

**Informe de práctica Académica en la Secretaría de Planeación y Obras Públicas de
la Alcaldía de Paicol - zonificación de susceptibilidad por Movimientos en masa a escala
1:10.000 para la vereda Alto San Miguel en el municipio de Paicol – Huila.**

Andrea Catalina Parra Rivera

**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales – Colombia
2023**

Informe de práctica Académica en la Secretaría de Planeación y Obras Públicas de la Alcaldía de Paicol - zonificación de susceptibilidad por Movimientos en masa a escala 1:10.000 para la vereda Alto San Miguel en el municipio de Paicol – Huila.

Andrea Catalina Parra Rivera

Trabajo de grado modalidad pasantía presentado para optar por el título de:

Geóloga

Asesores:

Académica: Lina Marcela Marín Ramírez

Institucional: Sharoon Lorena Valenzuela González

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales – Colombia

2023

Nota de Aceptación

APROBADA

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Lina Marcela Marín Ramírez', written over a horizontal line.

Esp. Lina Marcela Marín Ramírez

Agradecimientos

Gracias a Dios, por haberme dado salud y una familia incondicional, permitiéndome vivir esta experiencia y disfrutar en conjunto este logro.

Le agradezco con mi corazón a mi familia, que ha caminado junto a mí en estos años y se han apersonado de esta meta, especialmente a mi abuela, Blanca Mary Moya de Rivera, que nos dejó de manera física durante este proceso, sin embargo, fue y sigue siendo el pilar de nuestra familia y mi soporte en todo sentido.

A mi mamá Mary Yaneth Rivera M. y mi hermana Vanessa Parra R., por ser mi base y por levantarse una y mil veces por mí y por este propósito, aún con cuerpos adoloridos y corazones incompletos.

A mi papá, Orlando Parra R., que me inculcó desde niña la ciencia, por creer en mí, por ser incondicional y mi compañero de campo.

A Luciana y Donna, por ser mi motivo y por hacerme la vida más bonita.

A mi guía y apoyo, por todo su conocimiento, inmensa paciencia y absoluto amor.

A mis tías que con su granito de arena hicieron esto realidad.

A la Universidad de Caldas por acogerme y junto a sus destacables docentes, brindarme todas las herramientas y conocimientos, haciéndome enamorar más de esta ciencia.

A mi asesora Lina Marcela Marín por su acompañamiento y dedicación durante el desarrollo del trabajo de grado.

Tabla de Contenido

1	Introducción	14
2	Objetivos	15
	2.1 <i>Objetivo general</i>	15
	2.2 <i>Objetivos específicos</i>	15
3	Localización	16
4	Marco Normativo	18
	4.1 <i>Ley 1523 de 2012</i>	18
	4.2 <i>Decreto 1807 de 2014</i>	19
5	Marco Teórico	25
	5.1 <i>Bases teóricas</i>	25
	5.2 <i>Definición de conceptos</i>	31
6	Metodología	50
	6.1 <i>Etapa preliminar</i>	50
	6.2 <i>Etapa de campo</i>	51
	6.3 <i>Etapa post-campo</i>	52
	6.3.1 <i>Inventario de Procesos Morfodinámicos</i>	52
	6.3.2 <i>Factores condicionantes</i>	53
	6.3.3 <i>Pesos de evidencia y análisis de susceptibilidad</i>	58
7	Contexto Geológico	61
	7.1 <i>Geología local</i>	64
	7.1.1 <i>Formación Saldaña (Js)</i>	65
	7.1.2 <i>Formación Caballos (Kc)</i>	66
	7.1.3 <i>Formación Hondita (Kh)</i>	67
	7.1.4 <i>Formación Hondita y Loma Gorda (Kh – Kl)</i>	68
	7.1.5 <i>Depósitos aluviales (Qal)</i>	68
	7.1.6 <i>Coluviones (Qc)</i>	68
	7.2 <i>Geología Estructural:</i>	71
	7.2.1 <i>Falla San Andrés:</i>	71
	7.2.2 <i>Pliegues</i>	72
8	Resultados	73
	8.1 <i>Inventario de procesos morfodinámicos:</i>	73

8.2	<i>Mapas de factores condicionantes:</i>	75
8.2.1	Unidades Geológicas Superficiales (UGS):.....	75
8.2.2	Elementos Geomorfológicos:.....	84
8.2.3	Pendientes:	90
8.2.4	Curvatura de perfil y de plano:	92
8.2.5	Índice de rugosidad:	95
8.2.6	Área de acumulación de flujo:	96
8.2.7	Cobertura vegetal y uso del suelo:	97
8.3	<i>Pesos de evidencia y análisis de susceptibilidad:</i>	100
9	Conclusiones	108
10	Recomendaciones	110
11	Referencias.....	111
12	Anexos	116

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.....	17
Figura 2. Escalas de trabajo según lo que dicta el Decreto 1807 de 2014..	20
Figura 3. Clasificación para los tipos de movimientos gravitacionales.....	27
Figura 4. Deslizamientos rotacionales y traslacionales.....	28
Figura 5. Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000.	30
Figura 6. Esquema de jerarquización geomorfológica.....	33
Figura 7. Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa.	34
Figura 8. Esquema representativo de la curvatura de perfil.....	35
Figura 9. Esquema representativo de la curvatura de plano.....	36
Figura 10. Unidades Geológicas Superficiales según su origen..	38
Figura 11. Influencia relativa de la vegetación natural y seminatural en la estabilidad de los taludes.....	41
Figura 12. Leyenda de usos de suelo..	42
Figura 13. Relación de factor condicionante (Bi) y deslizamientos (S). .	47
Figura 14. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante..	47
Figura 15. Representación cartográfica y simbólica de los atributos para movimientos en masa tipo deslizamiento. .	53
Figura 16. Diagrama de flujo de procedimientos para la obtención de las variables continuas, empleando el software ArcMap..	54
Figura 17. Nomenclatura sugerida para unidades geológicas superficiales (rocas y suelos).....	57
Figura 18. Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.	58

Figura 19. Esquema general para el cálculo del Índice de Susceptibilidad por movimientos en masa.....	60
Figura 20. Mapa geológico a escala original 1:100.000.	64
Figura 21. Afloramiento de la unidad geológica Formación Saldaña en la Vereda Alto San Miguel.	66
Figura 22. Afloramiento de la unidad geológica Formación Caballos en la vereda Alto San Miguel.	67
Figura 23. Afloramiento de la unidad geológica Formación Hondita en la vereda Alto San Miguel.	68
Figura 24. Depósito coluvial en la vereda Alto San Miguel..	69
Figura 25. Mapa de Unidades Geológicas para la vereda Alto San Miguel.	70
Figura 26. Mapa de Inventario de Procesos Morfodinámicos para la vereda Alto San Miguel..	74
Figura 27. Afloramiento de la unidad geológica superficial: roca intermedia de la Formación Hondita..	76
Figura 28. Afloramiento de la unidad geológica superficial: roca dura de la Formación Hondita..	77
Figura 29. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo residual a partil de la Formación Saldaña.	78
Figura 30. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita.	79
Figura 31. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo transportado de ignimbrita de la Formación Saldaña..	81
Figura 32. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo transportado coluvial.	82
Figura 33. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales para la vereda Alto San Miguel.	83
Figura 34. Rangos de longitud de la ladera usados para nombrar los elementos geomorfológicos.....	84
Figura 35. Mapa de Elementos Geomorfológicos para la vereda de Alto San Miguel.....	89
Figura 36. Mapa de Pendientes para la vereda Alto San Miguel.	91
Figura 37. Mapa de Curvatura de Perfil para la vereda Alto San Miguel.....	93

Figura 38. Mapa de Curvatura de Plano para la vereda Alto San Miguel..	94
Figura 39. Mapa de Índice de Rugosidad para la vereda Alto San Miguel.	95
Figura 40. Mapa de Área de Acumulación de Flujo para la vereda Alto San Miguel.	96
Figura 41. Mapa de Cobertura Vegetal y Usos del Suelo para la vereda Alto San Miguel.....	99
Figura 42. Gráfico de la curva ROC para los datos obtenidos del LSI y su área bajo la curva (AUC).....	103
Figura 43. Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en masa para la vereda Alto San Miguel.....	104

Lista de Tablas

Tabla 1. Nombres y tipos de variables explicativas usadas en el presente informe.....	32
Tabla 2. Área y porcentaje de los deslizamientos totales.....	73
Tabla 3. Rangos de pendientes utilizados con propósitos de análisis ingenieriles y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.....	90
Tabla 4. Rangos de curvatura de perfil y plano.....	92
Tabla 5. Estadísticas de la ocupación de la variable cobertura vegetal para la vereda Alto San Miguel.....	97
Tabla 6. Estadísticas de la ocupación de uso de suelos para la vereda Alto San Miguel.....	98
Tabla 7. Pesos de evidencia para la variable explicativa Geomorfología.....	100
Tabla 8. Pesos de evidencia para la variable explicativa Unidades Geológicas y Superficiales.....	100
Tabla 9. Pesos de evidencia para la variable explicativa Cobertura vegetal y usos del suelo. ...	101
Tabla 10. Pesos de evidencia para la variable explicativa Pendientes.....	101
Tabla 11. Pesos de evidencia para las variables explicativas curvatura de plano y de perfil.....	101
Tabla 12. Pesos de evidencia para la variable explicativa índice de rugosidad.....	101
Tabla 13. Pesos de evidencia para la variable explicativa área de acumulación de flujo.....	102
Tabla 14. Hipótesis de falla propuesta para el estudio.....	107

Lista de Anexos

Anexo 1. Clasificación del tamaño de grano en las rocas. Fuente: SGC (2017).	116
Anexo 2. Clasificación de las rocas en general según su textura/estructura.	116
Anexo 3. Rangos de clasificación de macizo según el GSI.	116
Anexo 4. Descripción y comportamiento del perfil de meteorización.	117
Anexo 5. Terminología para describir la humedad natural o condición de humedad en el campo. 117	117
Anexo 6. Texturas de los suelos según el tamaño de las partículas.	118
Anexo 7. Carta de comparación visual de la redondez y esfericidad de los clastos o granos. ...	118
Anexo 8. Tipos de gradación.	118
Anexo 9. Tipos de empaquetamiento o estructuras de soporte en depósitos.	119
Anexo 10. Criterios para describir la compacidad. Fuente: U.S. Bureau of Reclamation (2001), en SGC (2017).	119
Anexo 11. Terminología para describir la densidad relativa de los suelos arenosos. Fuente: SGC (2013), en SGC (2017)	119
Anexo 12. Tabla de comparación visual para la clasificación de la selección (sorteamiento) de las partículas. Fuente: Coe et al. (2010), en SGC (2017)	120

Resumen

La vereda Alto San Miguel del municipio de Paicol - Huila, es un área propensa a la ocurrencia de deslizamientos, lo cual hace necesario que, dentro de la planificación territorial, se realice estudios de Susceptibilidad por movimientos en masa, debido a que esta información contribuye en la prevención y mitigación del riesgo.

La práctica académica realizada en la Secretaría de Planeación y Obras Públicas de la Alcaldía de Paicol fue ejecutada en un periodo de cuatro meses, realizando trabajo de campo y de oficina, usando herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) para la obtención e integración de los datos, y finalmente elaboración del mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda. Se analizaron y utilizaron ocho condicionantes de deslizamientos de tipo polígono y tipo ráster, se procesaron y calcularon a partir del método estadístico bivariado Pesos de Evidencia, obteniendo así la función final de Susceptibilidad o Landscape Susceptibility Index (LSI).

