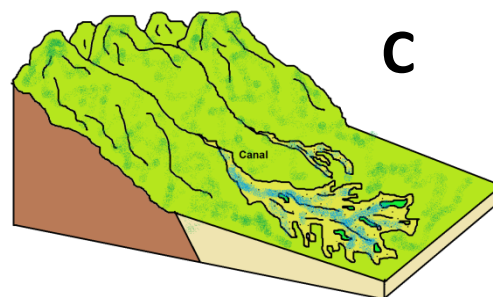
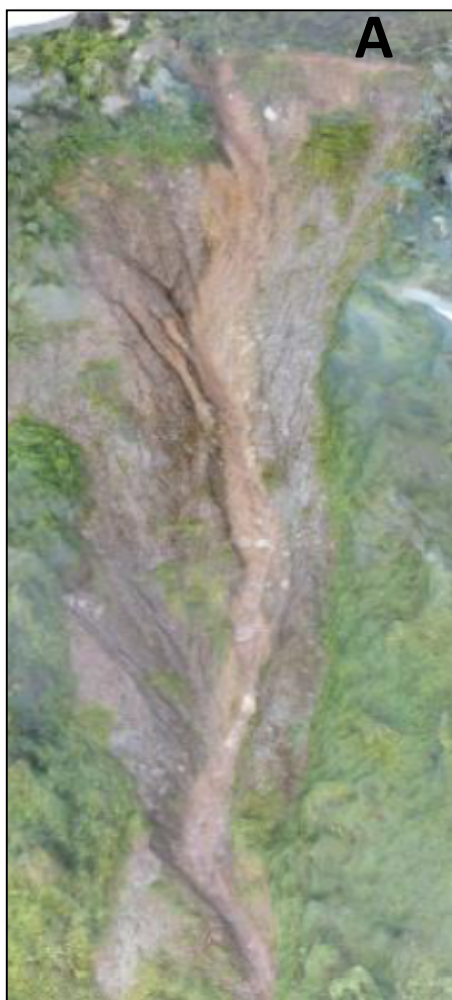


Foto 18. Flujo de lodo y escombros activo. Ubicado en el Cerro Astilleros. A. Movimiento Tomado por Drone. B Corona del Movimiento en masa. C Diagrama del comportamiento de un flujo.

7. VARIABLE PARA LA ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD

7.1 Pendientes

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90° o en porcentaje, se relaciona con los movimientos en masa (debido a que estos constituyen un fenómeno de tipo gravitacional), de manera que a mayor el grado de pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013). Para la elaboración de este mapa temático se utilizó el DEM de la zona, y mediante la función “Slope” se obtuvo el mapa temático que posteriormente fue reclasificado en 6 intervalos siguiendo la propuesta de SGC, 2013

Para la zona de estudio en el Municipio de Envigado, esta variable muestra principalmente una distribución de pendientes escarpadas (>50%) distribuidas en un 5,74 % del área de estudio, pendientes abruptas (25-50%) con un 55,60% de área total de la zona de estudio, inclinadas (10-25%) representando un 35,52% de área total,; y finalmente pendientes suaves (0-10%) contando con un 3,11% del área total (*tabla 3*).

Rangos	%Pendientes	Área (ha)	% Área
Suave	0-10	32,64	3,11
Inclinada	10-25	364,86	35,52
Abrupta	25-50	571,00	55,59
Escarpada	>50	59,02	5,74

Tabla 3. Distribución de la variable de pendientes para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.

De acuerdo al mapa obtenido de pendientes *figura 38*, se puede observar que las pendientes planas (0-3%), no es muy representativa en comparación con los demás rangos, debido a que esta representa un 0,138% del área total. Se encuentra principalmente en la llanura de inundación de la Quebrada La Ayurá, en el margen izquierda de la vía El Escobero y al sur de la vereda el Vallano.

Las pendientes suaves (0-10%) representa un 3,11% del municipio, la cual se encuentra localizadas sobre ambas márgenes de la quebrada La Ayurá, de igual manera se encuentran ubicados en los depósitos de La Ayurá, sin ningún tipo de movimiento en masa asociado. Por otra parte, las pendientes inclinadas (10-25%) representan el 35,52%, asociadas a los deslizamientos rotacionales distribuidos principalmente en la zona central del estudio. Las pendientes abruptas (25-50%) comprende un 55,59% de la zona de estudio, y finalmente las pendientes escarpadas (>50%) se encuentran muy distribuidos, correspondiendo al 5,74% de la zona, mostrando una asociación morfodinamica con todos los tipos de movimientos mencionados (flujo, rotacionales, y traslacionales).

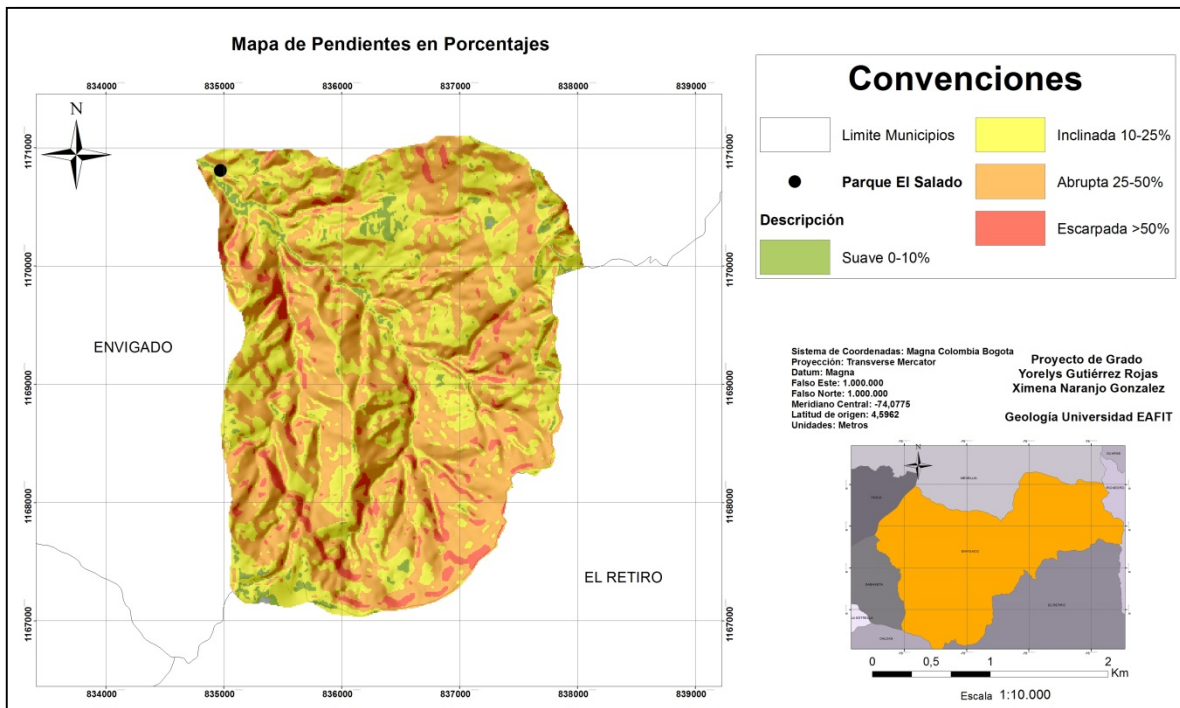


Figura 38. Mapa de pendientes de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

7.2 Curvatura

Indica el grado de Convexidad/concavidad espacial de cada celda del terreno (en su centro); se calcula a partir del modelo de elevación digital del terreno para cada una de las celdas en un cuadro de 10x10 celdas. Matemáticamente asociado a las derivadas de segundo grado de la altitud, las cuales brindan información en términos de cambios positivos o negativos con respecto a las celdas adyacentes, lo que se interpreta en tendencias hacia la concavidad o convexidad de la superficie (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015).

Esta variable se relaciona con los deslizamientos en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda, y se puede esperar un aumento en la presión de agua en los poros, igualmente, es de esperarse una mayor acumulación de formación superficial, mientras que en las celdas convexas ocurre lo contrario: el flujo se dispersa y el espesor de formación superficial debería ser menor (Londoño, 2006). Para realizar este mapa fue necesario el Modelo de Elevación Digital (DEM), con el cual se utilizó función “Curvature” en la herramienta ArcGis, para posteriormente clasificar la curvatura de la zona de estudio en 5 intervalos, y así poder interpretar superficies con susceptibilidades altas, medias y bajas asociadas a los procesos morfodinámicos presentes en cada subunidad geomorfológica descrita (*tabla 4*).

Rangos	%Pendientes	Área (ha)	% Área
Muy convexo	<-1,8	18,33	1,78
Convexo	-1,8-0,001	508,49	49,51
Plano	-0,001-0,001	1,09	0,10
Cóncavo	0,001-1,8	466,52	45,42
Muy cóncavo	>1,8	32,53	3,16

Tabla 4. Distribución del atributo Curvatura para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.

El mapa de curvatura para cuenca de la quebrada La Ayurá, tiene una distribución de zonas cóncavas que corresponden a un porcentaje de 48,59%, asociadas a los flujos de los y/o escombros. Las zonas convexas con un 51,29% del área total relacionadas a deslizamientos rotacionales, determinando que las zonas planas son minorías en la zona de estudio, correspondientes a un 0,10% del área total, ubicadas principalmente en los cauces de las quebradas y llanuras de inundación de la cuenca de la Quebrada La Ayurá (figura39).

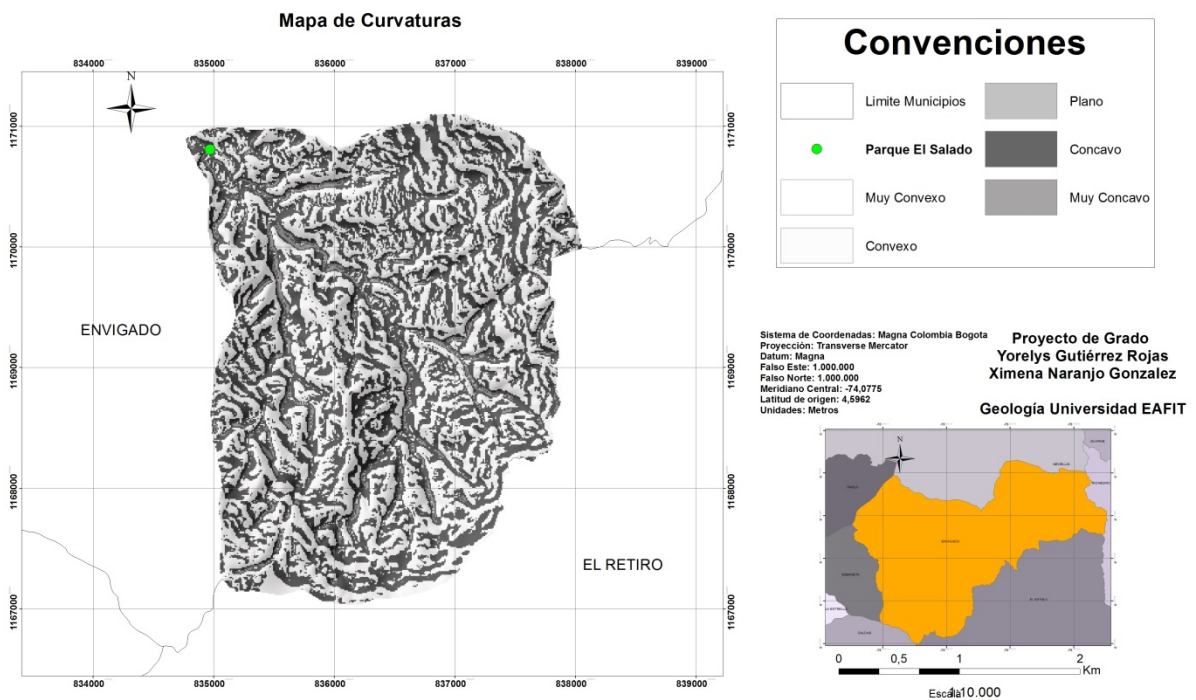


Figura 39. Mapa de curvatura de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

7.3 Rugosidad

La rugosidad del terreno se define como la variación de la pendiente en un área y representa la desviación del vector normal a la superficie en cada celda. El valor 1 corresponde a rugosidad nula y los valores se hacen menores al aumentar la dispersión de los vectores (alta rugosidad). La rugosidad define las formas como límites de taludes y laderas, tanto en los valles como en las crestas. Se relaciona

con los movimientos en masa de manera que las laderas de rugosidad alta son más propensas a presentar movimientos en masa, debido a que los cambios sucesivos de pendientes favorecen una mayor filtración del agua en el terreno y por ende, aumenta la inestabilidad del mismo (SGC, 2013).

En la *tabla 5* se presenta la descripción para cada uno de los rangos utilizados en la reclasificación del mapa de rugosidad y en la *figura 38* el mapa de dicha variable.

Rangos	%Pendientes	Área (ha)	% Área
Rugosidad Muy alta	0-0,02	986,61	96,06
Rugosidad Alta	0,02-0,04	34,72	3,38
Rugosidad Media	0,04-0,06	5,03	0,48
Rugosidad Baja	0,06-0,08	0,63	0,06
Rugosidad Muy Baja o Nula	0,08-0,11	0,1	0

Tabla 5. Distribución de la variable rugosidad para la zona de estudio, Municipio de Envigado.