El resultado se representa por medio del mapa de Susceptibilidad, el cual se zonifica en alta, media y baja. Se observó que las áreas con alta densidad de movimientos en masa y de erosión, se relacionan con una Susceptibilidad alta; las zonas de Susceptibilidad media se asocian a áreas de baja densidad de deslizamientos y procesos erosivos; la Susceptibilidad baja, se relaciona a áreas con una tasa de erosión menor que junto con sus factores condicionantes no propician la inestabilidad. La validación del método es estimada a partir de la curva Característica Operativa del Receptor (curva ROC), evidenciando un área bajo la curva (AUC) de 0,883, obteniendo un bajo grado de incertidumbre.

Abstract

The Alto San Miguel district of the municipality of Paicol - Huila, is an area prone to landslides, which makes it necessary that, within the territorial planning, studies of Susceptibility by Movements in Mass, because this information contributes to the prevention and mitigation of risk.

The academic practice carried out in the Planning and Public Works Secretariat of the Paicol Mayor's Office was executed in a period of four months, performing field and office work, using GIS tools (Geographic Information Systems) to obtain and integrate data, and finally elaborate the map of Susceptibility by Movements in Mass for the village. Eight polygon and raster type landslide conditions were analyzed and used, processed and calculated using the bivariate statistical method Weights of Evidence, thus obtaining the final function of Susceptibility or Landscape Susceptibility Index (LSI).

The result is represented by the Susceptibility map, which is zoned as high, medium and low. It was observed that areas with a high density of mass movements and erosion are related to high susceptibility. Medium susceptibility zones are associated with areas of low density of landslides and erosion processes. Low susceptibility is related to areas with a lower erosion rate that, together with their conditioning factors, do not favor instability. The validation of the method is estimated from the Receiver Operating Characteristic curve (ROC curve), showing an area under the curve (AUC) of 0.883, obtaining a low degree of uncertainty.

1 Introducción

En países tropicales como Colombia, los movimientos en masa hacen parte de las amenazas naturales con mayor índice de ocurrencia, estos son responsables de abundantes pérdidas y afectaciones tanto humanas como económicas. Por este motivo se hace necesario para el Estado implementar una serie de medidas establecidas en leyes y decretos, que cada gobernante debe ejercer en su periodo. El decreto 1807 de 2014, incorpora la Gestión del Riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial, en este, se dictaminan los insumos necesarios para la elaboración de mapas de susceptibilidad por movimientos en masa. Según Van Westen et al., (1999), los movimientos en masa son procesos morfodinámicos controlados por una combinación de factores como el tipo de roca, la pendiente y el tipo del suelo que provocan inestabilidad en el terreno. Estos requisitos los sugiere el Servicio Geológico Colombiano (2017) y comprenden datos categóricos o discretos (capas vectoriales) como la geomorfología, unidades geológicas superficiales, cobertura vegetal y uso del suelo, junto con datos continuos de tipo ráster, derivados del DEM (Modelo de elevación digital o digital elevation model) como lo son las pendientes, curvatura de plano, curvatura de perfil, rugosidad y área de acumulación de flujo, integrados con el inventario de procesos morfodinámicos.

En el presente informe se presenta el análisis y la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda Alto San Miguel, Paicol – Huila, apoyando al equipo de la Secretaría de Planeación y Obras Públicas de la Alcaldía.

Para alcanzar este fin se utilizó la probabilidad condicionada en las variables explicativas evidenciables y consecuentemente se expone la metodología y los resultados de la obtención de los pesos de evidencia para cada especificación junto con el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:10.000 para la vereda Alto San Miguel ubicada en el municipio de Paicol – Huila.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Apoyar a la Secretaría de Planeación y Obras Públicas de la Alcaldía de Paicol-Huila, en lo que se refiere a la gestión del riesgo, delimitando y zonificando movimientos en masa y caracterizando geoambientalmente el área de estudio seleccionada, con el fin de aumentar el conocimiento geológico de la zona y sus posibles afectaciones.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Recolectar información básica, mediante bibliografía y trabajo de campo, con fines de elaborar los insumos necesarios para el estudio y evaluación de movimientos en masa.
- ✓ Realizar el inventario de procesos morfodinámicos en la zona de estudio.
- ✓ Elaborar y reajustar los mapas temáticos a escala 1:10.000 para la vereda Alto San Miguel.
- ✓ Generar el análisis y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa para el suelo rural ubicado en la vereda Alto San Miguel a escala 1:10.000.
- ✓ Participar en la generación de conceptos técnicos sobre lo que refiere a movimientos en masa, analizando e interpretando la caracterización geoambiental en estas áreas y su posible afectación a la población aledaña.

3 Localización

La cuenca del Valle Superior del Magdalena se encuentra ubicada entre las Cordilleras Central y Oriental al suroccidente de Colombia, esta región es comprendida por los departamentos del Huila y el Tolima. Al suroccidente del departamento del Huila, se encuentra el municipio de Paicol, el cual se ubica sobre el borde occidental de la cuenca y sobre el flanco oriental de la Cordillera Central. Este municipio, al norte limita con los municipios de Tesalia y Nátaga, al sur con los municipios del Agrado y el Pital, al este con el municipio de La Plata y al oeste con el municipio de Gigante. La cabecera municipal se ubica a los $2^{\circ}26'59''$ N $75^{\circ}46'26''$ W (WGS84), su altura promedio es de 886 metros sobre el nivel del mar.

Paicol, posee una extensión de 278 km^2 , los cuales $0,72 \text{ km}^2$ comprenden la zona urbana y $277,55 \text{ km}^2$ la zona rural. El municipio ocupa el 1,39% del área total del departamento del Huila. El área de estudio corresponde a la vereda Alto San Miguel, que se encuentra al noroccidente del municipio y ocupa el 5,26% del área total. Caracterizado por una topografía montañosa.

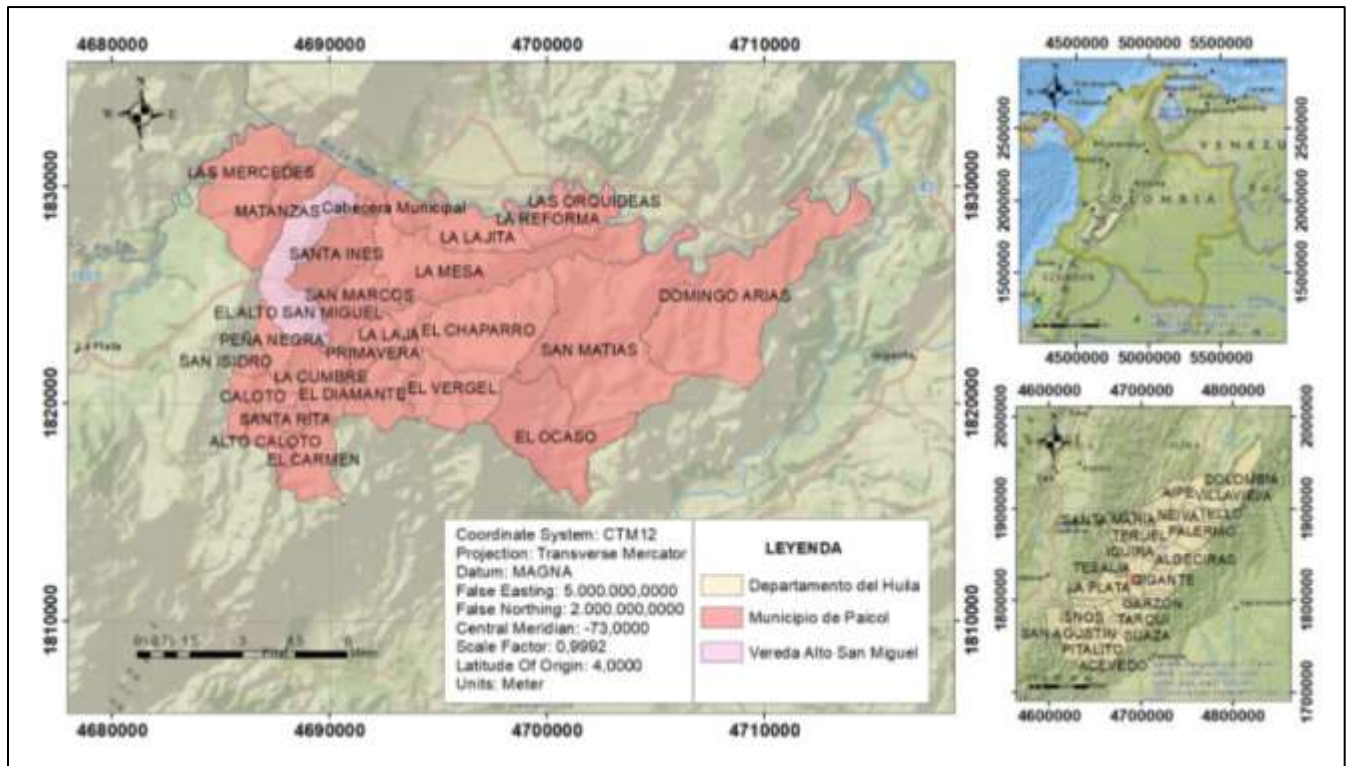


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Ubicación departamental, municipal y local de la zona de estudio. Fuente: Mapa Base tomado de ArcMap y elaboración propia.

4 Marco Normativo

El presente trabajo se realizó en cumplimiento de la Ley 1523 de 2012 *“Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”*; el Decreto 19 de 2012 *“Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública.”*, este Decreto no será mencionado de manera minuciosa, debido a que está reglamentado por el Decreto 1807 de 2014 *“ Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.”*, este será con el cual se registrará el presente documento en su elaboración y entrega. Además, la ley 388 de 1997 *“Reglamentada por los Decretos Nacionales 150 y 507 de 1999; 932 y 1337 de 2002; 975 t 1788 de 2004; 973 de 2005; 3600 de 2007; 4065 de 2008; 2190 de 2009; reglamentada parcialmente por el Decreto Nacional 1160 de 2010 Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones.”*; la cual también está expuesta en el decreto mencionado anteriormente y por lo cual no será abordado a detalle.

De acuerdo con estas leyes y decretos se desarrollan ciertos artículos específicos, los cuales son materia de exposición en lo que refiere a la gestión del riesgo, ordenamiento territorial y estudios básicos de amenaza por movimientos en masa.

4.1 Ley 1523 de 2012

Capítulo I

Este capítulo define La Gestión de Riesgo de Desastres en su artículo 1º; en el apartado de sus responsabilidades (artículo 2º) se dictamina que las entidades públicas, privadas y comunitarias

que les compete esta materia deberán conocer y reducir el riesgo, además de manejar los desastres en el marco de sus competencias, su ámbito de actuación y su jurisdicción; en adición, el artículo 3º, trata sobre los principios generales que orientan la gestión del riesgo, donde se encuentra el principio de gradualidad, número 10, que expone que “La gestión del riesgo se despliega de manera continua, mediante procesos secuenciales en tiempos y alcances que se renuevan permanentemente. Dicha gestión continuada estará regida por los principios de gestión pública consagrados en el artículo 209 de la Constitución y debe entenderse a la luz del desarrollo político, histórico y socioeconómico de la sociedad que se beneficia.”

4.2 Decreto 1807 de 2014

Título I

Disposiciones generales.

Artículo 2º este artículo tiene en cuenta el principio de gradualidad de la Ley 1523 de 2012, que se nombró anteriormente, y expone que se deben realizar estudios básicos para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes y en su ejecución se deben realizar los estudios detallados.

El Artículo 3º menciona qué estudios básicos se deben elaborar para la revisión o expedición de Planes de Ordenamiento Territorial (POT), para su revisión a mediano y largo plazo o la expedición de nuevos planes, nombrando el deber de realizar estudios de suelo (sea rural, urbano o de expansión urbana) para los fenómenos amenazantes: inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa; además de que se debe delimitar y zonificar las áreas de amenaza y de

riesgo en las que se requiere adelantar los estudios detallados y determinar las medidas de intervención mediante la determinación de normas urbanísticas.

Artículo 5° de acuerdo con la Ley 388 de 1997 la cual establece clases de suelo (Urbano, expansión urbana y rural), este artículo expone las escalas mínimas con las que se elaborarán los estudios teniendo en cuenta el suelo en donde se hará la zonificación.

TIPO DE ESTUDIO	CLASE DE SUELO	ESCALA
Estudio Básico	Urbano	1:5.000
	Expansión Urbana	1:5.000
	Rural	1:25.000
Estudio Detallado	Urbano	1:2.000
	Expansión Urbana	1:2.000
	Rural Suburbano	1:5.000

Figura 2. Escalas de trabajo según lo que dicta el Decreto 1807 de 2014. Fuente: tomada del decreto 1807 de 2014.

(...)

Título II

Condiciones técnicas para la elaboración de estudios básicos y detallados.

El Artículo 6° trata sobre el análisis de información disponible para la elaboración de, en este caso, los estudios básicos, considerando los siguientes aspectos:

“1. Recopilar y analizar la información contenida en el plan de ordenamiento territorial, estudios regionales, técnicos o informes técnicos, cartografía base, la información de las bases de datos institucionales y la información de redes de monitoreo de amenazas existentes.

2. Verificar si se cuenta con la delimitación y zonificación de amenaza y/o riesgo para el municipio o distrito (suelo urbano, expansión urbana y suelo rural) y que la misma cumpla como mínimo con los siguientes aspectos:

a) Que corresponda al análisis del área urbana, expansión urbana y rural del municipio o distrito, se ajuste a las condiciones técnicas establecidas en el presente decreto y esté acorde con su situación actual. La información se podrá emplear siempre y cuando se verifique su pertinencia y se actualice cuando se requiera;

b) Que la información técnica disponible corresponda al análisis de las áreas en las que se hayan evidenciado afectaciones en el municipio o distrito.

3. En caso de que se cuente con estudios detallados que permitan establecer el nivel de riesgo, se deberá verificar que los mismos cumplan con las condiciones técnicas establecidas en el presente decreto.

Con base en este análisis se deberá establecer la información técnica disponible correspondiente a la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y de las áreas con condiciones de riesgo. En los casos de ausencia total o parcial de la información, se deben establecer las acciones técnicas, institucionales y financieras necesarias para elaborar esta información.”

(...)

Capítulo I

Condiciones técnicas para la elaboración de estudios básicos

El Artículo 8° rige qué especificaciones mínimas son necesarios en los estudios para así determinar las condiciones de amenaza para movimientos en masa, para cada clase de suelo; en este trabajo trataremos lo expuesto a detalle en el artículo anteriormente mencionado para suelo rural.

(...)

“1. *Área de estudio:* Se adelantará este tipo de estudios en todas las zonas de relieve escarpado, montañoso y ondulado, con pendientes iguales o superiores a 5 grados más los taludes marginales de cauces, así como las zonas planas que puedan recibir los efectos de los movimientos en masa.

Adicionalmente, se consideran aquellas áreas urbanas y de expansión urbana que teniendo una pendiente menor a 5 grados hayan presentado problemas de inestabilidad y subsidencia debido a problemas geotécnicos o al desarrollo de actividades antrópicas.

2. *Insumos:* Para suelos urbanos, de expansión urbana y rural, se deben utilizar como mínimo los siguientes insumos que son elaborados o ajustados y evaluados a la escala de trabajo correspondiente:

a) Cartografía base que contenga entre otros: coordenadas, curvas de nivel, drenajes, red vial, infraestructura y equipamientos, asentamientos humanos;

b) Inventario de procesos morfodinámicos.

En la elaboración de los estudios para suelos urbanos y de expansión urbana, adicionalmente se elabora: la geología para ingeniería y la geomorfología aplicada a movimientos en masa a nivel de elementos geomorfológicos.

En la elaboración de los estudios para suelos rurales, adicionalmente se realiza: la geología, unidades geológicas superficiales, la geomorfología aplicada a movimientos en masa a nivel de subunidades geomorfológicas y cobertura y uso del suelo.

3. **Alcance:** La determinación de las condiciones de amenaza por movimientos en masa deberá integrar las diferentes variables que inciden en la ocurrencia tanto actual como futura de estos fenómenos. Se deben considerar dentro de los agentes detonantes los siguientes factores: agua, sismo y procesos antrópicos (cortes, excavaciones, rellenos y construcciones en general).

Para el suelo urbano y de expansión urbana se utilizará, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: estadísticos, determinísticos o probabilísticos.

Para los suelos rurales se utilizará, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: de inventarios, heurísticos o estadísticos.

En todo caso, los análisis se realizarán en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información.

4. **Zonificación:** Para la zonificación de la amenaza, esta se categorizará en alta, media y baja, que se establece según el método empleado. En todo caso las áreas con procesos activos se consideran en la categoría alta.

5. **Productos:** Como resultado de los estudios, se elaboran los mapas de zonificación de amenaza por movimientos en masa, según lo dispuesto en el presente artículo. La leyenda deberá incluir la descripción de las características físicas de las unidades según la categoría establecida, los tipos de procesos predominantes y los posibles daños que se pueden generar.

Se deberá elaborar un documento técnico que contenga la metodología empleada y los resultados obtenidos.”

5 Marco Teórico

5.1 Bases teóricas

Este trabajo se basará y regirá, como se mencionó anteriormente, bajo unos parámetros normativos que se tienen en cuenta a nivel nacional para el desarrollo y resultado de estudios de susceptibilidad, amenaza y riesgo; en este, se abarcarán términos y materias ya nombradas: gestión del riesgo, ordenamiento territorial y estudios básicos para zonificación de susceptibilidad y amenaza en movimientos en masa, adicionalmente, se definirán conceptos específicos para el entendimiento de este.

La Ley 1523 de 2012, la cual define la gestión del riesgo de desastres, en su artículo 1° denomina esto, como un proceso social orientado a todas las actividades que se realizan para obtener una planificación del desarrollo seguro, en cada nivel de gobierno, desplegándose principalmente en tres actividades primordiales para este fin, las cuales son: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres, con el objetivo de aportar la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

En esta misma Ley, en su artículo 14° expone a los alcaldes como conductores del desarrollo social y como responsables directos de la implementación de los procesos de gestión del riesgo, por lo que, en su administración, a través de los planes de ordenamiento territorial (POT) o esquemas de ordenamiento territorial (EOT), deberán gestionar y planificar el desarrollo local junto con acciones estratégicas y prioritarias en materia de gestión del riesgo de desastres.

Ahora bien, en el artículo 4° de la misma, define la amenaza como “Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera 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.”

En el Decreto 1807 de 2014 se incluyen los estudios básicos para la revisión o expedición de Planes de Ordenamiento Territorial (POT), en donde regula las condiciones técnicas mínimas para la elaboración de dichos documentos, en cada uno de los tres fenómenos amenazantes mencionados y tratados en el decreto (inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa).

Debido a que el presente documento trata sobre la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, es imprescindible entender las definiciones de los procesos que se estudiarán en el mismo; el SGC (2016), define los movimientos en masa como un equivalente a los términos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas; la terminología y clasificación de movimientos en masa mostrada en este documento es conforme a la Guía para la Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2017), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, detritos o de tierras por efectos de gravedad.

La clasificación más comúnmente usada para identificar distintos tipos de movimientos en masa es la de Varnes (1978), la cual establece el tipo de movimiento junto con el material involucrado en el mismo (Figura 3).

TIPO DE MOVIMIENTO		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
			De grano grueso	De grano fino
Caídas		Caídas de rocas	Caídas de ditritos	Caídas de suelos
Básculamientos		Básculamientos de rocas	Básculamientos de ditritos	Básculamientos de suelos
Deslizamientos	Rotacionales	Deslizamiento rotacional de rocas	Deslizamiento rotacional de ditritos	Deslizamiento rotacional de suelos
	Traslacionales	Deslizamiento traslacional de rocas	Deslizamiento traslacional de ditritos	Deslizamiento traslacional de suelos
Separaciones laterales		Separación lateral en roca	Separación lateral en ditritos	Separación lateral en suelos
Flujos		Flujo de ditritos	Flujo de ditritos	Flujo de suelos
Complejos		Combinación de dos o más tipos		

Figura 3. Clasificación para los tipos de movimientos gravitacionales. Fuente: Varnes (1978)

En este documento se analizará y zonificará la susceptibilidad por deslizamientos, Cruden y Varnes (1996) definen estos como un movimiento ladera abajo que suceden a lo largo de una superficie de ruptura o zonas de intensa deformación cortante, transportando masas de suelos y rocas.

Estos autores proponen tres tipos básicos de deslizamientos: rotacional, traslacional y compuesto, dependiendo de la manera como falla el terreno (Figura 4).

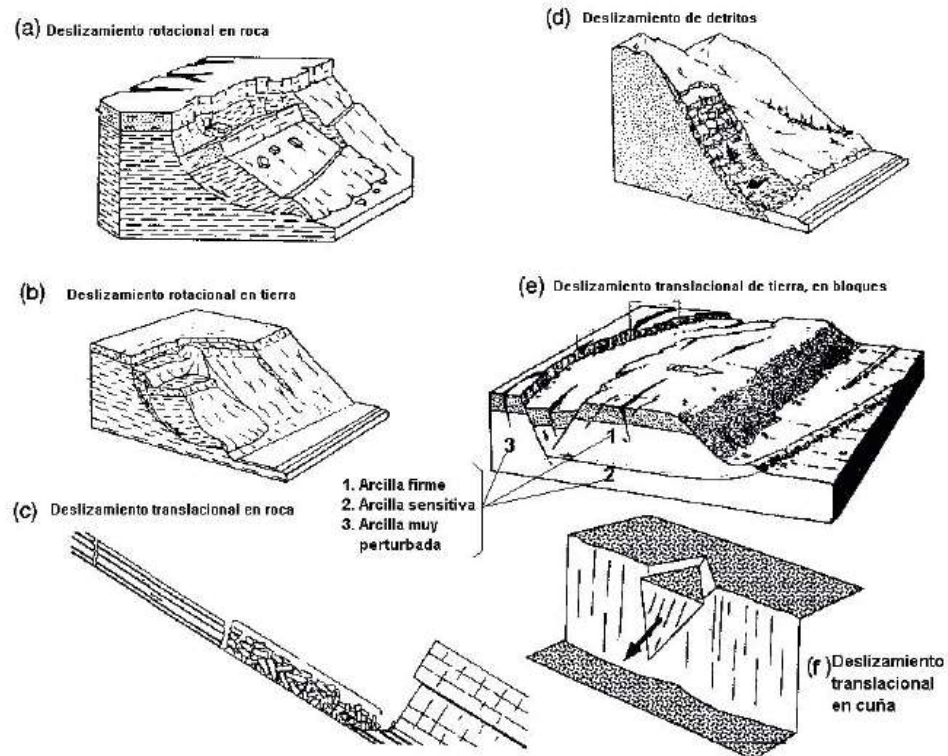


Figura 4. Deslizamientos rotacionales y traslacionales. Fuente: Cruden & Varnes (1996).