La rugosidad para la zona de estudio está distribuida de manera homogénea; las zonas con rugosidad muy alta predominante abarcan el 96,06% del área total, y se encuentra a lo largo de la cuenca de la Quebrada La Ayurá, siendo esta donde se presentan la mayor cantidad de deslizamientos rotacionales, traslacionales y flujos de lodos y/o escombros. Mientras las zonas de rugosidad alta, representan un 3,38% del área de la cuenca, las zonas de rugosidad baja y muy baja representan el 0,06% del área total, y su distribución se concentra hacia el suroeste y noroeste de la zona. Teniendo como resultado, que la mayor parte de la zona de estudio, presenta una rugosidad muy alta, lo que conlleva a que más del 99% del área de la zona es susceptible ante la ocurrencia de movimientos en masa (*figura 40*).

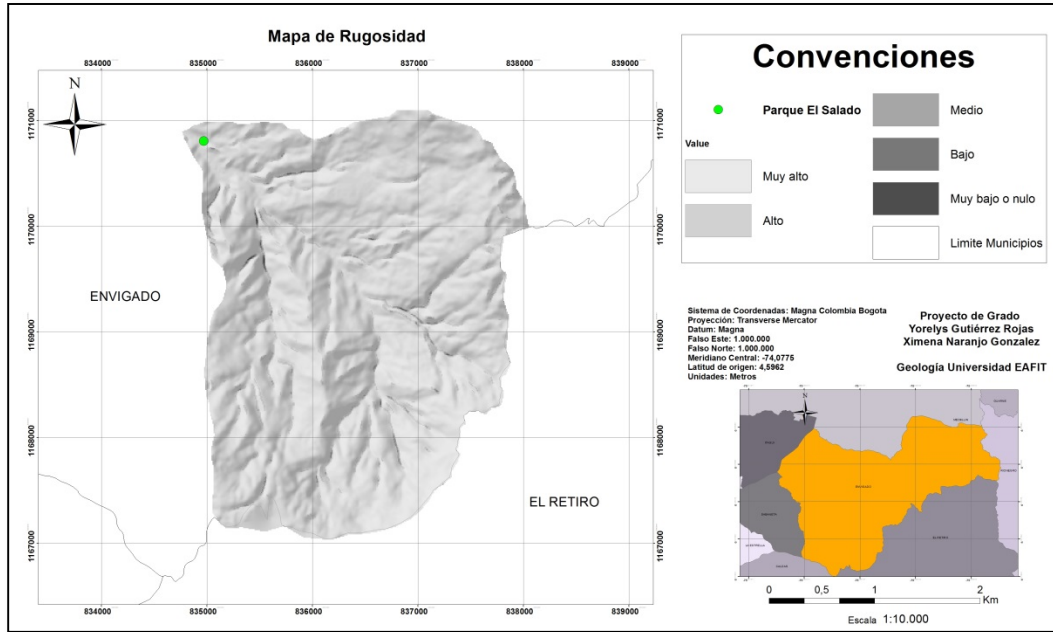


Figura 40. Mapa de rugosidad de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

7.4 Relieve relativo

El relieve relativo representa la diferencia de altitud de la geoforma, independientemente de su altura absoluta o nivel del mar. Ella se mide por la diferencia de alturas entre la parte más baja y alta, llámese colina, montaña, meseta, terraza y otros. Se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor en una unidad determinada de superficie, cuya máxima diferencia se expresa en metros. Esta diferencia de altura se presenta con relación a un nivel base del terreno, midiendo su variación indiferente de su altura con respecto al nivel del mar. Esta variable está directamente relacionada con la resistencia de los materiales a nivel superficial, asociados a la recurrencia de eventos de inestabilidad en materiales más erosionados o en aquellos que por su resistencia desarrollan un relieve con intervalos de altura extremadamente altos y pendientes escarpadas y abruptas (CORANTIOQUIA-EAFIT, 2015).

De acuerdo al mapa de relieve de relativo las zonas que presentan menor diferencia de alturas con rangos de 0 a 50 m, están ubicadas sobre la quebrada La Ayurá, al norte, con un porcentaje de área igual a 0,22%. Las zonas con rangos bajos (50 a 100m) y medio-bajos (100 a 150 m), con áreas de 4,63% y 32,73% respectivamente, siendo estas las de igual distribución en el Municipio, se

localizan alternadas al norte, desde el Parque Ecológico el Salado hasta el Cerro Astilleros; y hacia el suroeste hasta la confluencia de la quebrada El Palo (*figura 41*).

Los rangos Medio (150 a 200 m) y Medio Alto (200 a 250 m) con un porcentaje de 46,34 y 14,83 % respectivamente; siendo esta las de mayor distribución al suroeste por la quebrada El Palo en la vereda el Vallano y hacia el este de la quebrada La Ayurá. Los rangos Altos (250 a 300 m) y Muy Altos (>300 m) con áreas 1,19 y 0,03% respectivamente, se localizan al sur y al noreste pero con más representaciones la parte suroeste del municipio en Envigado (*tabla 6*).

Rangos	Rangos(m)	Área (ha)	% Área
Muy bajo	0-50	2,30	0,22
Bajo	50-100	47,57	4,63
Medio Bajo	100-150	336,23	32,73
Medio	150-200	475,95	46,34
Medio alto	200-250	152,37	14,83
Alto	250-300	12,27	1,194
Muy alto	>300	0,34	0,03

Tabla 6. Distribución del variable relieve relativo para la zona de estudio en el Municipio de Envigado.

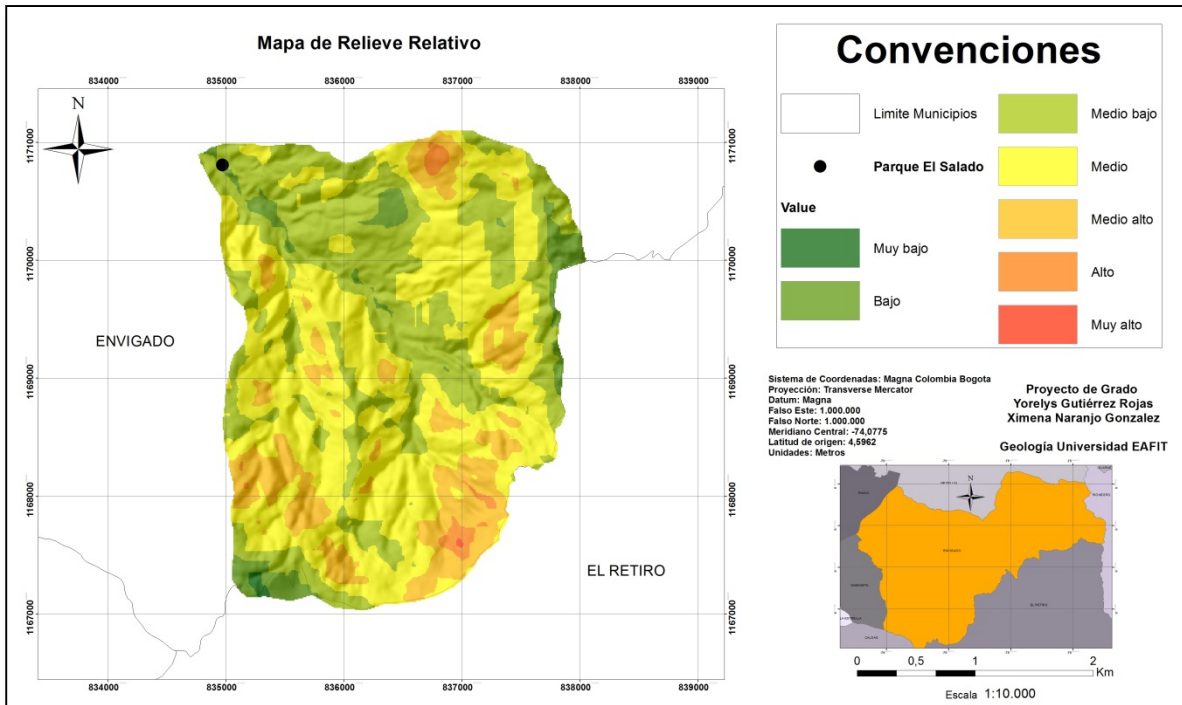


Figura 41. Mapa de relieve relativo de la zona de estudio en el Municipio de Envigado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

7.5 Distancia fallas

Los lineamientos y las fallas son un factor importante en la generación de movimientos en masa, ya que, en las cercanías de los trazos de las mismas, la densidad de diaclasamiento es más alta y a su vez son un factor importante en las inestabilidades de los suelos, debido a que la meteorización es más intensa por la penetración del agua a través de las fracturas. Finalmente el movimiento de las fallas juega un papel importante, haciendo más propensas las laderas y taludes a presentar inestabilidad (*figura 42*).

El mapa de distancia Fallas para la quebrada La Ayurá muestra un predominio de las zonas distantes con un porcentaje de 44,91% y muy distantes con un 27,60% estas se encuentran predominantes en la zona de estudio respetivamente. Estas zonas se encuentran distribuidas de manera general a lo largo de toda la zona de estudio. Los rango de muy cerca (5,47%) y cerca (6,16%) corresponden las áreas de menor afectación en el área de estudio (*tabla 7*).

Rangos	Rangos(m)	Área (ha)	% Área
Muy cerca	0-20	56,21	5,47
Cerca	20-40	63,28	6,16
Moderadamente cerca	40-100	162,81	15,85
Distante	100-350	461,24	44,91
Muy distante	>350	283,49	27,60

Tabla 7. Distribución del variable de distancia de fallas para la zona de estudio.

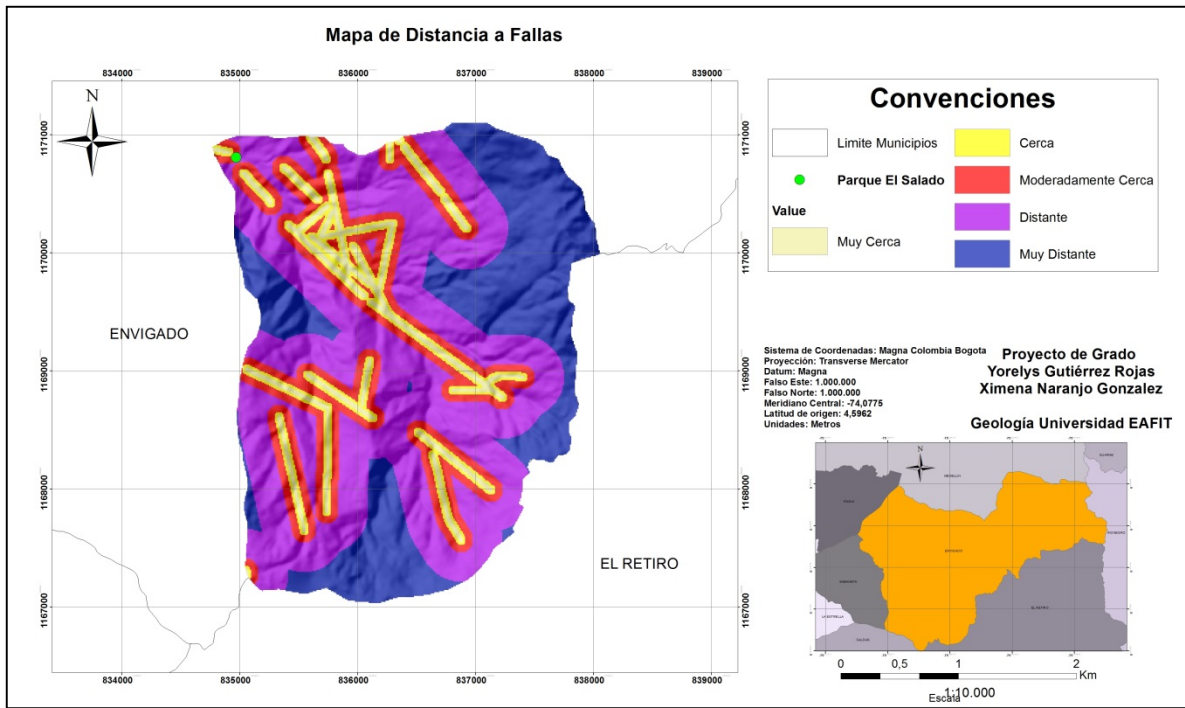


Figura 42. Mapa de distancia a Fallas de la zona de estudio en el Municipio de Envigado, Antioquia.

7.6 Distancia drenajes

Los cauces de las quebradas y ríos, combinados con otros factores morfo-métricos son un factor determinante en la generación de deslizamientos, debido a la humedad superficial relativa del suelo es más alta en cercanías del cauce y por esto los suelos y rocas se ven más propensos a presentar inestabilidad (*figura 43*).

El mapa de distancia de drenajes para la zona de estudio se ubica distribuido de manera homogénea. Las zonas más representativas con las muy cercanas a los cauces debido a sus afectaciones predominante en un 25,83% del total del área y se encuentra a los largo de toda la zona de estudio. Las zonas de afectación media y moderadas con las de rango de cerca con (17,41%) y moderadamente cerca con (30,01%) Finalmente Las zonas de menor afectación son las zonas más distantes con un 1,39% y su distribución se concentra hacia el noreste respectivamente (*tabla 8*).

Rangos	Rangos(m)	Área (ha)	% Área
Muy Cerca	0-25	265,29	25,83
Cerca	25-50	178,88	17,41
Moderadamente cerca	50-100	308,26	30,01
Distante	100-250	260,21	25,33
Muy distante	>300	14,35	1,39

Tabla 8. Distribución de la variable de distancia de drenajes en la zona de estudio.