Para analizar e interpretar los movimientos en masa es sumamente necesario comprender y abarcar diferentes materias pertenecientes a las ciencias de la tierra, como lo son la geología, geomorfología, geotecnia, hidrología, entre otras, además, de contar con un vasto conocimiento del área de trabajo.

Para lograr la generación de un modelo de análisis de un mapa de susceptibilidad, se debe hacer un levantamiento de información en campo, con un nivel de detalle que dependerá del tipo de estudio que se esté realizando, además, se debe aplicar el uso de las herramientas SIG, las cuales son de gran importancia al momento de procesar e interpretar datos; el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) propone tres etapas para realizar el análisis de movimientos en masa, sus características y factores causales. Estas etapas son (Figura 5):

1. Caracterización geoambiental.
2. Análisis de susceptibilidad.
3. Caracterización de la amenaza.

La caracterización geoambiental, como lo dice su nombre, está definida por el conocimiento de las características geoambientales, ya que la presencia o ausencia de estas pueden determinar la ocurrencia o no de un movimiento en masa en un área determinada. Esta etapa se basa en la recolección de información y datos tanto bibliográficos como recolectados por un levantamiento de la zona en campo sobre la geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso de suelo, de manera que junto al inventario de procesos morfodinámicos (IPM), se logre elaborar un modelo de susceptibilidad; y si llegara a ser el caso, con el análisis de los factores detonantes (lluvia y sismos), se logre zonificar la amenaza.

El análisis de susceptibilidad propone la aplicación de un método estadístico bivariado denominado “Pesos de Evidencia” o “Weight of Evidence” (WofE). “La Teoría de la evidencia (WoE) es una versión log-lineal del teorema de Bayes utilizado para calcular la probabilidad basada en el concepto de probabilidad previa y posterior” (Pamela et al., 2018). “A través de su implementación, es posible calcular la importancia relativa de los factores condicionantes con un significado estadístico” (Iliá y Tsangaratos, 2016). Además, es un método cuantitativo que está basado en un conjunto de datos y especificaciones (factores condicionantes), que tiene el objetivo de obtener y calcular la estabilidad e inestabilidad de un área determinada, en forma de un modelo de susceptibilidad y amenaza.

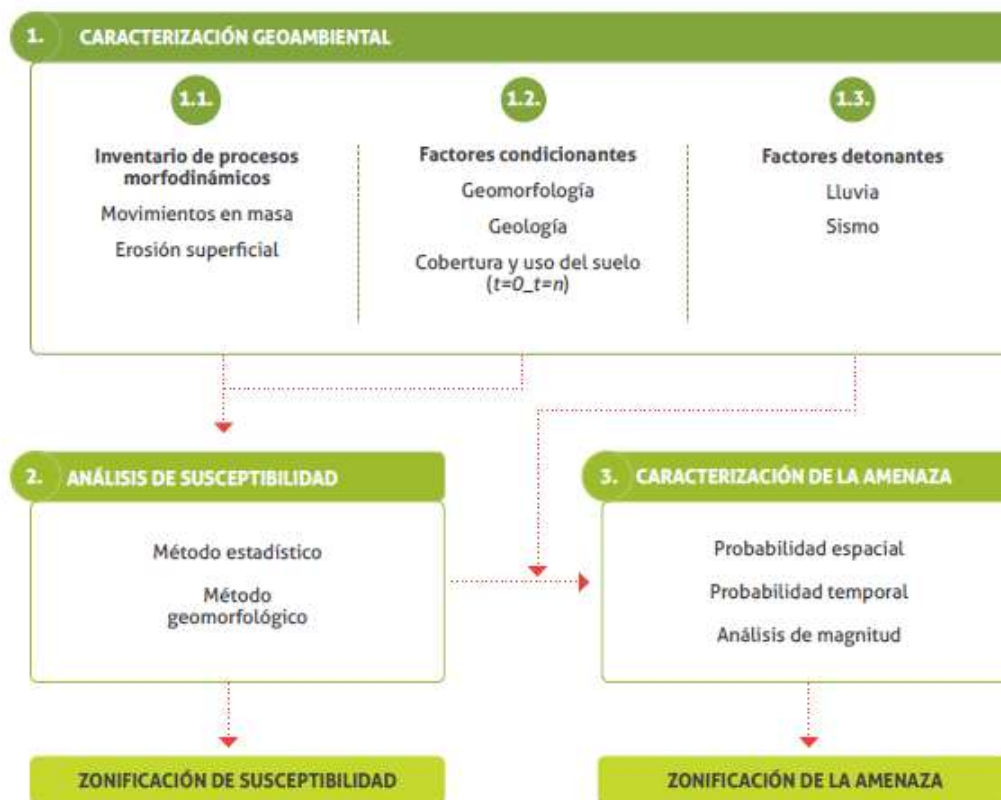


Figura 5. Marco de referencia para el análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000. Fuente: SGC (2017).

Por último, la Amenaza es definida por el SGC (2016) como evento físico o condición peligrosa de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, capaz de 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. La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia. La magnitud se suele expresar cuantitativamente como una media del tamaño del evento (volumen o área) y la intensidad (relacionada con el potencial destructivo del evento) con parámetros cuantitativos o cualitativos tales como velocidad máxima del evento, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad, descarga pico por unidad de ancho

o energía cinética por unidad de área. El SGC (2017) define la susceptibilidad a movimientos en masa como una medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa presentes o que probablemente puedan ocurrir en un área. Cruden & Varnes (1996) definen el término deslizamiento como un tipo de desplazamiento con un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca, predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas relativamente delgadas sometidas a intensos esfuerzos de corte

5.2 Definición de conceptos

A continuación, se definirán conceptos necesarios para abordar de mejor manera los mapas resultantes.

Inventario de procesos morfodinámicos (IPM)

“La elaboración del inventario de procesos morfodinámicos debe permitir entender la ocurrencia de los movimientos en masa y sus características más importantes” (Ingeominas, 2001). Este inventario incluye fecha de ocurrencia, localización (como punto o polígono), forma, dimensiones, los factores condicionantes que intervinieron o intervienen en su ocurrencia o su posible ocurrencia, el mecanismo que conduce a la falla del terreno, los factores detonantes, la dinámica del movimiento además de magnitud e intensidad, SGC (2017).

La caracterización morfodinámica identifica y muestra rasgos geomorfológicos que son evidencia de la evolución de los procesos denudativos que ocurren en una zona específica.

Factores condicionantes

Son determinados por las condiciones geológicas y ambientales presentes en la zona de estudio, ocho variables específicas se tendrán en cuenta, las cuales están directamente relacionadas con la ocurrencia de movimientos en masa y se mencionan a continuación: geomorfología (V1), las unidades geológicas superficiales (V2), la cobertura vegetal y usos de suelo (V3). para las

variables cuantitativas continuas derivadas del DEM, se escogieron: pendientes (X1), curvatura de plano (X2), curvatura de perfil (X3), índice de rugosidad (X4) y área de acumulación de flujo (X5). A todas estas variables categóricas se les aplica el cálculo de susceptibilidad.

A continuación, se presentará (Tabla 1) los nombres de las variables y el tipo de dato respectivo para cada una.

Tabla 1. Nombres y tipos de variables explicativas usadas en el presente informe. Fuente: propia.

Variable	Nombre	Tipo de dato	Tipo de variable
P	Inventario de procesos morfodinámicos	Polígono	Constante
V1	Geomorfología	Polígono	Categórica
V2	Unidades Geológicas Superficiales	Polígono	Categórica
V3	Cobertura vegetal y usos del suelo	Polígono	Categórica
X1	Pendientes	Ráster	Continua
X2	Curvatura de plano	Ráster	Continua
X3	Curvatura de perfil	Ráster	Continua
X4	Índice de rugosidad	Ráster	Continua
X5	Área de acumulación de flujo	Ráster	Continua

Geomorfología a nivel de elementos geomorfológicos

Según Van Westen et al. (2003) la zonificación de susceptibilidad y amenazas por movimientos en masa, la geomorfología comprende la variable explicativa más significativa para el análisis de la evolución del territorio y como se asocia con la ocurrencia de procesos erosivos intensos, existiendo metodologías de zonificación fundamentadas únicamente en el mapeo directo de unidades geomorfológicas, en las que la amenaza es definida directamente por profesionales expertos en el tema o por combinaciones cualitativas con otras temáticas relacionadas.

Debido a que la geomorfología integra los aspectos morfogenéticos, morfológicos, morfométricos y morfodinámicos que ayudan a comprender la génesis y los procesos endógenos y exógenos que han modelado el paisaje, es esencial realizar esta cartografía para un buen manejo ambiental y territorial de una región.

Según Carvajal (2012) un mapa geomorfológico aplicado para trabajos de zonificación de amenaza por movimientos en masa corresponde a la cartografía de las geoformas presentes sobre el relieve de una región. Estas geoformas están definidas por la morfología y morfometría del área estudiada, relación con los cambios litológicos de las unidades geológicas superficiales (rocas o suelos y la disposición estructural de estas).

Carvajal (2011), propone una jerarquización geomorfológica, la cual zonifica el terreno en categorías de unidades geomorfológicas que dependen del análisis de la geoforma y principalmente de la escala de trabajo, la cual permite clasificar tanto grandes extensiones de áreas geográficas ($<1:2.500.000$) como áreas de menor extensión ($>1:10.000$) (Figura 6).



Figura 6. Esquema de jerarquización geomorfológica. Fuente: Velásquez (1999) e Ingeominas (1999) en Carvajal (2012).

Morfometría

“La morfometría se dedica al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente” (SGC, 2017). Para este análisis y clasificación se utiliza principalmente modelos de elevación digital (DEM), los cuales guardan información en cada píxel de alturas de una superficie y así mismo permiten generar mapas de variables cuantitativas continuas necesarias para el presente estudio, que corresponden a las pendientes, curvatura, rugosidad y área de acumulación de flujo, definidas a continuación:

Pendiente del terreno

Tener los valores de pendiente del terreno es fundamental en un estudio de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, ya que es una variable geométrica importante a tener en cuenta en estos trabajos, debido a que influye directamente (junto con otros factores condicionantes) en la ocurrencia o no de procesos erosivos. La pendiente está expresada en grados (0 a 90°) y se define como el ángulo entre la superficie del terreno y la horizontal, y están categorizados en siete rangos, según el SGC (2017), de la siguiente manera (Figura 7):

INCLINACIÓN (°)	PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO
0-2	Plano a casi plano. No hay denudación apreciable.
2-4	Suavemente inclinado. Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos.
4-8	Inclinado. Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.
8-16	Moderadamente abrupto. Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglacial, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.
16-35	Abrupto. Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.
35-55	Muy abrupto. Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.
> 55	Extremadamente abrupto. Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente "denudación de escarpe"; susceptible a rodamiento de rocas.

Figura 7. Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa. Fuente: Van Zuidam (1986), en SGC (2017).

Curvatura

Esta variable cuantitativa permite determinar el grado de concavidad o convexidad en la superficie del terreno, esto se relaciona con los movimientos en masa en la medida de grado de concentración o separación de la escorrentía.

Para generar un modelo de curvatura se tienen en cuenta dos componentes según el SGC (2017): las curvaturas que se encuentran de manera paralela a la dirección de máxima pendiente y las cuales se asocian con la aceleración desaceleración de los cuerpos de agua que fluyen en esa superficie son denominadas curvatura de perfil. La curvatura de plano se encuentra de forma perpendicular a la dirección de máxima pendiente y se puede relacionar con la convergencia y divergencia de estos cuerpos.