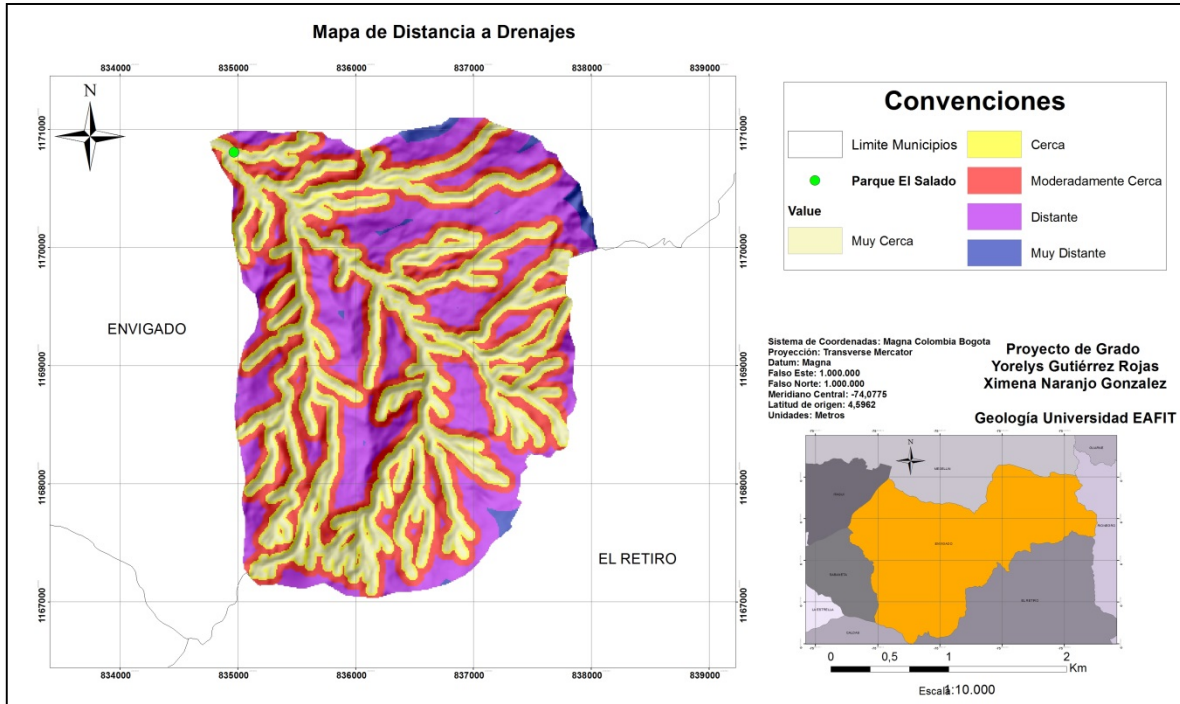


Figura 43. Mapa de distancia a drenajes de la zona de estudio en el Municipio de Envigado, Antioquia.

7.7 Cobertura

La cobertura del suelo está relacionada a la resistencia del suelo dada por las raíces y la regulación de escorrentía (Regmi et al., 2010). Esta variable es de vital importancia, ya que esta puede ayudar o propiciar la ocurrencia de deslizamientos y depende del tipo de vegetación y uso del suelo. La cobertura de la tierra es un resultado de la interacción de la dinámica natural geológica, geomorfológica, los suelos, el clima y sistemas de comunidades bióticas, interrumpida por el hombre para su supervivencia y desarrollo. Dicha interrupción genera o contribuye a la aparición de diferentes procesos como cambios en el patrón de ciclos hidrológicos, cambios en las formas del relieve (en gran número de casos en forma negativa produciendo movimientos en masa, flujos, avalanchas, erosión), afectación en la evolución de las especies, deterioro de ecosistemas, entre otros. Esta relación e interdependencia de los recursos evaluados (incluyendo la cobertura y uso del suelo), sirven para estimar la susceptibilidad por movimientos en masa, en cuya expresión se manifieste el efecto del hombre (SGC, 2013)(figura 44) (tabla 9).

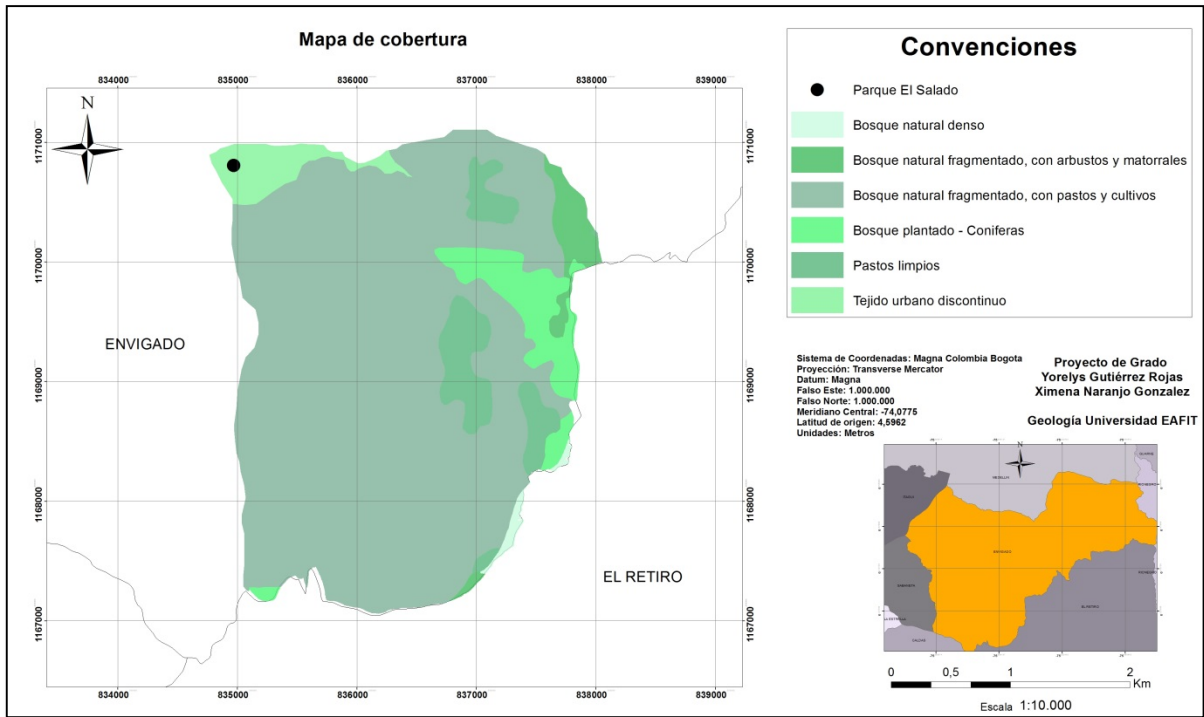


Figura 44. Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio, Municipio de Envigado, Antioquia.

Cobertura	Área (ha)	% Área
Bosque natural denso	6,172643	0,60
Bosque natural fragmentado con arbustos y matorrales	28,212209	2,74
Bosque natural fragmentado con pastos y cultivos	808,745143	78,74
Bosque plantado- coníferas	64,555111	6,28
Pastos limpios	66,525104	6,47
Tejidos urbanos discontinuo	36,656833	3,56

Tabla 9. Distribución de la cobertura vegetal en la zona de estudio.

Bosque natural denso: Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de

copas (dosel) más o menos continuo, con altura superior a 5 metros. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IDEAM, 2010). Esta es la cobertura que tiene menor extensión en el Municipio, comprende 6,172643 ha, que corresponden al 0,60% del área total y se localiza al sureste de la quebrada La Ayurá.

Bosque natural fragmentado con arbustos y matorrales: Corresponde a las coberturas constituidas por vegetación natural de porte bajo, con un dosel irregular en donde predominan los elementos arbustivos, pero que puede presentar elementos arbóreos dispersos. Esta vegetación puede ser producto de las condiciones naturales o de la acción antrópica. Un arbusto es una planta perenne, con una altura entre 0.5 y 5 m y sin una copa definida (IDEAM, 2010). Esta cobertura tiene una extensión de 28,212209 hectáreas y se encuentran ubicados al este de la zona de estudio y comprenden alrededor del 2,74% de la superficie total del municipio.

Bosque natural fragmentado con pastos y cultivos: Comprende las tierras ocupadas por pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño (inferior a 25 ha) y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual (IDEAM, 2010). Comprende una extensión de 808,745143ha, corresponde al 78,74% se encuentra dispersa en total la zona, además predomina en el municipio de envigado.

Bosque plantado: Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante la plantación y/o la siembra durante el proceso de forestación o reforestación, para la producción de madera o bienes no madereros (IDEAM, 2010). Esta cobertura ocupa una extensión 64,555111 ha, que comprende un 6,28% del área de estudio ubicada al este de la zona de estudio.

Pastos limpios: Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70%; la realización de prácticas de manejo (limpieza, enclamiento y/o fertilización, etc.) y el nivel tecnológico utilizados impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas (IDEAM, 2010). Esta cobertura ocupa una extensión de 66,525104ha, comprende el 6,47% del total del área de estudio y se encuentra localizada en sureste del municipio.

Tejidos urbanos discontinuo: Son espacios conformados por conjuntos de edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida

cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación (IDEAM, 2010). Esta cobertura tiene una extensión de 36,656833 ha, que corresponden al 3,56% del municipio; esta categoría se encuentra localizada al Noreste de la zona de estudio

8. SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA

8.1 Método geomorfológico directo

Es un método basado en la cartografía geomorfológica, a partir de la cual los expertos identifican y localizan los deslizamientos y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Con las observaciones, el experto, extrae unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestable y para la elaboración del mapa de susceptibilidad final. La elaboración de este mapa exige conocer la morfología y tipología de movimientos. (Santacanas, 2001) (figura 45).

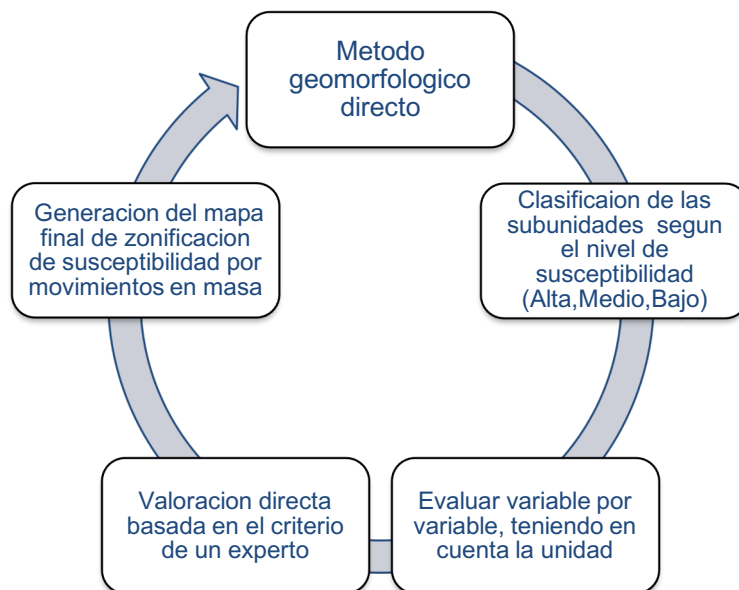


Figura 45. Metodología empleada en el método geomorfológico directo.

Para el uso de este método, se tomó como información de partida el inventario de movimientos en masa e información adicional obtenida de la fotointerpretación, análisis e interpretación de ortofotos, trabajo de campo y revisión de los antecedentes del área de estudio.

Según el criterio de los dos expertos, cada variable definida para este método, se calificó en tres clases: susceptibilidad alta, media y baja; teniendo en cuenta las subunidades geomorfológicas distribuidas en la zona de estudio y el área afectada respecto al inventario de movimientos en masa (figura 46 y tabla 10).

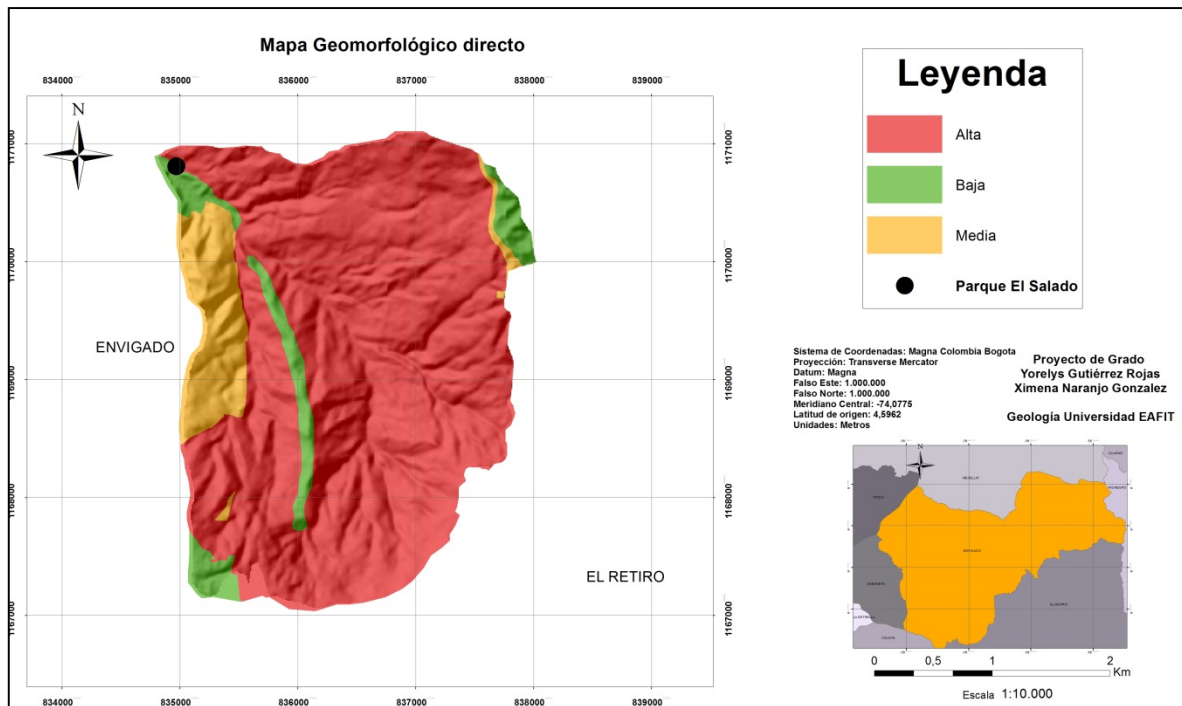


Figura 46 Mapa geomorfológico directo. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

SUSCEPTIBILIDAD	AREA (Ha)	% DE AREA TOTAL	PENDIENTES	GEOMORFOLOGIA	GEOLOGIA	COBERTURA
Alta	896	87,20	Moderada-abrupta	Lomeríos residuales, escarpes de erosión mayor y superficies de explanación.	Esquistos Cuarzosericíticos de Cajamarca y Migmatitas de Puente Peláez	Bosques fragmentados con pastos limpios y cultivos; y los bosques naturales fragmentados con arbustos y matorrales.
Media	94,10	9,15	Moderadas-fuertes	Lomeríos residuales	Esquistos de Cajamarca	Bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos
Baja	68,8	6,69	planas-suaves	Valle estrecho de la Qda. El Palo, terrazas de acumulación y Altiplanos.	Depósitos de vertiente y Migmatitas de Puente Peláez	Bosques plantados-coníferas y tejido urbano discontinuo.