Esta variable continua se categoriza en tres rangos según ArcGis Desktop (s.f.): un valor negativo indica la superficie es cóncava, un valor positivo indica una superficie convexa y un valor cercano a cero indica una superficie lineal (Figura 8 y 9).

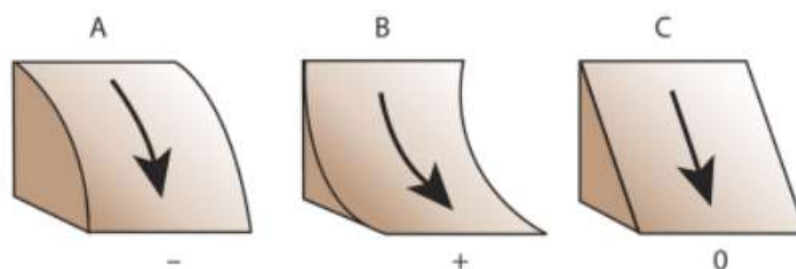


Figura 8. Esquema representativo de la curvatura de perfil. Fuente: ArcGIS Desktop (s.f.).

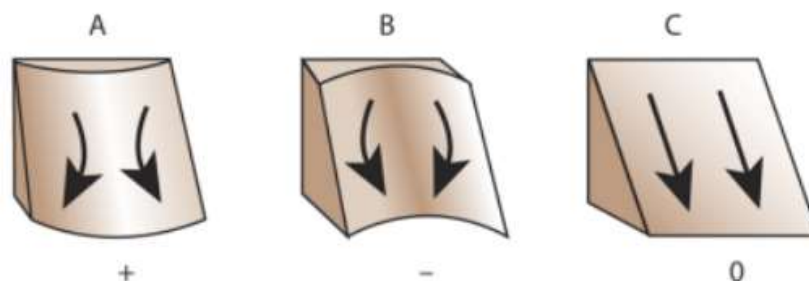


Figura 9. Esquema representativo de la curvatura de plano. Fuente: ArcGIS Desktop (s.f.).

Rugosidad

La rugosidad del terreno es una característica cuantitativa que está relacionada con la irregularidad o accidentalidad de la superficie de este. Esta se relaciona con la susceptibilidad por movimientos en masa dado que, a mayor rugosidad, mayor favorabilidad de infiltración de agua en el terreno y por lo tanto mayor inestabilidad en la ladera. Está categorizado en cinco rangos, según SGC (2013): rugosidad muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Área de acumulación del flujo

Es un área total por donde un sistema de escorrentía fluye hacia una salida determinada, se acumula y se recoge gran parte de la escorrentía. Esto se genera evaluando las direcciones de los flujos a favor de la pendiente, las zonas de acumulación y el área mínima de análisis. Las implicaciones directas con estos estudios se dan específicamente por el factor del agua y como aporta a la inestabilidad del terreno. El mapa resultante de este factor corresponde a una variable de tipo continua. La categorización que se le dio a este mapa está dividida en cinco, según SGC (2013): Divisoria de aguas, escorrentía lenta, flujo acumulado, drenaje no permanente y quebradas o ríos.

Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) corresponden a un conjunto (homogéneo)

de materiales geológicos que afloran en la superficie, que provienen del mismo origen y conservan en general las mismas características físicas y de comportamiento geomecánica, hasta algunas decenas de metros por debajo de la superficie del terreno. (Hermelín, 1985 e Ingeominas, 2004b, en SGC, 2017)

Cada formación superficial es el resultado de la ocurrencia de una serie de eventos y procesos exógenos y endógenos, responsables del modelamiento de la superficie y de la topografía actual, a causa de estos el terreno adquiere una serie de propiedades que lo convierten en más o menos susceptible a un movimiento en masa (SGC, 2017)

Estos mapas se derivan del mapa geológico de la zona de interés y junto con la geomorfología, son variables esenciales para el análisis de inestabilidad de laderas.

Caracterización general

Para la elaboración de los mapas de unidades geológicas superficiales se necesita en primer lugar describir y caracterizar las rocas y los suelos de interés en el estudio, teniendo en cuenta que las propiedades físicas que hoy en día poseen son el resultado de un conjunto de procesos y eventos a los que fue sometido el material, como su origen, diagénesis, historia tectónica, procesos endógenos y exógenos y que son causantes de lo que actualmente los definen junto con su comportamiento mecánico, estos parámetros a tener en cuenta se determinan según el SGC (2017):

Génesis: corresponde al origen del material, sean suelos o rocas. La clasificación de los suelos o rocas de acuerdo con su origen fue propuesta por Hermelín (1985) (Figura 10).

TIPO DE MATERIAL	ORIGEN DE LA UGS	TIPO DE UGS
Roca	Roca inalterada	<ul style="list-style-type: none"> Roca dura (Calidad de macizo buena y muy buena) Roca intermedia (Calidad de macizo regular) Roca blanda (Calidad de macizo mala y muy mala)
	Derivadas de roca In situ	<ul style="list-style-type: none"> Suelo residual: Horizontes IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI.
Suelo	Depósitos volcánico-lásticos primarios	<ul style="list-style-type: none"> Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
	Depósitos volcánico-lásticos secundarios	<ul style="list-style-type: none"> Lahar, avalancha de escombros
	Depósitos aluviales	<ul style="list-style-type: none"> Aluviones recientes y de cauce activo Llanura aluvial Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluvio-torrenciales
	Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> Suelos fluvio-lacustre Suelos paludales
	Depósitos costeros	<ul style="list-style-type: none"> Deltas, Barras, Playas, etc.
	Depósitos eólicos	<ul style="list-style-type: none"> Dunas y Médanos Loess
	Depósitos glaciares	<ul style="list-style-type: none"> Morrenas y Tillitas Suelos Fluvio-glaciares
	Depósitos de gravedad y ladera	<ul style="list-style-type: none"> Coluvial Talus, derrubios de pendiente Flujos (de lodo, tierra y de escombros)
	Depósitos antrópicos	<ul style="list-style-type: none"> Llenos de basuras Llenos de escombros Llenos mixtos

Figura 10. Unidades Geológicas Superficiales según su origen. Fuente: Hermelín (1985), en SGC (2017).

Litología: esta propiedad que comprende de características como su composición y estructura, permite definir y diferenciar las unidades entre rocas y suelos residuales, transportados y antrópicos (SGC, 2016).

Propiedades ingenieriles: cada tipo de roca o suelo, tiene una serie de propiedades que son el resultado de su origen, composición y eventos que sufrió posteriormente, por lo que su comportamiento geomecánico varía dependiendo del conjunto de procesos por los que haya atravesado el material, estas propiedades se someten al tipo de partículas que se encuentren presentes, sean macizos rocosos o suelos, dependiendo de su tamaño y en general se incluyen: dureza o resistencia, consistencia, condición de humedad, densidad relativa y compacidad.

Clasificación geomecánica: el comportamiento geomecánico de macizos rocosos puede ser analizado y clasificado de acuerdo con su potencial para ser usado en determinadas aplicaciones (Gonzalez de Vallejo et al., 2002, en SGC, 2017).

Como insumo para la definición de las UGS correspondientes a roca con fines de zonificación de amenazas por movimientos en masa, se propone como mínimo el uso del índice geológico de resistencia (GSI, por sus siglas en ingles), el cual es un sistema que utiliza el carácter geológico del material rocoso junto con la evaluación visual del macizo, como una forma para la selección de parámetros que permiten la predicción de su resistencia y deformabilidad. (Marinos et al., 2005, en SGC, 2017)

El GSI está basado en una valoración de la litología, la estructura y las condiciones de las superficies de discontinuidades dentro del macizo rocoso, y es estimado mediante un examen visual de macizo rocoso en los afloramientos, en excavaciones superficiales como en cortes de carretera y en las caras de túneles y núcleos de testigos. (Marinos et al., 2007, en SGC, 2017)

Grado de meteorización: afecta directamente a la resistencia y comportamiento mecánico del macizo rocoso, modificándole sus propiedades físicas iniciales, transformándolos en perfiles de meteorización con propiedades mucho más débiles. Dearman (1974), clasifica seis tipos de horizontes, de los cuales los primeros (I, II, III) se define aún como rocas, entre roca fresca y macizo rocoso meteorizado, y los horizontes IV, V y VI se definen como suelos, entre saprolito grueso, saprolito fino y suelo residual, respectivamente.

Rasgos estructurales: según el SGC (2017), esta propiedad evalúa la densidad de los rasgos estructurales como pliegues y fracturas, que se presentan en un área determinada, ya que estos son evidencia de la deformación de la corteza y de los procesos geodinámicos endógenos generados por la evolución de la corteza terrestre.

La clasificación de cada uno de estos parámetros que fueron utilizados para este estudio, tanto para macizos rocosos como para diferentes tamaños de suelos, estarán adjuntados en el apartado de Anexos.

Cobertura vegetal y uso de suelo

La cobertura de la tierra, es una variable categórica considerada estática dentro del análisis y modelaje de amenaza. Este factor contribuye de igual manera a la ocurrencia de movimientos en masa, debido a que pueden aportar de manera positiva o negativa a la estabilidad de una ladera, estos efectos se han descrito desde dos perspectivas, el factor mecánico e hidrológico, Charman & Murphy (2000) mencionan que uno de los efectos mecánicos que contribuyen favorablemente a la estabilidad al aumentar las fuerzas resistentes, son los que se asocian con factores como el control de la erosión, el soporte del suelo por enraizamiento, la resistencia del sistema suelo edáfico-raíces y protección del suelo. Por otro lado, Suarez (1998) nombra otro de los efectos mecánicos que se obtienen por la presencia de cobertura vegetal pero que no favorece a la estabilidad de las laderas, este es la sobrecarga que ejerce la vegetación y que se amplía por factores como la pendiente y la fuerza del viento. Además, los efectos hidrológicos que están asociados con la ocurrencia o no de un movimiento en masa, dependen de la acumulación del agua en la ladera por efectos de una baja o alta interceptación de la lluvia por parte de la cobertura vegetal presente, este factor puede generar un aumento de la capacidad de infiltración, cambios en la concentración de agua en el suelo por evapotranspiración y efectos sobre la conductividad hidráulica (Suarez, 1998; Van Westen et al., 2008, en SGC, 2017).

Así mismo, propiedades de la cobertura vegetal como tipo, densidad y profundidad de las raíces, tipología, tamaño y características de las especies vegetales, hacen que este factor pueda ser

generador de un movimiento en masa o que por el contrario incida favorablemente en la estabilidad de la ladera (Figura 11).

MECANISMOS	DESPLAZAMIENTOS SUPERFICIALES	DESPLAZAMIENTOS PROFUNDOS
MECANISMOS HIDROLÓGICOS		
Intercepción de la lluvia y nieve por la cobertura vegetal, lo que permite mayor evaporación y reduce el agua disponible a la infiltración.	B	B
El sistema radicular extrae agua del subsuelo para propósitos fisiológicos (vía transpiración), reduciendo los niveles de humedad del suelo.	B	B
El sistema radicular y la capa orgánica del subsuelo aumenta la rugosidad de la superficie e incrementa la capacidad de infiltración.	MA	MA
La disminución de la humedad del suelo puede causar grietas por desecación, aumentando la capacidad de infiltración y facilitando la llegada de agua al plano de falla a mayor profundidad.	MA	MA
MECANISMOS MECÁNICOS		
Las partes robustas de las raíces arbóreas sirven de anclaje del suelo a estratos subyacentes más estables.	B	MB
Las raíces robustas atraviesan planos de debilidad a lo largo de los flancos de deslizamientos potenciales.	B	B
Las raíces proporcionan una membrana de refuerzo a la capa del suelo y al aumento de resistencia al corte del suelo.	B	B
Las raíces robustas de la vegetación arbórea anclan el suelo en el estrato firme, dando soporte a la capa superficial de suelo debido a su reforzamiento mecánico y efecto de arco.	B	MB
El peso de los árboles (sobrecarga) aumenta la fuerza actuante en sus componentes, normal y paralela a la dirección de la pendiente.	MA/MB	MA/MB
El viento transmite cargas dinámicas al subsuelo a través de los troncos de los árboles	A	MA
A = mecanismos adversos para la estabilidad; MA = Marginalmente adversa; MB = Marginalmente beneficioso; B = Mecanismos beneficiosos.		

Figura 11. Influencia relativa de la vegetación natural y seminatural en la estabilidad de los taludes. Fuente: SGC (2017).

Según el IDEAM (2012) el uso del suelo es la función y utilidad que presta un área específica de cobertura de la tierra para que esté a disposición del ser humano y sus actividades económicas, como por ejemplo el uso urbano o industrial, de reserva naturales y demás. El término uso se aplica al empleo o aprovechamiento cíclico o permanente que el ser humano da a los diferentes tipos de cobertura para satisfacer sus necesidades materiales o espirituales (IGAC,

2005b, en SGC, 2017). Es decir, que el uso está directamente relacionado con la actividad humana en un área específica o con las labores económicas del mismo (Figura 12).

NIVEL I	GRUPO DE USO	USO ACTUAL
1. Territorios artificializados	* Asentamiento	* Residencial
		* Comercial
	* Infraestructura	* Industrial
		*Infraestructura y transporte
		*Recreacional, deportivo o turístico
		* Transporte
	* Minería	*Materiales de construcción
		*Metales radiactivos
		* Minerales no metálicos
		* Minerales energéticos
* Otros usos	*Piedras preciosas	
	* Disposición de materiales líquidos	
	*Disposición de materiales sólidos	
	* Mina en abandono	
2. Territorios agrícolas	* Agricultura	* Cultivos transitorios intensivos
		* Cultivos transitorios semintensivos
		* Cultivo permanente intensivo
		* Cultivo permanente semi intensivo
	* Ganadería	* Pastoreo semi intensivo
		* Pastoreo intensivo
	* Otros usos	* Tierras en descanso
	* Agricultura	* Producción
	* Agroforestal	* Sistemas combinados de agricultura y forestería
	* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería
* Agropecuario	*Cultivos permanentes semi-intensivos con pastoreo extensivo	
* Agrosilvopastoril	*Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería	
* Silvopastoril	*Sistemas combinados de ganadería y forestería	
3. Áreas naturales y seminaturales	* Conservación	*Protección
	* Conservación	* Protección
		* Producción - Protección
	* Forestal	* Sistema forestal productor (FPD)
		* Sistema forestal protector (FPR)
	* Conservación	* Protección
	* Otros usos	* Pastoreo
	* Conservación	* Producción
		* Protección
	* Agroforestal	* Producción - Protección
	* Conservación	* Protección
	* Otros usos	* Tierras en descanso
	Otros usos	* Protección
* Sin uso	* Sin uso	
* Otros usos	* Restauración	
	* Recuperación	
* Otros usos	* Tierras en descanso	
4. Áreas húmedas	* Conservación	* Protección
	* Sin uso	* Protección
5. Superficies de agua	* Cuerpos de agua naturales	* Cuerpos de agua naturales
	* Cuerpos de agua artificiales	* Cuerpos de agua artificiales
	* Infraestructura	

Figura 12. Leyenda de usos de suelo. Fuente: IGAC (2005b) e IDEAM (2010) en SGC (2017).

Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa (1:10.000)

El SGC (2017) define la susceptibilidad por movimientos en masa como una medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área específica, el resultado es basado en el análisis de una serie de factores condicionantes y puede contener información sobre la velocidad e intensidad de estos procesos erosivos.

Un mapa de Susceptibilidad alberga información de la probabilidad que tiene un área con unas condiciones y variables específicas que coexisten en un mismo punto, de evidenciar un evento de movimiento en masa; delimitando y zonificando el territorio conforme al nivel de estabilidad que tiene la superficie.

Estos mapas son el resultado de un cálculo y análisis de susceptibilidad, el cual evalúa las condiciones del terreno mediante el estudio de los factores condicionantes mencionados anteriormente, por lo que el proceso a ejecutar es la base para la derivación de estos, por consiguiente, se logra una zonificación con información fiable y con resultados de baja incertidumbre.

Pesos de evidencia (WofE)

Este método hace parte de los métodos estadísticos bivariados para el estudio y cálculo de la Susceptibilidad por movimientos en masa. Se estiman a partir de su importancia relativa, es decir, son basados en datos (data-driven methods). Esta metodología evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables, mediante pesos. Se emplea un enfoque Bayesiano para el cálculo de los pesos de cada factor condicionante, el cual considera la probabilidad previa y condicional de que haya ocurrencia de un Movimiento en Masa (Bonham, 1994).

WofE predice áreas que son susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos (variables dependientes) mediante unos factores condicionantes.

“La Teoría de la evidencia (WoE) es una versión log-lineal del teorema de Bayes utilizado para calcular la probabilidad basada en el concepto de probabilidad previa y posterior” (Pamela, 2018)

Concepto y cálculo de la probabilidad previa

Según Van Westen (2002) la probabilidad previa de que un cierto píxel en el mapa se relacione con un deslizamiento es simplemente la densidad de deslizamientos en un área determinada, en otros términos, es el número total de píxeles deslizados sobre el número total de píxeles del área estudiada (ecuación 1). Esta probabilidad, está basada únicamente en el IPM. En la siguiente ecuación se presenta la formulación:

$$P_{prior} = P\{S\} = \frac{N_{pix} (Slide)}{N_{pix} (Total)}$$

Ecuación 1

$P_{prior} = P\{S\}$ = Probabilidad condicional de tener un deslizamiento (S).

$N_{pix} (Slide)$ = Número total de píxeles deslizados.

$N_{pix} (Total)$ = Número total de píxeles del área estudiada.

Concepto y cálculo de la probabilidad condicional

Cuando se dispone de más información sobre las variables explicativas X, es posible calcular la probabilidad condicionada que puede tener cierta unidad.

Según Van Westen (2002), la probabilidad condicional de tener deslizamientos, teniendo en cuenta que se está ubicado en una unidad determinada, es la densidad de deslizamientos que hayan dentro de esa misma unidad, calculada como el número de píxeles con deslizamientos en la unidad, dividido por el número total de píxeles en la unidad.

Se puede expresar como:

$$P\{S | B\} = \frac{P\{SB\} - Npix\{SB\}}{P\{B\} - Npix\{B\}}$$

Ecuación 2

$P\{S|B\}$ = La probabilidad condicional de tener un deslizamiento de tierras mientras se está en la unidad B.

Cálculo de pesos positivos (Wi^+) y negativos (Wi^-)

“El WoE calcula la relación espacial entre los factores causales (Bi) y la distribución de deslizamientos (S), en forma de pesos positivos (Wi^+) y negativos (Wi^-). Estos pesos positivos y negativos se calculan a partir de las proporciones de los logaritmos naturales” (Pamela, 2018).

Estos pesos se deben calcular para cada clase de cada factor.

La siguiente ecuación ilustra el teorema de Bayes (Van Westen *et al.*, 2003):

$$Wi^+ = \log \left(\frac{P\{Bi | S\}}{P\{Bi | \bar{S}\}} \right),$$

Ecuación 3

y

$$Wi^- = \log \left(\frac{P\{\bar{Bi} | S\}}{P\{\bar{Bi} | \bar{S}\}} \right)$$

Ecuación 4

Donde,

Bi = Presencia de un condicionante potencial de deslizamiento.

\bar{Bi} = Ausencia de un condicionante potencial de deslizamiento.

S = Presencia de deslizamiento.

\bar{S} = Ausencia de deslizamiento.

En el cual, los pesos positivos (Wi^+) indican la importancia de la presencia de un factor en la ocurrencia de un deslizamiento y los pesos negativos (Wi^-) indican la importancia de la ausencia del factor en la ocurrencia del mismo.

Si el valor del Wi^+ es positivo, quiere decir que la presencia de este favorece la ocurrencia de deslizamientos y si por el contrario es negativo entonces no es favorable.

Si el valor del Wi^- es positivo, quiere decir que la ausencia del factor favorece la ocurrencia de deslizamientos, y si por el contrario es negativo su ausencia no es favorable.

Cuando los pesos son cercanos a cero, quiere decir que no favorece al modelo, es decir, que no le aporta información valiosa.

Los pesos también se pueden expresar en términos de pixeles según Van Westen (2002), de la siguiente forma:

$$Wi^+ = \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}}$$

Ecuación 5

y

$$Wi^- = \frac{\frac{Npix2}{Npix2 + Npix1}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}}$$

Ecuación 6

Basándonos en las ecuaciones 3 y 4, Van Westen (2002) escribe los pesos de la evidencia en números de pixeles de la siguiente manera:

$$P\{Bi | S\} = \frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}, \quad P\{Bi | \bar{S}\} = \frac{Npix3}{Npix3 + Npix4},$$

$$P\{\bar{B}i | S\} = \frac{Npix2}{Npix2 + Npix1}, \quad P\{\bar{B}i | \bar{S}\} = \frac{Npix4}{Npix4 + Npix3}$$

Ecuación 7

Donde, $Npix$ = número de pixeles y $Npix1$, $Npix2$, $Npix3$, $Npix4$ son las cuatro posibles combinaciones entre Bi , $\bar{B}i$, S y \bar{S} (Figura 13 y 14).

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Figura 13. Relación de factor condicionante (Bi) y deslizamientos (S). Fuente: SGC (2017).

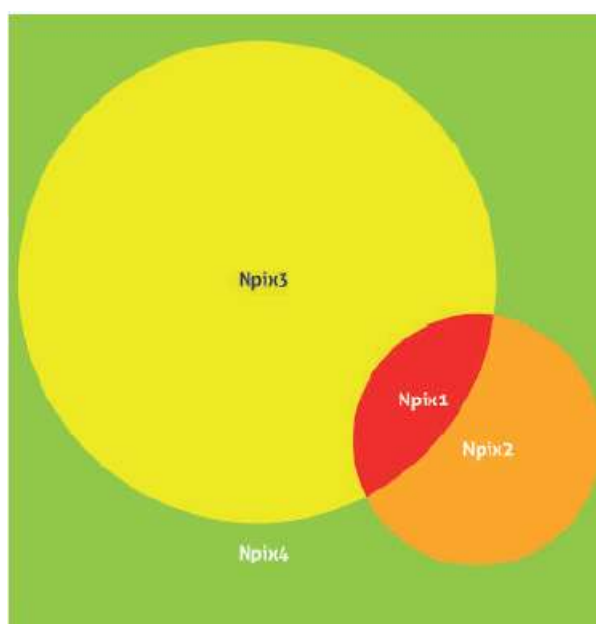


Figura 14. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante. Fuente: SGC (2017).

Factor de contraste o peso final (Wf)

Finalmente, cuando se obtienen los pesos de evidencia (ecuación 3 y 4), se calcula el peso final o factor de contraste, mencionado por Bonham-Carter (1994), el cual es una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa y se define como:

$$Wf = Wi^{+} + Wi^{-}$$

Ecuación 8

El peso final W_f será cero cuando la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando existe una asociación positiva (la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) y negativo cuando existe una asociación negativa (la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa). (SGC, 2017)

Esta función debe ser evaluada a través de la construcción de una curva ROC (Receiver Operating Characteristic o Característica Operativa del Receptor) o curva de éxito.