Tabla 10. Descripción de susceptibilidad para el mapa geomorfológico directo.

8.2 Método Jerárquico

Llamado también método Heurístico, se encarga de categorizar y ponderar los factores causantes de la inestabilidad según la influencia esperada de éstos en la generación de movimientos en masa. Es un método conocido como indirecto, su resultado se puede extrapolar a zonas sin deslizamientos con una combinación de factores similares. Un procedimiento de este tipo es el análisis cualitativo, basado en combinaciones de mapas de factores. Cada uno de estos factores forma un mapa que se combina con los demás para la obtención del mapa final de zonificación de susceptibilidad. El inconveniente de este método, recae en la ponderación exacta de los distintos factores, dado que a menudo se basa en un conocimiento insuficiente en el campo de factores importantes para definir la susceptibilidad. (Santacanas, 2001) (figura47).

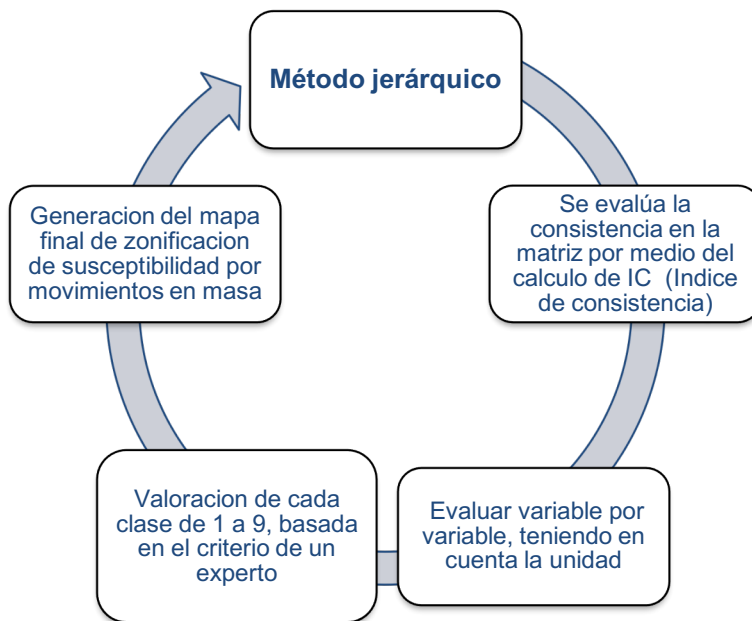


Figura 47. Metodología del análisis jerárquico para susceptibilidad de deslizamientos.

Cuando se tiene las unidades de las variables condicionantes, se hace una valoración cualitativa a la susceptibilidad a movimientos de masa en una escala de

1 a 9 (solo usando números impares) siendo 1 la calificación mas baja y 9 la calificación mas alta para la susceptibilidad por movimientos en masa, categorizando y ponderando el potencial de los factores condicionantes de los movimientos de masa según la opinión de los expertos para medir la probabilidad de los factores ante la ocurrencia de procesos morfodinámicos (*figura 48*). Esta calificación se multiplica por el peso relativo asignado para cada variable explicado a continuación:

El peso relativo asignado por los expertos, basada en Roa (2006), se obtuvo cuatro niveles de importancia: 1. Igual preferencia: lo que significa que los dos criterios(X y J) contribuyen de igual manera al movimiento en masa., 2. Moderada preferencia: pasadas experiencias favorecen ligeramente el criterio X sobre el criterio J., 3. Fuerte preferencia: prácticamente la dominación X sobre el criterio J está demostrado., 4. Absoluta preferencia: existe evidencia que determina la supremacía del criterio X. Generando así una evaluación de las variables, para finalmente determinar los pesos para cada de ellas: geología (16%), geomorfología (14%), pendientes (8%), relieve relativo (7%), rugosidad (8%), cobertura (8%) y curvatura (12%), aspecto (12%), distancia de fallas (8%) y distancia de drenajes (8%) (*Anexo 3 y tabla11*).

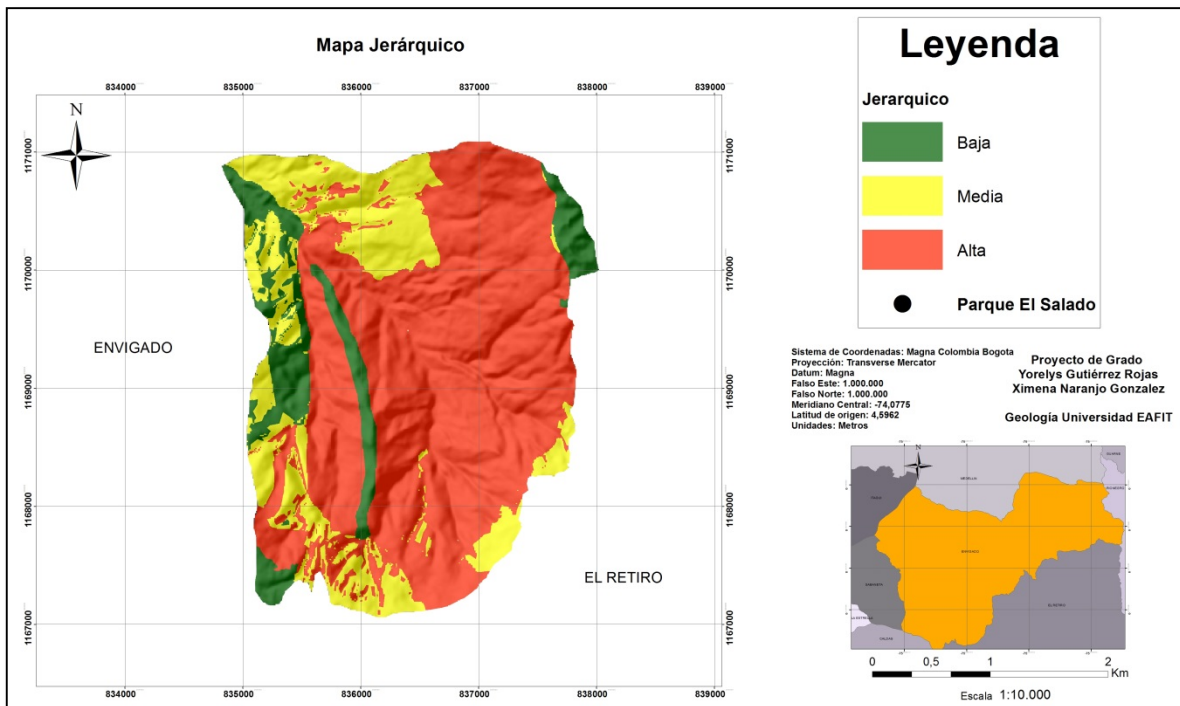


Figura 48. Mapa obtenido con el método Jerárquico. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

SUSCEPTIBILIDAD	AREA (Ha)	% DE AREA TOTAL	PENDIENTES	GEOMORFOLOGIA	GEOLOGIA	COBERTURA
Alta	576.72	56.13	Fuertes- abruptas	Lomeríos residuales y escarpe de erosión mayor.	Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericiticos y grafitosos de Cajamarca, depósitos aluviotorrenciales.	Bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos, bosques naturales fragmentados con arbustos y matorrales y pastos limpios.
Media	247.68	24.10	moderadas- Fuertes	Lomeríos residuales, superficies de explanación y vertientes de pie de escarpe.	Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericiticos, grafitosos de Cajamarca, depósitos aluviales, depósitos de flujo de escombros y superficies de explanación.	Bosques naturales fragmentados con pastos limpios, bosques plantados- coníferas y tejidos urbanos discontinuos.
Baja	149.80	14.58	Planas- suaves	Altiplanos, valle estrecho de la Qda. El Palo y terrazas de acumulación.	Esquistos Cuarzosericiticos, de Cajamarca y depósitos aluviales, deslizamiento y aluviotorrenciales.	Tejidos urbanos discontinuos, bosques plantados- coníferas y bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos.

Tabla 11. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método jerárquico

8.3 Método Univariado

Este método utiliza un análisis condicional que trata de evaluar la relación probabilística entre factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de movimientos en masa. Principalmente se basa en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de movimientos, para a obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de procesos morfodinámicos. (Santacanas, 2001) (figura 49).

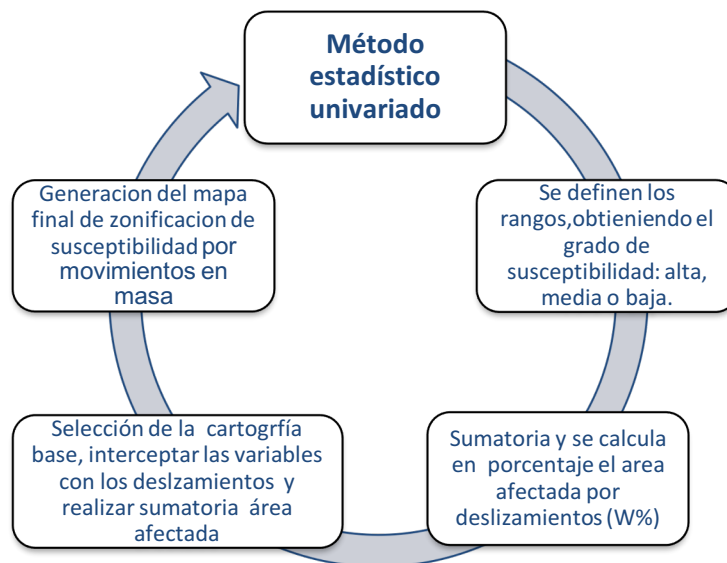


Figura 49. Metodológico de susceptibilidad, para el método estadístico Univariado.

Para el uso de este método, se tuvo en cuenta las variables de geología, geomorfología y cobertura, además de los parámetros morfométricos, que se obtuvieron a partir del Modelo de Elevación Digital de la zona de estudio. Donde se presenta un análisis estadístico para la identificación y determinación cuantitativamente el grado de influencia de cada variable (figura 50).

Según Regmi (2010), se toma el valor del área afectada por movimientos en masa de cada variable, y se divide por el área susceptible por movimientos en masa, para finalmente multiplicarse por 100%. Como resultado, se obtiene un porcentaje que ayuda a calificar como zonas de alta, media y baja susceptibilidad (tabla 12).

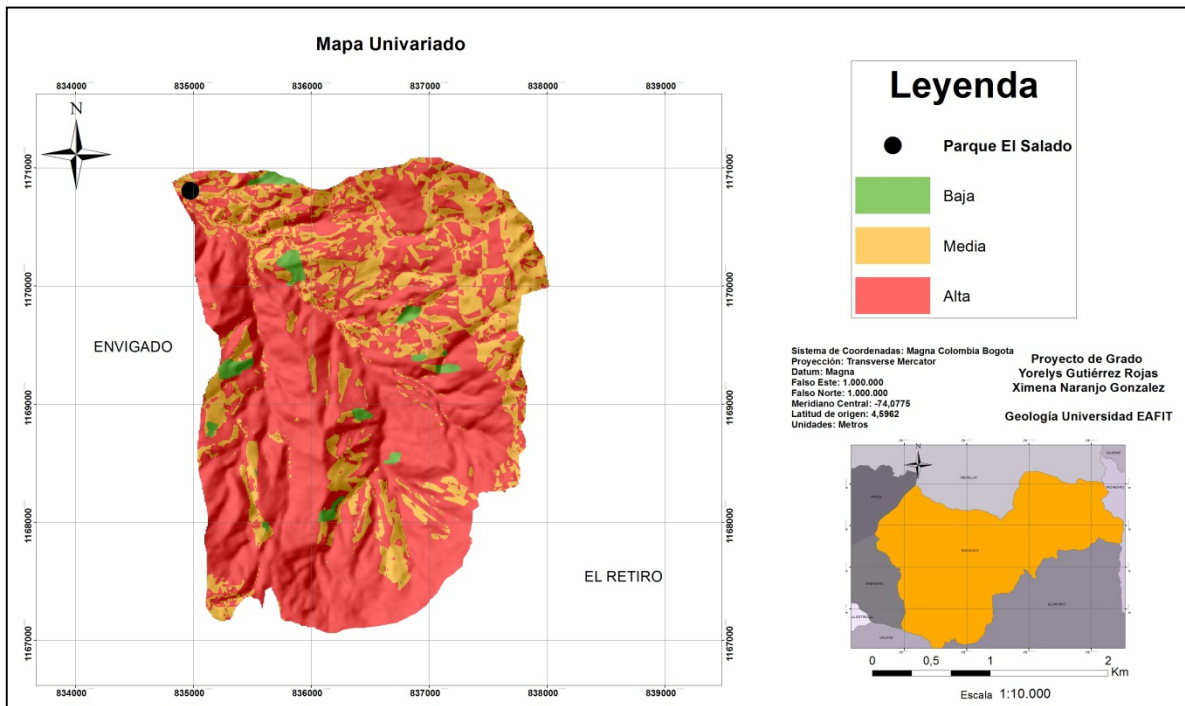


Figura 50. Mapa obtenido con el método Univariado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

SUSCEPTIBILIDAD	AREA (Ha)	% DE AREA TOTAL	PENDIENTES	GEOMORFOLOGIA	GEOLOGIA	COBERTURA
Alta	527.05	51.29	Moderadas-abruptas	Lomeríos residuales, escarpe de erosión mayor y vertiente de pie de escarpe.	Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericiticos y grafitosos de Cajamarca.	Bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos, bosques naturales, bosque natural denso y pastos limpios.
Media	413	40.27	moderadas-Fuertes	Lomeríos residuales, altiplanos, superficies de explanación y vertientes de pie de escarpe.	Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericiticos, grafitosos de Cajamarca, depósitos aluviales, aluviotorrenciales y depósitos de flujo de escombros.	Bosques naturales fragmentados con pastos limpios, Bosques plantados- coníferas tejidos urbanos discontinuos.
Baja	33.32	3.24	Planas- suaves	Altiplanos, valle estrecho de la Qda. El Palo y terrazas de acumulación.	Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericiticos, grafitosos de Cajamarca y depósitos aluviales y aluviotorrenciales.	Tejidos urbanos discontinuos, bosques plantados- coníferas y bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos.