Curva ROC o curva de éxito

“La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la *LSI* en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías” (Dahal et al., 2008, citado por SGC, 2017).

En esta curva se relaciona en el eje de las abscisas la totalidad de la población (clases) medida en píxeles y representadas de manera descendente, siendo el 1% la clase más susceptible y 100% no susceptible (1-especificidad), con respecto al eje de las ordenadas, el cual grafica la porción de la población con ocurrencia de deslizamientos, también tomada en píxeles (sensibilidad).

De manera general, la curva se construye en términos del área total de la zona de estudio (NPC) y el área total de los deslizamientos considerados (N_{pix1}).

Finalmente, cuando la curva ROC esté construida se deberá validar con el valor del área bajo la curva (AUC) para establecer la calidad de ajuste de los datos; el SGC (2017) indica como porcentaje mínimo aceptable el 70% del AUC.

A partir de la elaboración de esta, se pueden establecer las categorías de la susceptibilidad.

Hipótesis de falla

“La aplicación del método estadístico propuesto sirve como una herramienta que orienta y permite comprobar las hipótesis planteadas sobre los factores que condicionan la ocurrencia de un movimiento en masa, pero su resultado se debe analizar en función de las características geoambientales y la coherencia de los resultados obtenidos.” (SGC, 2017)

El objeto de esta es encontrar una combinación de factores condicionantes que obtengan los valores de mayor importancia en la función final de susceptibilidad (LSI), así logrando explicar e interpretar cuales son o serán las variables causantes de la ocurrencia de los movimientos en masa.

Por lo tanto, debe haber una concordancia entre el conocimiento geológico que se tiene de la zona, el inventario de procesos morfodinámicos y el resultado obtenido del cálculo y análisis de susceptibilidad mediante el método estadístico bivariado pesos de evidencia.

6 Metodología

Las etapas de los procesos de recolección y manejo de datos a través de las cuales se genera el producto final de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa se dividen en tres: etapa preliminar, etapa de campo, etapa post-campo.

6.1 Etapa preliminar

Se lleva a cabo una recopilación de toda la información disponible, proporcionada por la oficina de Planeación y Obras Públicas de la alcaldía de Paicol-Huila y del Servicio Geológico Colombiano; esta información consta de mapas geológicos, geomorfológicos, de cobertura vegetal, uso de suelo, división veredal, obtenida del EOT en vigencia del municipio y de igual manera correspondiente a la plancha 344 y 366 extraídas del Estado de la Cartografía Geológica Colombiana junto con sus respectivas Memorias Explicativas.

Se realizó fotointerpretación a partir del modelo de elevación digital (DEM) obtenido del satélite Alos Palsar y procesado de manera propia con herramientas SIG para una mejor visualización y análisis de cambios en la superficie, que incluyen la pendiente, tonalidad, sombreado y textura, para familiarizarse con las geoformas y el ambiente geomorfológico e identificar posibles movimientos en masa. Esta información se validará y reajustará en las siguientes etapas. Adicional a lo anteriormente descrito, también, se trazó rutas de acceso a áreas en donde se encontraron afloramientos de interés, posibles contactos entre unidades, zonas de inestabilidad y puntos de visualización del paisaje. Todo lo anteriormente mencionado con el propósito de obtener conocimiento suficiente previo y tener una percepción más amplia de la zona en cuestión.

6.2 Etapa de campo

Se realizó en la vereda Alto San Miguel, en compañía del área de Planeación y Obras Públicas, en donde se llevó a cabo un recorrido por distintas vías destapadas que conectan la vereda en objeto de estudio con las veredas aledañas, incluyendo a las veredas: Santa Inés, San Marcos, Peña Negra, además de la vía pavimentada Paicol – La Plata.

A continuación, se explicará y describirá parámetros y características identificadas en campo para el estudio de los factores condicionantes:

- ✓ Identificación, localización, clasificación y validación del inventario de procesos morfodinámicos (en la medida de lo posible por cuestiones de acceso y seguridad).
- ✓ Reconocimiento, verificación y complementación de información geológica.
- ✓ Descripción de litologías en los afloramientos encontrados dentro de la zona de estudio.
- ✓ Recolección de muestras de mano de las rocas de interés con el fin de cartografiar y trazar contactos entre las unidades geológicas presentes en la zona.
- ✓ Cartografía y caracterización de unidades geológicas superficiales (UGS) bajo parámetros fundamentales que se definirán y explicarán más ampliamente en la siguiente etapa, además, de toma de muestras representativas para su mejor análisis post-campo.
- ✓ Acceso a puntos clave para poder tener una vista panorámica que permitiera observar y corroborar los rasgos geomorfológicos como la forma, longitud y tipo, que ya se habían considerado previamente en la etapa anterior.
- ✓ Validación de la cobertura vegetal y el uso de suelo presente en la vereda Alto San Miguel.

6.3 Etapa post-campo

Integración, análisis y procesamiento de la información para elaboración de mapas temáticos, los cuales son parte de los insumos necesarios que contribuyen a la generación del modelo de susceptibilidad. Esto se logra mediante el software ArcMap.

Los mapas suministrados por la Secretaría de Planeación y Obras Públicas del municipio de Paicol-Huila, provenientes del EOT y aún en revisión (escala 1:25.000), serán usados como base para elaborar los insumos necesarios y serán representados en mapas a escala 1:10.000.

Toda la información se proyectó en el sistema de coordenadas CTM12 – EPSG: 9377, y se verificó el límite del área de estudio para todos los mapas vectoriales. Para los datos derivados de ráster, se comprobó que todas las capas tuvieran la misma resolución de 12,5m proveniente del DEM obtenido del satélite Alos Palsar, así mismo, todos los mapas tanto de origen vectorial como ráster cuentan con la cartografía base a escala 1:10.000.

6.3.1 *Inventario de Procesos Morfodinámicos*

Después de realizar la fotointerpretación y la validación en campo mencionadas en la etapa preliminar y de campo, se procede a digitalizar los movimientos en masa junto con sus características geomorfológicas, utilizando el software ArcMap, y manejando la simbología propuesta por el SGC (2017). (Figura 15).

TIPO	SUBTIPO	PROFUNDIDAD	ACCIÓN/MO	IDENTIFICADOR PARTES DEL MOVIMIENTO		ACTIVIDAD		OBSERVACIONES
				ESCARPE (Zona de inicio)	CUERPO (Zona de depósito)	ACTIVO	INACTIVO	
	Rotacional		drs/drp	drs-e/ drp-e	drs-d/ drp-d			En el caso de deslizamientos activos, se puede indicar el área proclive a ser afectada (aca) o área con evidencias que permiten inferir que el material podría continuar desplazándose, representada en la figura como una línea punteada.
Deslizamiento	Traslacional	Superficial/ Profundo	dts/dtp	dts-e/ dtp-e	dts-d/ dtp-d			

Figura 15. Representación cartográfica y simbólica de los atributos para movimientos en masa tipo deslizamiento. Fuente: SGC (2017).

6.3.2 Factores condicionantes

Geomorfología a nivel de elementos geomorfológicos y factores morfométricos

Ya que la escala empleada en este documento es 1:10.000, es decir, corresponde al máximo nivel de detalle con respecto a la Jerarquización Geomorfológica, entonces, se trabajará a nivel de elementos o componentes.

Después de realizar la debida fotointerpretación expuesta en la etapa preliminar, seguido de la validación en campo (etapa de campo) de los mismos, se prosigue en esta etapa a reajustar y delimitar estos componentes usando herramientas del software ArcMap, creando una geodatabase con esta variable categórica, teniendo en cuenta los rasgos del relieve, su morfometría detallada y los microrrelieves asociados a características litológicas. Es de tener en cuenta que este mapa debe complementarse con la información del catálogo del IPM, debido a que estos son rasgos morfodinámicos.

El SGC (2016), indica que la nomenclatura para nombrar los elementos geomorfológicos consiste en poner la primera letra, en mayúscula, la cual define el origen de la geoforma y la segunda letra, en minúscula, indicando la caracterización de los elementos, rasgos o procesos geomorfológicos.

A continuación, se mostrará un diagrama de flujo en donde se simplifica la metodología para la obtención de los cinco mapas de las variables continuas pendientes, curvatura de perfil, curvatura de plano, rugosidad y área de acumulación de flujo (Figura 16):

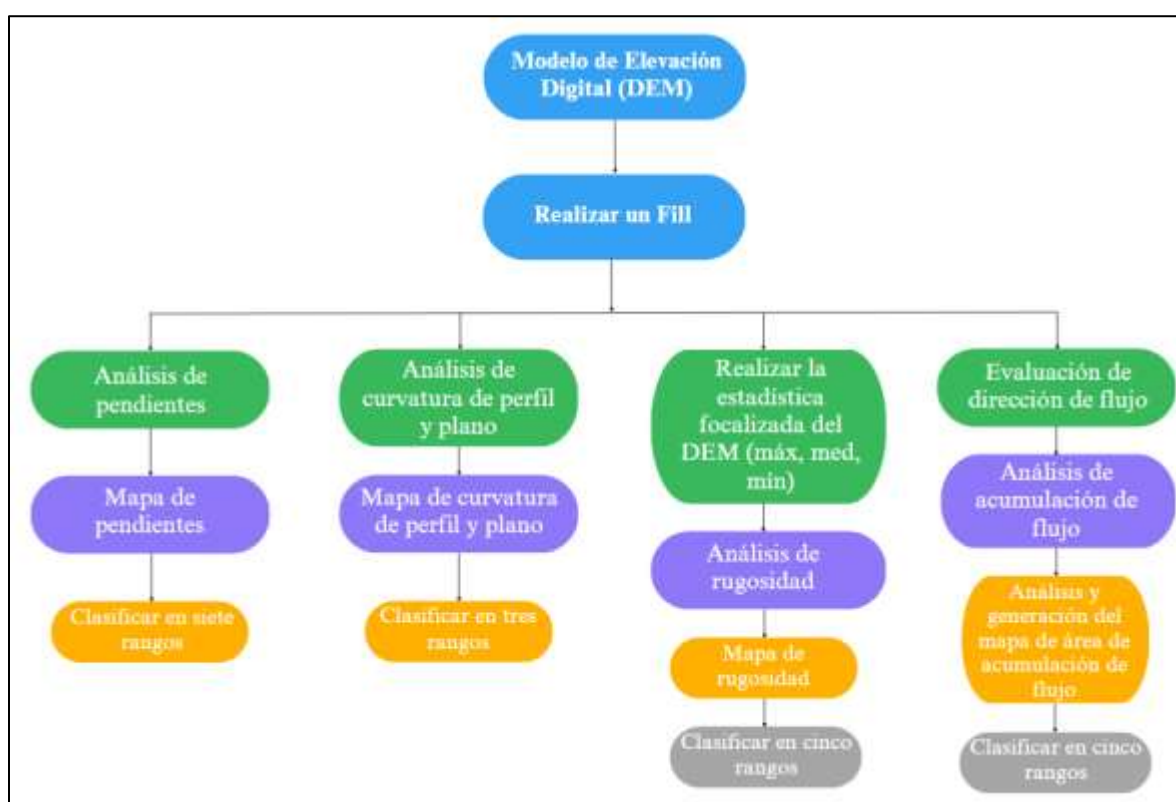


Figura 16. Diagrama de flujo de procedimientos para la obtención de las variables continuas, empleando el software ArcMap. Fuente: propia.