Tabla 12. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método Univariado.

8.4 Método estadístico Bivariado

Este método se encarga de predecir cuantitativamente, las áreas que pueden ser afectadas por movimientos en masa por sus condiciones similares a las que están afectadas (SGC, 2013).

Con este tipo de método se combinó cada factor condicionante (geología, geomorfología, pendientes, relieve relativo, rugosidad, cobertura, curvatura, aspecto, distancia de fallas y distancia de drenajes) con la frecuencia de los movimientos en masa finalmente, se calculan los valores obtenidos con la ponderación de densidades de procesos (*figura 51*).

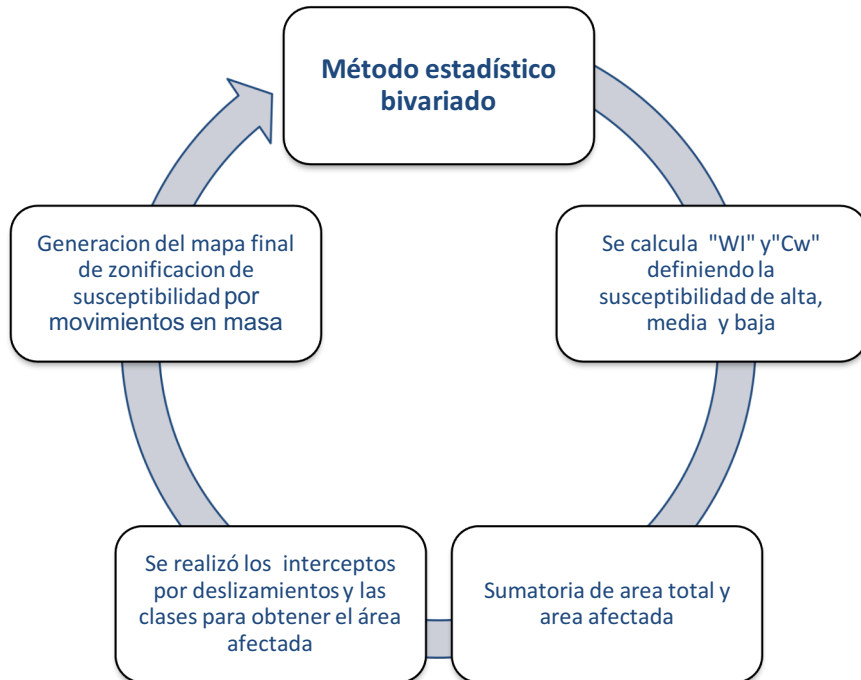


Figura 51. Esquema metodológico de susceptibilidad, para el método estadístico Bivariado

De acuerdo al área afectada por movimientos en masa, se toman la información arrojada por la gráfica de ÉXITO, interpretándose que los valores ubicados entre 0 y 70% de área afecta se encuentran con una alta susceptibilidad ante la ocurrencia de movimiento en masa; los valores que se encuentran entre 70% y 90% hacen parte de las áreas con susceptibilidad media, y posteriormente, los valores que están por encima del 90% del área afectada tienen una susceptibilidad baja ante la ocurrencia de procesos morfodinámicos. Finalmente la clasificación “Alta”, “Media” y “Baja”, obtenida de la interpretación de las graficas de ÉXITO se genera el mapa de de susceptibilidad por movimientos en masa (tabla 13).

Tabla 13. Descripción de susceptibilidad para el mapa de método Bivariado

9. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Para el resultado final de este proyecto, se usó el método Bivariado, el cual se describió su procedimiento en el capítulo 8; donde se especifica todo los pasos para llegar al modelo deseado de representar la susceptibilidad de la cuenca de la Quebrada La Ayurá.

Se debe mencionar que el método estadístico Bivariado fue el indicado para este proyecto, debido a que los anteriores muestran resultados subjetivos con respecto a las variables que afectan la susceptibilidad, debido a que todas sus calificaciones se basan en las opiniones y criterios que varían desde diferentes puntos de vista.

Para llegar a la interpretación de los resultados de susceptibilidad en la zona de estudio, se tomó en cuenta los datos arrojados por las curvas ROC (Receiver Operating Receptor) y por las curvas ÉXITO. Estas curvas complementan la selección del modelo óptimo y descartar los modelos no confiables independientemente de la distribución de las clases. El método diagnóstico de las curvas ROC es el AUC (Área bajo la Curva), comprendidos entre 0.5 y 1; siendo 0.5 un resultado no confiable, 0.7 un resultado aceptable y 1 un resultado óptimo. Por otra parte, las curvas ÉXITO, describen una relación en porcentaje entre el área afectada por movimientos en masa y área susceptible por movimientos en masa. (Hanley & McNeil, 1982).

En la curva ÉXITO obtenida por el método Bivariado (Cw), se interpretó que un 2% del área susceptible se encuentra afectada en un 14% por movimientos en masa; mientras que el 86% del área susceptible está afectada en un 98% por movimientos en masa. El valor $R^2 = 0.8094$ indica un modelo óptimo para la predicción de posibles movimientos en masa. (Hanley & McNeil, 1982) (*figura52*).

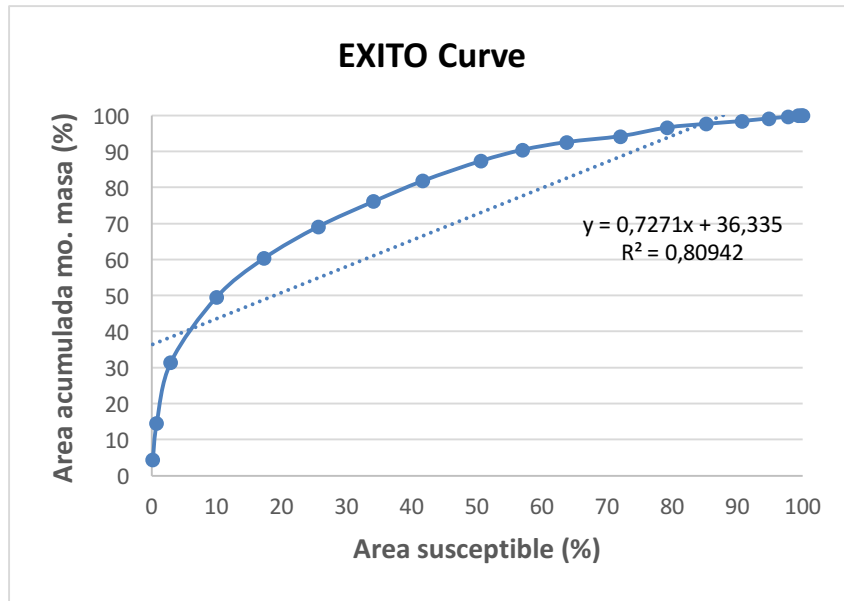


Figura 52. Curva ÉXITO obtenida con el método Bivariado..

El área bajo la curva obtenida en la curva ROC, arrojó un valor de 0.7939% indicando un modelo estadístico aceptable (figura 53).

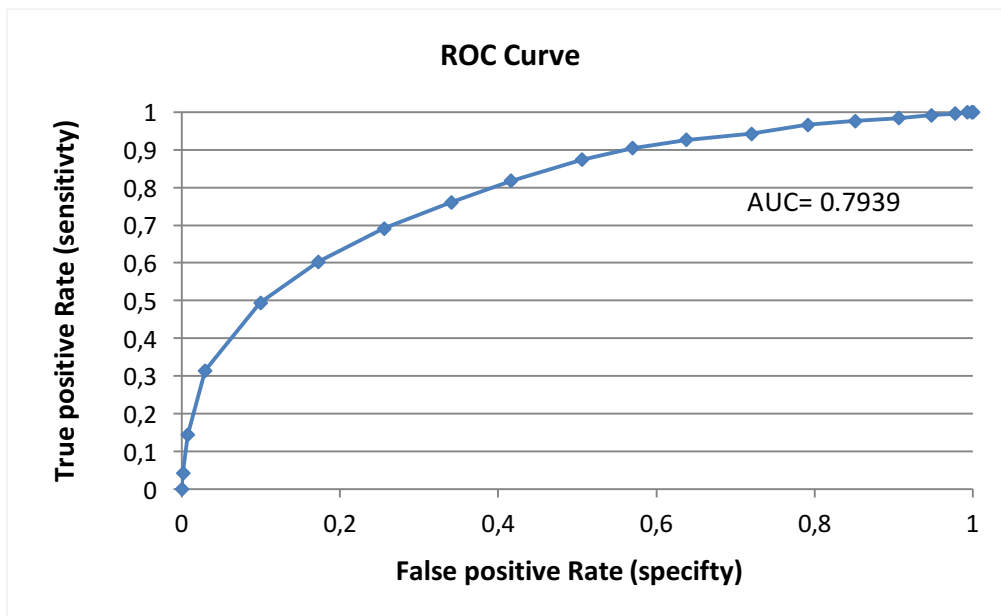


Figura 53. Curva ROC obtenida con el método Bivariado.

Finalmente, cuando se obtuvieron las dos curvas, se observa una similitud en el comportamiento de la línea de tendencia, donde las variables son convexas y directamente proporcionales.

Después de la interpretación de los datos y las curvas generadas, se prosiguió con el análisis e interpretación del mapa que se originó con la combinación de las diferentes variables como geología, geomorfología, pendientes, relieve relativo, rugosidad, cobertura, curvatura, aspecto, distancia de fallas y distancia de drenajes; dando como resultado la zonificación de susceptibilidad por el método Bivariado (*figura 54*).

Susceptibilidad alta: Para la cuenca de la Quebrada La Ayurá, el área con susceptibilidad alta ocupa una extensión de 854.23, 59 ha, que comprende un 83.14 % del área total. Se encuentra distribuida en toda la zona de estudio, asociada a pendientes con porcentajes de inclinación que van de moderadas a abruptas, que corresponden con subunidades geomorfológicas tales como: Lomeríos residuales, escarpe de erosión mayor y vertiente de pie de escarpe; que a su vez se relacionan geológicamente a Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericíticos y grafitosos de Cajamarca, depósitos de flujo y deslizamiento. Y finalmente se encuentran cubiertos por bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos, bosques naturales plantados- coníferas, bosques naturales fragmentados con arbustos y matorrales, bosque natural denso y pastos limpios.

Susceptibilidad Media: La zona de estudio consta de un área de susceptibilidad media que ocupa una extensión de 90.82 ha, que comprende un 8.84 % del área total. Se encuentra localizada principalmente en la franja central y noreste de la zona de estudio, asociada a pendientes con porcentajes de inclinación que van de moderadas a fuertes, que corresponden con subunidades geomorfológicas tales como: Lomeríos residuales, altiplanos, superficies de explanación, valle estrecho de la Qda. El Palo y vertientes de pie de escarpe.; que a su vez se relacionan geológicamente a Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericíticos de Cajamarca, depósitos aluviales, aluviotorrenciales. Y finalmente se encuentran cubiertos por bosques naturales fragmentados con pastos y cultivos, bosques naturales fragmentados con arbustos y matorrales, pastos limpios, Bosques plantados- coníferas tejidos urbanos discontinuos.

Susceptibilidad Baja: Para la cuenca de la quebrada La Ayurá, el área con susceptibilidad alta ocupa una extensión de 34.65 ha, que comprende un 3.37 % del área total. Se encuentra localizada principalmente en el altiplano al este de la zona de estudio y en las superficies de explanación, asociada a pendientes suaves, que corresponden con subunidades geomorfológicas tales como: Altiplanos, planicies de inundación, superficies de explanación y terrazas de acumulación; que a su vez se relacionan geológicamente a Migmatitas de Puente Peláez, Esquistos Cuarzosericíticos de Cajamarca y depósitos aluviales y aluviotorrenciales. Y finalmente se encuentran cubiertos por Tejidos urbanos

discontinuos, bosques plantados- coníferas y bosques naturales fragmentados con arbustos y matorrales.

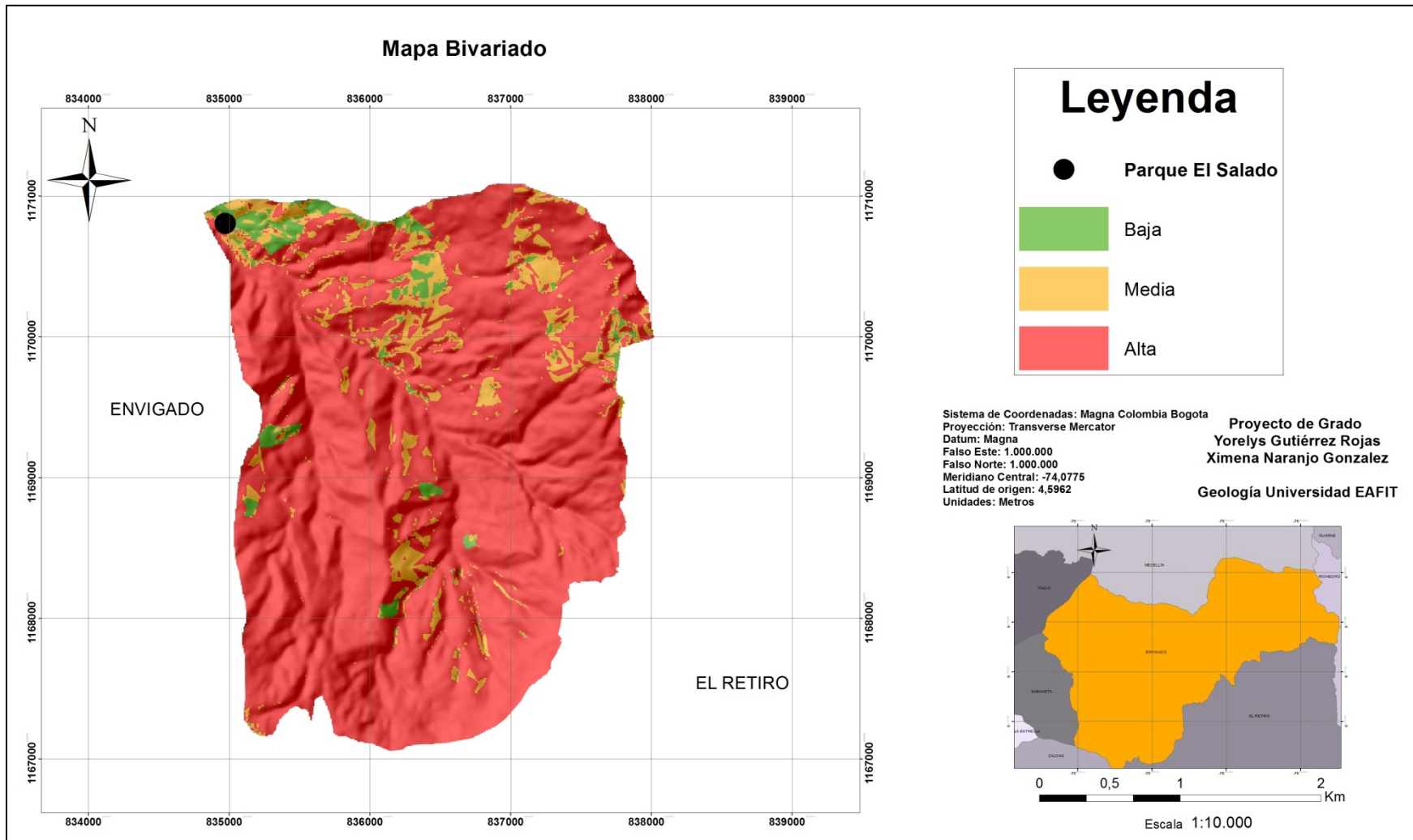


Figura 54. Resultado del método Bivariado. Modificado de Cartografía básica del Municipio de Envigado, Antioquia. 1:10.000.

10. CONCLUSIONES

- Con la recopilación bibliográfica obtenida de las diferentes fuentes, se pudo actualizar el inventario de movimientos en masa para el tramo comprendido entre el Cerro Astilleros y El Parque Ecológico El Salado, siendo este uno de los principales objetivos para la definición de la susceptibilidad en la zona.
- La variable geomorfológica y de pendientes de la superficie, son de vital importancia en la generación del resultado final por susceptibilidad, ya que condicionan el terreno para el origen de movimientos en masa. Esto se observa en los métodos utilizados en los que se complementan dichas variables.
- Los movimientos en masa más recurrentes en la cuenca de La Ayurá son los deslizamientos rotacionales y los flujos de lodo, que se ven influenciados por las altas precipitaciones y las laderas de altas pendientes, principalmente porque se habla de una morfología de escarpes con pendientes abruptas. Se encuentran localizados en el área central y sur de la cuenca, donde prevalecen los movimientos inactivos, con gran posibilidad de reactivarse al alterar las condiciones del ambiente y el suelo.
- El inventario final de los movimientos en masa arrojó que se encontraron 26 deslizamientos rotacionales y 27 flujos de lodo y/o escombros; de los cuales los deslizamientos rotacionales están asociados a los esquistos de Cajamarca y Migmatitas de puente Peláez, que desarrollan suelas rojizas, arcillosas y con un espesor aproximado de 3 a 10 metros hasta llegar a roca ligeramente meteorizada (grado de meteorización III, horizonte "C"), con pendientes que van de escarpadas a inclinadas.
- Los movimientos de masa que se encontraron en la zona de estudio presentan tres estados de actividad principales: activos, inactivos y latentes; de los cuales cabe resaltar que los movimientos de masa latentes, por no estar estabilizados, por ser de tamaños superiores a 50 metros y por encontrarse expuestos a diferentes variables condicionantes, toman gran importancia en la cuenca de la Quebrada La Ayurá, debido a que en cualquier momento pueden verse reactivados y afectar las comunidades aguas abajo.

- Los flujos de lodo y escombros, están asociadas a esquistos de Cajamarca y depósitos cuaternarios, que son afectados por las pendientes escarpadas y abruptas, en laderas con incisión de afluentes, en suelos rojizos con matriz areno arcillosa y bloques de rocas metamórficas de la zona.
- La variable de los drenajes juega un papel importante en la morfología del terreno, debido a que esta es una zona hídricamente rica, donde nacen diferentes acequias, aumentando así el flujo y caudal de la Quebrada La Ayurá.
- La falla Ayurá controla parte del drenaje con una dirección preferencial al NW, al igual que se ven asociado a las geoformas de lomeríos residuales que siguen la misma dirección de la falla.
- Los métodos geomorfológico directo y jerárquico son poco confiables a la hora de presentar resultados de susceptibilidad, y por lo tanto, es de suma importancia para la escala de trabajo usar el método Bivariado, método estadístico, basado en probabilidades y predicciones, generando una mayor certeza en la información.
- Se pudo corroborar que con el método estadístico Bivariado, se pueden predecir cuantitativamente las áreas que pueden ser afectadas por movimientos en masa debido a sus condiciones similares a las zonas afectadas por éstos.
- Teniendo en cuenta que el área total de la zona es 1027.44 ha., se obtuvo que: el 83.14% está ubicado en el rango de susceptibilidad alta por movimientos en masa, se encuentra relacionado a deslizamientos rotacionales y de flujo de lodos y /o escombros, que a su vez se encuentran ubicados en las laderas de los escarpes de erosión mayor al sur y este de la cuenca de la Quebrada La Ayurá, caracterizándose por ser generalmente largas, onduladas y de pendientes abruptas a escarpadas. Seguidamente de un 8.84% en el rango de susceptibilidad media, asociados a los lomeríos residuales y el pie del escarpe este de la zona de estudio, con laderas largas y cortas, onduladas a cóncavas, disertadas por afluentes de pequeñas longitudes (menores a 2km) con pendientes moderadas a abruptas. Y un 3.37% del área total de la zona con susceptibilidad baja, asociadas a los altiplanos, planicies de inundación y terrazas de acumulación. Lo que significa que la cuenca de La Ayurá se sitúa en condiciones de susceptibilidad alta, para la comunidad asentada en las riberas de la cuenca.

- La intervención antrópica ha aumentado el grado de susceptibilidad en la parte baja de la zona de estudio, debido a que las superficies de explanación y otras intervenciones antrópicas, afectan las laderas del terreno, aumentando así la ocurrencia de movimientos en masa y otros fenómenos.

11. RECOMENDACIONES

- Se considera importante la elaboración de estudios hidráulicos e hidrológicos en esta zona, para posteriormente realizar una zonificación por avenidas torrenciales e inundaciones, ya que se considera de gran importancia para el comportamiento de la Quebrada La Ayurá y sus afluentes en municipio de Envigado.
- Se recomienda la previa intervención por parte de las autoridades competentes para los movimientos en masa que afectan el área, principalmente en el Cerro Astilleros, pues debido a sus antecedentes, hay mucho movimientos de tamaño significativo, que representa un peligro para las comunidades aguas abajo de la Quebrada La Ayurá.
- Es necesario un programa educativo ambiental para la conservación del recurso hídrico, por lo que se considera importante la restricción de la circulación de cuatrimotos y tala de árboles, debido a que ayudan a desestabilizar el terreno por la combinación de las fuertes precipitaciones y las pendientes abruptas de la cuenca de la Quebrada La Ayurá.
- Se considera de gran importancia la implementación de sistemas de monitoreo como estaciones pluviométricas y monitoreo del caudal para la Quebrada La Ayurá y de igual manera la presencia de estaciones pluviométricas entre el tramo del Cerro Astilleros y El Parque Ecológico el Salado.
- La reforestación de las zonas altas (incluidas los alrededores de senderos ecológicos), son importantes para evitar la erosión de la superficie y el origen de surcos y cárcavas que luego serán canales para los flujos de lodos y escombros.

BIBLIOGRAFIA

Acosta, J. H. C., 2011. Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45-50.

Alcaldía de Bogotá., (2012). Ley 1523 de 2012. *Por el cual se adopta la política nacional de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones*".

Castrillón Uribe, M. D. S., & Galvis Osorio, B. E.,(2015). Análisis de la normatividad vigente colombiana referida a la gestión del riesgo de desastres y el alcance del decreto 1807 de 2014, en cuanto a los lineamientos para la incorporación en los planes de ordenamiento territorial.

Álvarez, J., (1987). Tectonitas Dunitas de Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia. *Bol. Geol. Ingeominas*, Bogotá. 28 (3), pp. 944.

Botero, G., (1963). Libro de correspondencia tomo I. carta a Jaime De Porta, mayo de 1963. Archivo Museo de Geociencias, Facultad de Minas

Caballero, H., Mejía, I., (1988). Algunos Comentarios acerca del evento torrencial de la quebrada Ayurá (Envigado) del 14 04 88 y sus implicaciones en la evaluación de la amenaza del municipio. In *Memorias II Conferencia. Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. Medellín*.

Cediel, F.; Shaw R.P.; and C. Cáceres. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffer, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79*, pp.815-848.

CORANTIOQUIA., (2009). Amenaza, Vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión. Medellín: Universidad nacional de Colombia sede Medellín.

CORANTIOQUIA - EAFIT. (2015a). Convenio 1502-6. Aunar esfuerzos para realizar los estudios básicos para la delimitación de amenazas naturales y zonificación de áreas con condición de amenaza y riesgo a partir de investigación aplicada en once municipios de la jurisdicción de CORANTIOQUIA.

Correa, A. M., & Martens, U. (2000). Caracterización geológica de las anfibolitas de los alrededores de Medellín. *Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas*.

CRE. , (2014). Actualización y Profundización de Estudios Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en la Zona 6 del Municipio de Envigado. Municipio de Envigado: CONTRATO 07-10-31-07-039-13.

Dearman W.R., (1974). Weathering classification in the characterization of rock: a revision. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Vol. 14. Pp 123-127.

Duque-Caro, H. (1990). The Choco Block in the northwestern corner of South America: structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(1), 71-84.

Durán, J. J., Elízaga, E., Garzón, G., Lamas, J. L., Lendínez, A., Prieto, C., (1985). Geología y prevención de daños por inundaciones. *Instituto Geológico y Minero de España. Madrid*.

Echeverría, L. M. (1973). Zonación de las rocas metamórficas del valle de Aburrá y sus alrededores. *Anales de la Facultad de Minas*. (58), 30-56.

Felicísimo, A. (1994). Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación a las ciencias ambientales. *Extraído de <http://etsimo.uniovi.es/feli>*.

Flórez, M. T., Parra L. N., (1988). Avalancha de la quebrada Ayurá del 14 de Abril de 1988. En: *Segunda Conferencia sobre riesgos geológicos en el valle de Aburra*. Medellín.

García, A., (2013). Reseña histórica de movimientos en masa y avenidas torrenciales más relevantes en la quebrada La Ayurá. Medellín: DAPARD universidad de Antioquia

García, A., (2017). Estudio Hidrológico y Modelación Hidráulica de la Quebrada La Ayurá. Medellín.

González, H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del Mapa Geológico de Colombia. *Bol. Geol. Ingeominas*, Bogotá. 23 (1), pp. 1174

González, M., (2015). Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de Santa Bárbara, Departamento de Antioquia. Proyecto de grado, Universidad EAFIT, Medellín. 169 pp.

Guisao, Y. (2015). Zonificación de amenaza por movimientos en masa para el municipio de Támesis, en el área rural a escala 1: 25.000 y en el área urbana a escala 1: 2.000 (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).

GSM, G. D. S. D. M. (2002). Microzonificación Sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Hanley, J. A., & McNeil, B. J.(1982). The meaning and use of the area under a receiver operating characteristics (ROC) curve. *Radiology*, 143 (1), 29-36.

Ingercivil LTDA., (2014). Estudio geotécnico y zonificación de aptitud de uso del suelo en la zona 10 veredas escobero y santa catalina. Medellín: CONTRATO 15-00-31-07-030-12.

Kennan, L., Pindell, J., (2009). Dextral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate?. In: James, K.H., Lorente, M.A., Pindell, J. (eds.). The Origin and Evolution of the Caribbean Plate. Geological Society of London, 328 (Special Publication), 487-532.

León, J. D., Gallo. J.D., (2011). Plan Ordenamiento Territorial Acuerdo 010 de 2011-2023. La Patria, I, 240

Londoño, J.P. (2006.) Evaluación Holística del Riesgo frente a deslizamientos en áreas Urbanas Andinas. Estudio de caso: Manizales. Tesis de Maestría. Universidad Nacional De Colombia, Sede Manizales. Pág. 244

López C., Pérez H., (2013). Identificación de Riesgos y acciones de intervención en la cuenca de La Ayurá en el Municipio de Envigado. Medellín

McCourt, W. J., Aspden, J. A., & Brook, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *Journal of the Geological Society*, 141(5), 831-845.

Merriman, P.A., & Browitt, C. W. A., (1993). Natural disasters: protecting vulnerable communities: proceedings of the conference held in London, 13-15 October 1993. Thomas Telford.

Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Pardo, A., Silva, J. C., Valencia, V., ... & Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American seaway. *Science*, 348(6231), 226-229.

Naranjo. C. (1994). Formación superficial de la vertiente izquierda de la quebrada La Ayurá entre las quebradas Sebastiana y cachona municipio de envigado (Antioquia). Medellín: Universidad EAFIT

Ospina, T. (1911). Reseña sobre la geología de Colombia, y especialmente del antiguo Departamento de Antioquia: conferencias dictadas por Tulio Ospina. Imp. de "La Organización".

Peduzzi, P., (2000). Insight on common/key indicators for Global Vulnerability Mapping.

Pelling, M., (2003). The vulnerability of cities: natural disasters and social resilience. Earthscan.

Planeación, O. A. (2011). Acuerdo 010 del 2011 por el cual se ajusta y se modifica el Plan de Ordenamiento Territorial. Municipio de Envigado.

POMCA, C5, (2005)., Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del Rio Aburrá, Área metropolitana, Medellín. (pp 5-10).

Regmi, N. R., Giardino, J.R., Vitek, J.D., (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 172. 1-16.

Rendón, D. A. (1999). Cartografía y caracterización de las unidades geológicas de la zona urbana de Medellín. Trabajo Dirigido de Grado Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de minas.

Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1974). Obducción cretácea en el Occidente Colombiano. *Anales Fac. Minas, Univ. Nacional, Medellín*, (58), 73.

Restrepo, J., & Toussaint, J. (1974). Algunas consideraciones sobre la evolución estructural de los Andes Colombianos. *Pub. Esp., Geol., Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín*, (4), 1-14.

Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1984). Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. In *Mem Primera Conf Riesgo Geol. V. de A., Medellín*.

Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (1982). Metamorfismos superpuestos en la Cordillera Central de Colombia. In *V Congreso Latinoamericano de Geología. Buenos Aires* (pp. 1-8).

Rodríguez G.; González H.; Zapata G.; (2005). Geología de la plancha 147 Medellín Oriental. Ministerio de Minas y Energía. Instituto Colombiano de Geología y minería.

Santacana Quintas, N.;(2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el*

uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Universitat Politècnica de Catalunya.

Scheibe, R. (1919). Informe sobre resultados de la comisión científica nacional en Antioquia. *Compilación Estudios Geológicos Oficiales en Colombia*, 1, 95-165.

SGC; (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Escala 1:100.000. Bogotá; Servicio Geológico Colombiano.

SGC, (2015). Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas. Escala 1:100.000. Bogotá.

SGC, (2013); Guía metodológica para la elaboración de mapas geomorfológicos a escala 1:100.000. IDEAM. Bogotá.

SGC, (2013). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, Bogotá D.C: Servicio geológico colombiano-Esc 1: 100 000.

SOLINGRAL, (2000). Secretaría de obras públicas de Envigado, S.O.P. Municipio de Envigado. Estudio Inestabilidad Loma de Las Brujas.

SOLINGRAL. (2004). secretaria de obras públicas de Envigado, S.O.P. Municipio de Envigado. Estudio de riesgo al deslizamiento en el municipio de envigado: CONTRATO NO. 018-2004

Suarez J., 2007. Deslizamientos: Análisis Geotecnico. Cap. 1 Madrid, España., 11-35.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787-813.

Tamayo, L. (1984). Análisis y mediciones de miniestructuras en la anfibolita del Grupo Ayurá-Montebello. Univ. Nal. de Colombia, Fac. De Minas.

Toro, G., & Velásquez, A. (1984). Estudio geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá comprendido entre el Municipio de Caldas y las Quebradas La Iguana y Santa Elena. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Toussaint, J. F., & Restrepo, J. J. (1989). Acreciones sucesivas en Colombia: Un nuevo modelo de evolución geológica. In V Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga (Vol. 1, pp. 127-146).

Varnes, D. D., 1978. Slope movements types and processes. Landslides analysis and control: Washington D.C, Issue 176, pp. 9-33.

Varnes, D., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Natural Hazard-UNESCO, pp. 3-63.

ANEXOS

AUTOR	FECHA	Lugar	EVENTO	FACTOR DETONANTE	ACONTECIMIENTO
Flores y Parra (1988)	1927	Quebrada La Ayurá	Movimiento en masa- flujo de lodo	Saturación de suelo por filtración de acequia en suelos de alta pendiente.	Movimiento de masa sobre la Fábrica de Rosellón y además obstrucción del cauce de la Quebrada.
Flores y Parra (1988)	1944	Quebrada La Ayurá	Avenida torrencial	Altas precipitaciones	Fuerte aguacero que ocasionó desbordamiento de la Quebrada.
Flores y Parra (1988)	1950	Quebrada La Ayurá	Aumento en el nivel de La Ayurá	Altas precipitaciones	Inundaciones
Flores y Parra (1988)	1964	Quebrada La Ayurá	Avenida torrencial	Altas precipitaciones	Fuertes lluvias en la región del Astillero generó gran avenida torrencial.
Informe - Ingeominas	1970	Zona 6	Movimiento en masa	Saturación de suelo por filtración de acequia	Deslizamientos y agrietamientos en los sectores de La Mina, Chingui y Zúñiga
Informe- Acuantioquia-Solingral	1971	Municipio de Envigado	Movimiento en masa		Informe sobre un deslizamiento al sur de la planta de filtraciones de Envigado
Caballero y Mejía (1988); Flores y Parra (1988)	1988	Quebrada La Ayurá	Avenida torrencial	Altas precipitaciones	Crecida de la Quebrada afectó toda la ribera de la cuenca afectando muchas viviendas.

POT Envigado (2011)	1994	Quebrada La Ayurá	Crecida en el nivel de la Qda. Ayurá	Altas precipitaciones	Inundaciones en las riberas de la Qda. Parte media-baja
Informe - Tecnec S.A	1996	Quebrada La Ayurá			Plan de ordenamiento y manejo integral de la cuenca de la quebrada La Ayurá
Tesis - Escuela de Ingeniería de Antioquia	2000	Municipio de Envigado	Movimiento en masa	Saturación de suelo por filtración de acequia	Evaluación de zonas de alto riesgo en el municipio de Envigado
Informe	2000	Municipio de Envigado			Plan de ordenamiento territorial del municipio de Envigado - POT
Tesis - Universidad Nacional de Colombia	2001	Municipio de Envigado	Geotecnia		Caracterización geotécnica del suelo en el casco urbano del Municipio de Envigado
Tesis - Escuela de Ingeniería de Antioquia	2001	Municipio de Envigado	Geomorfología		Caracterización del paisaje en las microcuencas El Palo y La Miel, en el Municipio de Envigado y propuesta de manejo con énfasis en la creación de un parque ecológico

Tesis - Universidad Nacional de Colombia	2001	Quebrada La Ayurá	Movimiento en masa	Saturación de suelo por filtración de acequia	Calificación de la Amenaza por movimientos en masa en la vertiente derecha de la quebrada La Ayurá, Municipio de Envigado
Tesis - EAFIT	2001				Desinventar
Informe - Integral S.A - Area Metropolitana	2002	Valle de Aburra	Movimiento en masa e inundaciones	Saturación de suelo por filtración de acequia Y Altas precipitaciones	Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el valle de Aburrá
SOLINGRAL	2004	Municipio de Envigado	Movimiento en masa	Saturación de suelo por filtración de acequia	Estudio de Riesgo al Deslizamiento en el Municipio de Envigado, Contrato N° 018
CARVAJAL, JOSÉ HENRY.,	2004	Municipio de Envigado	Geomorfología		Propuesta metodológica para los estudios de geomorfología aplicados a la ingeniería
Aristizabal y Gómez	2007	Valle del aburra	Movimientos superficiales de suelo y flujos de lodos.	Infiltraciones e intensas lluvias	realizan un inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá desde 1880 a 2007;

POT Envigado (2011)	2010	Quebrada La Ayurá	Avenida Torrencial	Desprendimiento de talud de la Qda. La Molina por fuertes lluvias.	Represamiento del cauce de La Ayurá en el salto Perico Ligerero, y luego se vio reflejada por la ampliación del cauce de las quebradas La Molina, La Cachona y la Verdun.
---------------------	------	-------------------	--------------------	--	---

Anexo 1. Antecedentes de eventos en la cuenca La Ayurá.

X	Y	FAJA	AÑO	TIPO_MM	Area_ha	ESTADO	COBERTURA_V
836327,8689	1170387,278	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,017169	ACTIVO	SIN COBERTURA
837147,3289	1170558,267	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,026463	ACTIVO	SIN COBERTURA
837176,2045	1170617,91	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,05017	ACTIVO	SIN COBERTURA
835454,3624	1170483,547	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,087965	ACTIVO	SIN COBERTURA
835032,0582	1170851,318	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,111007	ACTIVO	SIN COBERTURA
834952,3657	1170767,602	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,049765	ACTIVO	SIN COBERTURA
834996,3805	1170723,057	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,061568	LATENTE	PASTO
835083,5536	1170592,421	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,020645	ACTIVO	SIN COBERTURA
835414,3168	1170453,83	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,058114	INACTIVO	BOSQUE
837351,4911	1169142,04	ORTOFOTO14	2014	D, ROTACIONAL	0,278024	LATENTE	SIN COBERTURA
836837,8318	1167404,306	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,70218	ACTIVO	SIN COBERTURA
835309,6822	1168510,363	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,136073	LATENTE	SIN COBERTURA
835862,7159	1170038,865	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,090857	ACTIVO	SIN COBERTURA
836820,2334	1167462,67	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,057724	ACTIVO	SIN COBERTURA
837093,2096	1169441,843	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,096695	ACTIVO	SIN COBERTURA

837112,8522	1169288,895	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,230711	ACTIVO	SIN COBERTURA
837112,7081	1168967,051	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,859613	LATENTE	SIN COBERTURA
837158,8296	1168867,122	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,146887	ACTIVO	SIN COBERTURA
837244,6661	1168325,609	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,129389	LATENTE	BOSQUE
836078,7239	1170585,136	ORTOFOTO14	2014	FLUJO	0,181106	ACTIVO	SIN COBERTURA
835095,8162	1170367,082	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,079077	ACTIVO	SIN COBERTURA
<Null>	<Null>	ORTOFOTO14	2014	D. ROTACIONAL	0,042349	ACTIVO	SIN COBERTURA
<Null>	<Null>	ORTOFOTO2014	2014	D. ROTACIONAL	0,083798	ACTIVO	SIN COBERTURA
835890,825	1170109,526	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	0,513699	ACTIVO	SIN COBERTURA
835049,4162	1170265,001	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	0,114275	INACTIVO	BOSQUE
835442,2922	1169898,349	ORTOFOTO04	2004	FLUJO	0,12346	INACTIVO	BOSQUE
836230,1715	1168408,193	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	4,260831	INACTIVO	BOSQUE
835417,9813	1168549,989	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	1,795001	INACTIVO	BOSQUE
835569,673	1168655,799	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	1,207365	INACTIVO	BOSQUE
836365,0051	1167885,414	ORTOFOTO04	2004	FLUJO	0,198804	ACTIVO	SIN COBERTURA
835551,1337	1169341,573	ORTOFOTO04	2004	D. ROTACIONAL	0,696088	INACTIVO	PASTO

835950,7767	1170096,223	09C	2008	FLUJO	0,033375	INACTIVO	PASTO
835938,4664	1170029,595	09C	2008	FLUJO	0,191785	ACTIVO	SIN COBERTURA
835341,8447	1169309,601	09C	2008	FLUJO	2,681531	ACTIVO	SIN COBERTURA
836116,0945	1168032,972	09S	2008	FLUJO	0,573412	ACTIVO	SIN COBERTURA
836422,9281	1168912,294	09S	2008	FLUJO	0,634824	ACTIVO	SIN COBERTURA
836644,0886	1168509,42	09S	2008	FLUJO	0,526897	INACTIVO	BOSQUE
836723,3603	1168559,631	09S	2008	D. ROTACIONAL	0,533065	ACTIVO	BOSQUE
836746,0757	1168069,538	09S	2008	FLUJO	1,622226	INACTIVO	BOSQUE
835820,6481	1170041,1	06C	2007	FLUJO	0,041604	ACTIVO	SIN COBERTURA
835721,3281	1169499,339	06C	2007	FLUJO	0,11982	INACTIVO	SIN COBERTURA
837127,4593	1167767,519	12	2007	FLUJO	1,188049	INACTIVO	PASTO
837452,0978	1168458,389	12	2007	D. ROTACIONAL	0,566818	INACTIVO	BOSQUE
836659,6327	1167993,238	12	2007	FLUJO	0,802759	INACTIVO	BOSQUE
836743,0299	1167740,411	12	2007	D. ROTACIONAL	0,391002	INACTIVO	BOSQUE
837284,9497	1168195,481	12	2007	D. ROTACIONAL	1,713994	INACTIVO	PASTO
836125,8093	1168063,566	3	1993	FLUJO	0,198578	ACTIVO	SIN COBERTURA

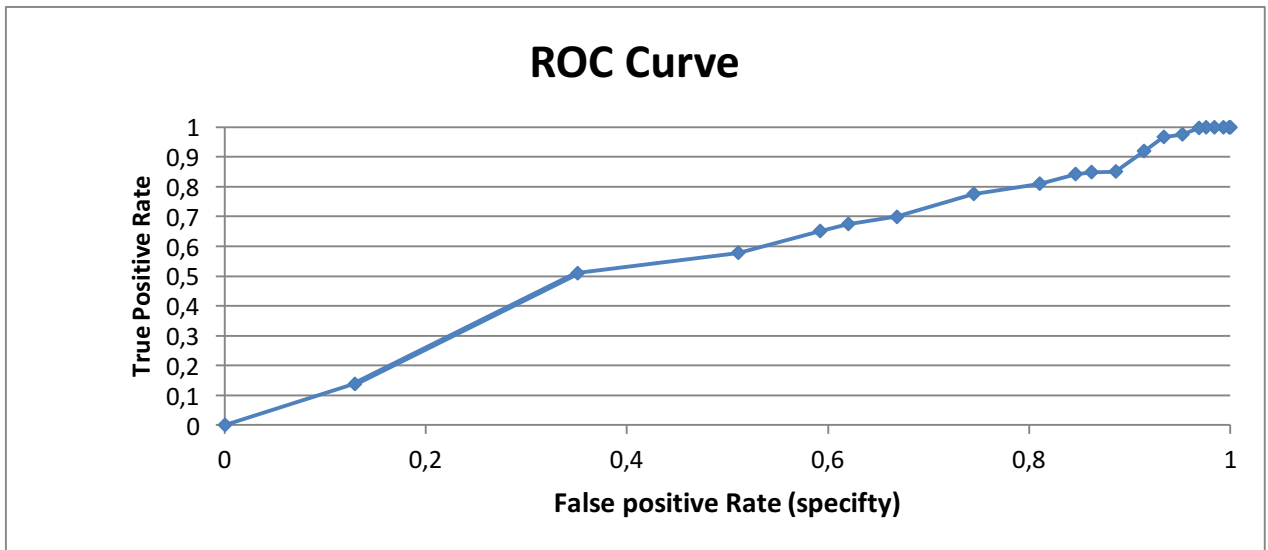
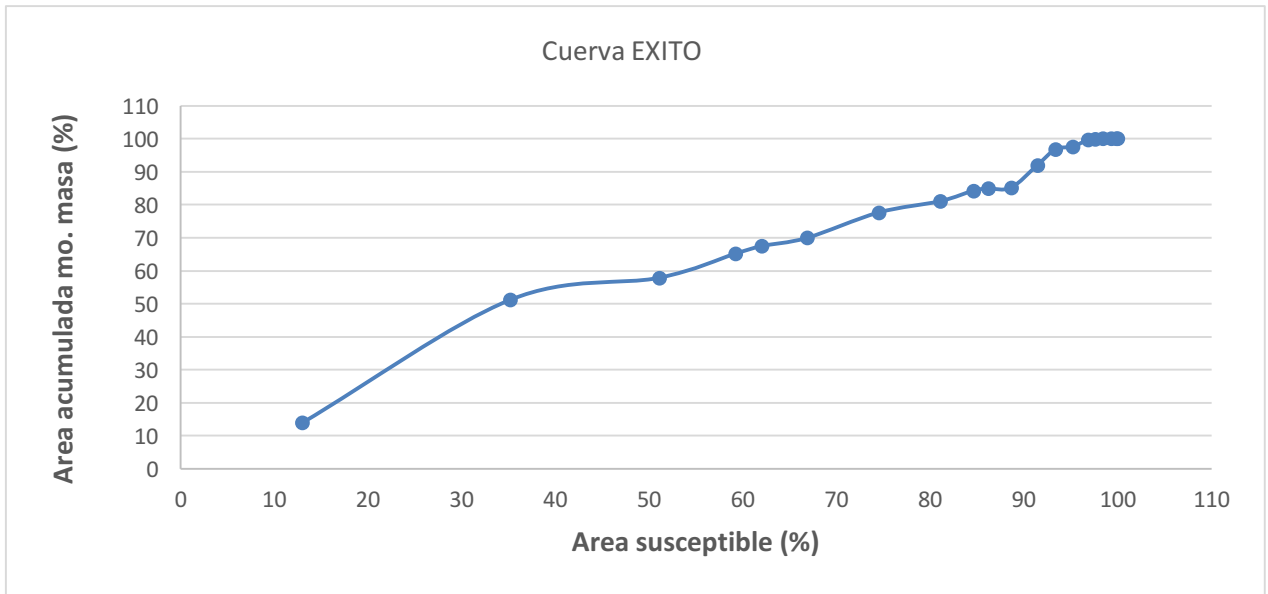
836354,0978	1167842,903	3	1993	FLUJO	0,183658	INACTIVO	BOSQUE
836061,9978	1167816,267	3	1993	FLUJO	0,084219	INACTIVO	BOSQUE
836438,1168	1167214,29	3	1993	FLUJO	0,680389	INACTIVO	BOSQUE
836851,1201	1167757,691	3	1993	FLUJO	0,101801	INACTIVO	BOSQUE
835767,6806	1168337,635	3	1993	FLUJO	0,115572	ACTIVO	SIN COBERTURA
835112,9637	1167767,976	2	1993	FLUJO	0,254965	INACTIVO	BOSQUE

Anexo 2. Inventario de Movimientos en masa.

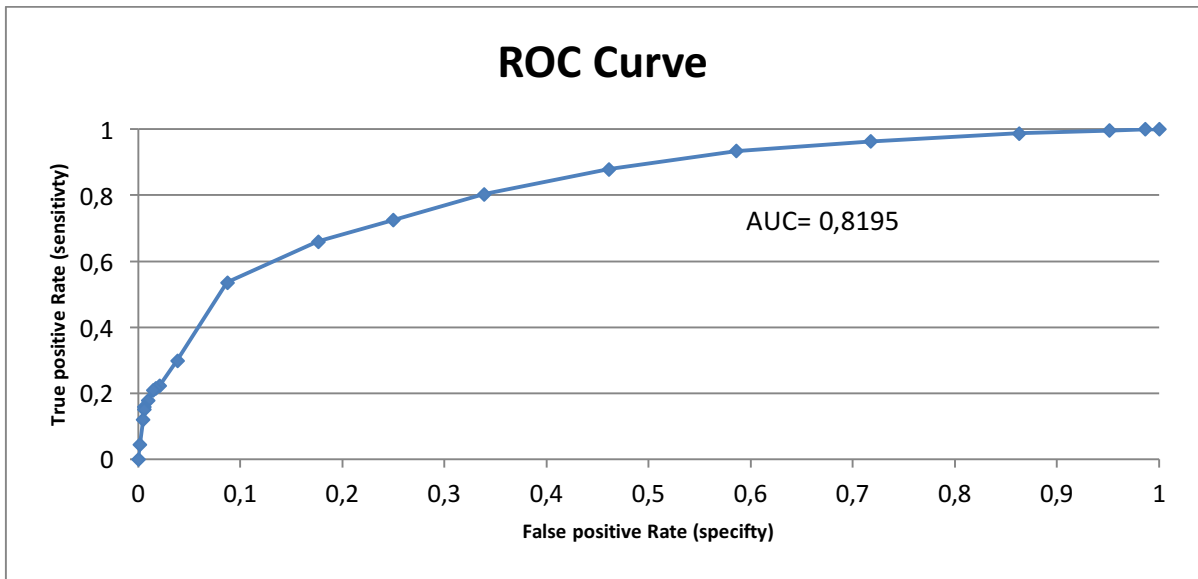
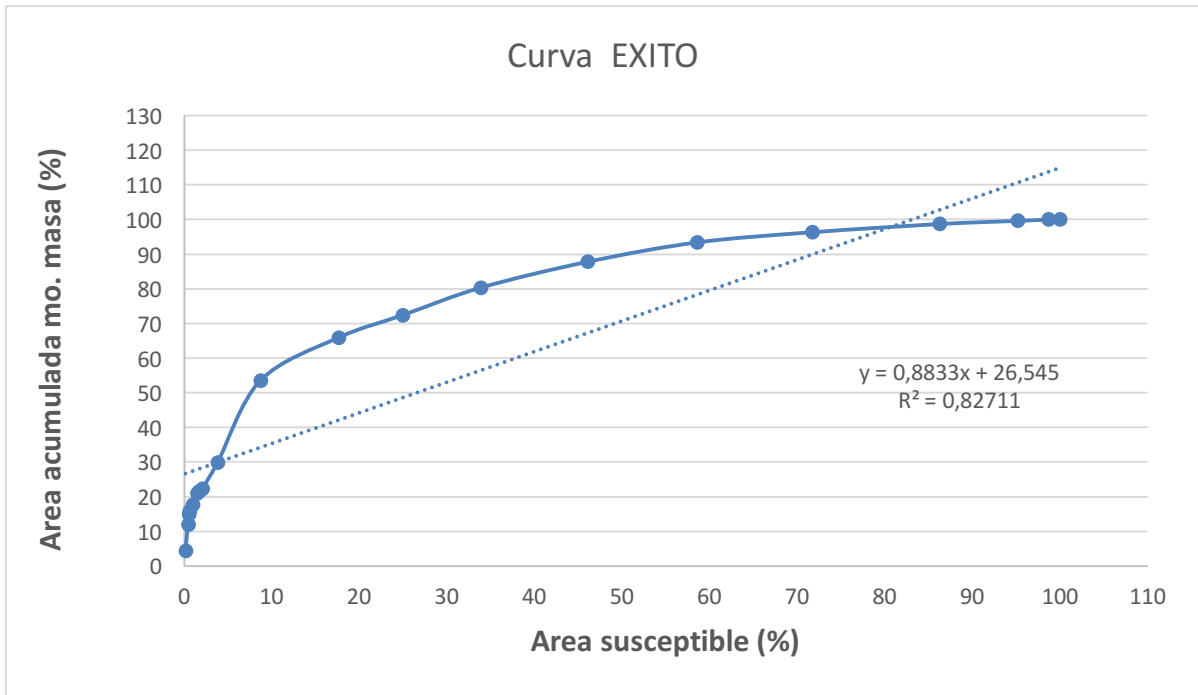
Yorelys	Geología	Geomorfología	Cobertura	Fallas	Drenajes	Pendiente	Relieve	Curvatura	Aspectos	Rugosidad	Promedio	Peso relativo (%)
Geología	1	2	2	4	3	3	3	2	3	4	2,7	17,42%
Geomorfología	0,50	1	2	3	3	3	3	2	2	4	2,35	15,17%
Cobertura	0,50	0,50	1	0,33	0,33	2	0,50	2	0,25	4	1,141	7,36%
Fallas	0,25	0,33	3,00	1	2	0,25	4	0,25	0,33	0,25	1,166	7,53%
Drenajes	0,33	0,33	3,00	0,50	1	0,50	2	0,33	0,50	2	1,049	6,77%
Pendiente	0,33	0,33	0,50	4	2	1	2	0,50	0,33	2	1,299	8,38%
Relieve	0,33	0,33	2,0	0,25	0,50	0,50	1	0,50	0,33	4	0,974	6,29%
Curvatura	0,50	0,50	0,5	4	3	2,00	2	1	4	0,33	1,75	11,29%
Aspectos	0,33	0,50	4	3	2	3,00	3	0,25	1	3	2,008	12,96%
Rugosidad	0,25	0,25	0,25	4	0,50	0,50	0,50	3	0,33	1	1,058	6,83%
											15,495	100%

Ximena	Geología	Geomorfología	Cobertura	Fallas	Drenajes	Pendiente	Relieve	Curvatura	Aspectos	Rugosidad	Promedio	Peso relativo (%)
Geología	1	2	3	4	0,33	2	2	3	3	3	2,333	15,06%
Geomorfología	0,50	1	2,00	4	0,5	0,5	3	2	2	3	1,85	11,94%
Cobertura	0,33	0,50	1	0,25	4	2	0,33	4	0,25	0,25	1,291	8,33%
Fallas	0,25	0,25	4	1	0,33	3	2	0,5	2	0,25	1,358	8,76%
Drenajes	3,00	2	0,25	3	1	0,50	2	0,25	3	0,33	1,533	9,89%
Pendiente	0,50	2	0,50	0,33	2,00	1	2	0,33	0,33	2	1,099	7,09%
Relieve	0,50	0,33	3	0,50	0,50	0,50	1	2	0,33	3	1,166	7,53%
Curvatura	0,33	0,50	0,25	2,00	4,00	3,00	0,50	1	4	3	1,858	11,99%
Aspectos	0,33	0,50	4	0,50	0,33	3,00	3	0,25	1	3	1,591	10,27%
Rugosidad	0,33	0,33	4	4	3	0,50	0,33	0,33	0,33	1	1,415	9,13%
											15,494	100%

Anexo 3. Matriz de ponderaciones.



Anexo 4. *Curvas del método jerárquico.*



Anexo 5. Curvas del método Univariado.