Unidades geológicas superficiales

Para la elaboración del mapa de Unidades Geológicas Superficiales, se tomó como cimiento el mapa de UGS del EOT del municipio de Paicol, para complementar información; sin embargo,

en su mayor parte fue derivado del conocimiento geológico de campo y derivado del mapa de unidades geológicas elaborado para este estudio. Se creó la geodatabase desde ArcMap.

Finalmente, cuando se hayan identificado las posibles Unidades Geológicas Superficiales y se hayan digitalizado en un mapa temático, y caracterizado con los parámetros anteriormente dados, se debe categorizar en una nomenclatura la cual está definida primeramente por el origen y la litología y seguidamente es ajustada dependiendo de las características de los materiales que se determinaron en campo. Los criterios propuestos por el SGC (2016) se nombrarán a continuación:

- La primera letra, en mayúscula, indica si es roca (R) o suelo (S).
- Si es roca (R), la segunda letra, en minúscula, indica su calidad, según sus características de resistencia cualitativa, grado de meteorización y el diaclasamiento, entre otras, la cual se ajustará según la caracterización realizada cuantitativamente, que se denomina muy dura (md), dura (d), intermedia (i), blanda (b) y muy blanda (mb).
- Si es suelo (S), la segunda letra indicará el origen: transportado (t), residual (r) o antrópico (a).
- La tercera letra indica el tamaño del grano predominante o la textura del material.
- Se pueden agregar al nombre otras letras que indiquen las características geotécnicas del material.

INGEOMINAS (2004) propuso esta nomenclatura sugerida para Unidades Geológicas Superficiales (UGS) (Figura 17).

Tipo de Material	Unidades	Origen	Tipo de U.G.S	Símbolo/Composición	Simbología Resumida	COLOR	
SUELOS (S)	Transportados (St)	Fluvial (Stf)	Aluviones de lechos fluviales	Stf/al,ar,lm	Stf1	342	
			Llanura de inundación	Stf/li/a,ar	Stf2	66	
			Terraza aluvial	Stf/tz/gr,ar	Stf3	46	
			Abanico/cono-aluvial	Stf/ab-co/gr,ar	Stf4	44	
			Depósitos torrenciales	Stf/dt/bl,gr,ar	Stf5	53	
			Depósitos fluvio-torrenciales	Stf/ft/bl,gr,a	Stf6	63	
		Lagunar (Stl)	Depósitos lacustres	Stl/a,ar,lm	Stl1	286	
			Depósitos paludales	Stl/a,lm,tur	Stl2	290	
			Depósitos fluvio-lacustres	Stl/ra,a,gr	Stl1	300	
		Glaciar (Stg)	Morrenas	Stg/mr/bl,gr,ar	Stg1	40	
			Tillitas	Stg/tl/gr,ar	Stg2	47	
		Fluvio-Glaciar (Stfg)	Abanicos fluvio-glaciares	Stfg/ab/gr,ar	Stfg1	61	
			Terrazas fluvio-glaciares	Stfg/tz/gr,ar,a	Stfg2	58	
		Volcánico (Stv)	Depósitos de ceniza	Stv/clm,ar,a	Stv1	127	
			Lapilli	Stv/lp/bl,gr,ar,lm	Stv2	131	
			Tefras	Stv/t	Stv3	130	
			Lahares	Stv/lh/bl,gr,ar	Stv4	133	
			Flujos de piroclastos	Stv/fp/gr,ar,lm	Stv5	134	
			Flujos de lodos volcánicos	Stv/fv/ar,lm,a	Stv6	132	
			Ignimbritas	Stv/igni	Stv7	128	
			Coladas de lava	Stv/cl/ar,lm,a	Stv8	129	
		Eólico (Ste)	Depósitos de loess	Ste/l/ar,lm	Ste1	110	
			Depósitos de dunas	Ste/d/ar,lm	Ste2	100	
			Bajjanes	Ste/b/ar,lm	Ste3	102	
		Costero (Stc)	Depósitos de deltas	Stc/d/a,ar,lm	Stc1	96	
			Barras	Stc/b/ar,a,bl	Stc2	109	
			Playas	Stc/p/ar,a,lm	Stc3	116	
			Arrecifes	Stc/im,a,ar	Stc4	108	
			Terrazas	Stc/tz/ar,a,gr	Stc5	40	
			Planicies	Stc/p/a,lm	Stc6	95	
		Translocado (Str)	Coluvial (Strc)	Coluviones	Strc/ar,a,bl	Strc1	13
				Talus/cono de talus	Strt/bl,cl,gr	Strc2	1
				Derrumbos de pendiente	Strc/bl,fr,gr	Strc3	29
				Flujos (de lodo, tierra y de escombros)	Strc/fl,t,e/ar,gr,lm	Strc4	31
		Residuales (Sr)	De Rocas Sedimentarias (Srs)	S.r. de roca parental de textura clástica cementada y granulometría gruesa areniscas y conglomerados	Srs/ar,cng	Srs1	91
				S.r. de roca parental de granulometría fina; arcillolitas, limolitas y areniscas	Srs/a,lm,ar	Srs2	104
			De Rocas Igneas Intrusivas o extrusivas (Sri-Srie)	S.r. de roca parental de textura cristalina masiva y granulometría gruesa	Srii/ar,lm,a	Srii1	204
				S.r. de roca parental de composición básica y granulometría fina	Srii/a,lm,ar	Srii2	196
			De rocas Igneas Volcánicas (Sriv)	S.r. de roca parental de origen volcánico y granulometría fina a gruesa	Sriv/ar,lm,a,bl	Sriv1	268
			De Rocas Metamórficas (Srm)	S.r. de roca parental de textura cristalina y bien foliada	Srm/a,lm,ar	Srm1	125
				S.r. de rocas parentales de textura cristalina masivas y granulometría gruesa (cuarcita, mármol, néls)	Srm/ar,a,lm	Srm2	120
			Depósitos Antropogénicos (Sa)	Depósitos Antropogénicos	Relenos sanitarios o de basuras	Composición heterogénea	Strab
		Relenos de excavaciones o de escombros o botaderos			Composición heterogénea	Strae	382

TIPO DE MATERIAL	UNIDAD	SIMBOLO	COLOR
ROCAS R	BLANDAS (Resistencia baja $\sigma_c < 1000$ Kg/cm ²)	Rb	216
	INTERMEDIAS (resistencia intermedia a alta σ_c de 1000 a 2000 Kg/cm ²)	Ri	169
	DURAS (Resistencia alta a muy alta, $\sigma_c >$ de 2000 Kg/cm ²)	Rd	257

Figura 17. Nomenclatura sugerida para unidades geológicas superficiales (rocas y suelos).
Fuente: Ingeominas (2004b).

Cobertura vegetal y usos del suelo

Debido a que en el EOT del municipio se encontraba el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo a escala 1:25.000, este se tomó como base y se hizo una validación primeramente con imágenes satelitales en la etapa preliminar, para posteriormente en la etapa de campo terminar de verificar esta información y hacer un reajuste del mapa con los datos obtenidos de campo en esta fase con la ayuda del software ArcMap; el mapa base y el reajustado fueron digitalizados y caracterizados con base en variables categóricas correspondientes a la metodología Corine Land Cover, la cual es una metodología francesa que fue adaptada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el territorio Colombiano, esta consistió en identificar la cobertura de la superficie de la tierra mediante la interpretación y uso de imágenes satelitales. Esta información está categorizada de manera jerárquica e incorpora los territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua; estas categorías comprenden hasta cuatro niveles (Figura 18), sin embargo, en este documento se trabajó hasta el nivel tres para el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo de la vereda Alto San Miguel.

LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA	
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
1.1. Zonas urbanizadas	3.1. Bosques
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.1.4. Bosque de galería y ripio
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	3.2.1.1. Herbazal denso
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
2.2. Cultivos permanentes	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Vinedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	4. AREAS HÚMEDAS
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4.1. Áreas húmedas continentales
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Citricos	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	4.2. Áreas húmedas costeras
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2. Salitral
2.3. Pastos	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
2.3.1. Pastos limpios	5. SUPERFICIES DE AGUA
2.3.2. Pastos arbolados	5.1. Aguas continentales
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50 m)
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5.2. Aguas marítimas
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Figura 18. Unidades de coberturas de la tierra para la leyenda nacional, escala 1:100.000, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Fuente: IDEAM (2010).

6.3.3 Pesos de evidencia y análisis de susceptibilidad

La aplicación de la metodología se hace de acuerdo con lo especificado en Bonham-Carter (1994), Van Westen (2002), Van Westen *et al.* (2003) y SGC (2017).

Inicialmente, se debe hacer un procesamiento estadístico a las variables categóricas y continuas.

Cada variable categórica (V1, V2, V3) le asigna un código a cada una de sus clases, se rasteriza y de esta manera se halla el número de píxeles para cada clase (NPC), seguidamente, junto con la variable constante (IPM), la cual quedará con un código binario de ceros y unos, (0 siendo píxeles con ausencia de deslizamiento y 1 píxeles con presencia de deslizamiento), se calculará el producto entre cada factor condicionante y este ráster, de este modo se hallará el Npix1 (Número de píxeles deslizados por clase) de cada clase correspondiente a cada factor. Finalmente, mediante las ecuaciones expuestas en el fundamento del WofE, se calculará el peso final.

Cada variable continua (X1, X2, X3, X4, X5), debido a que son datos de tipo ráster, es necesario reclasificarlas con los índices previamente discretizados y a estos rangos se les asigna un código; seguidamente, con este archivo reclasificado se halla el NPC y posteriormente se aplica la misma metodología para las variables categóricas desde el cálculo del producto entre cada factor con el IPM, hasta la obtención del peso final para cada una.

Por último, usando la función final de susceptibilidad (Ecuación 9) o LSI (Landslide Susceptibility Index), se suman los rústers de cada factor con información cuantitativa de los pesos finales para cada una de sus clases correspondientes.

$$\text{LSI} = W_f \text{ Geomorfología} + W_f \text{ UGS} + W_f \text{ Cobertura vegetal y uso de suelo} + W_f \text{ Pendientes} \\ + W_f \text{ Curvatura de plano} + W_f \text{ índice de rugosidad} + W_f \text{ área de acumulación de flujo}$$

Ecuación 9

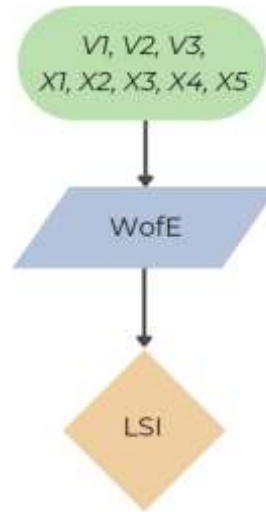


Figura 19. Esquema general para el cálculo del Índice de Susceptibilidad por movimientos en masa. Fuente: propia.

7 Contexto Geológico

El municipio de Paicol, está localizado entre las cordilleras Central y Oriental (Valle Superior del Magdalena), al suroccidente de Colombia. En esta región, se tiene un basamento de origen continental compuesto por rocas metamórficas grenvilianas de alto grado, que son agrupadas en lo que Toussaint & Restrepo (1989) llaman el Terreno Chibcha. Estas rocas litológicamente están compuestas principalmente por gneises graníticos, migmatitas, anfibolitas, paragneises, mármoles y esquistos.

Según Restrepo & Toussaint (2020) las unidades que comprenden la región más sur del terreno, en el departamento del Huila, corresponden a pequeñas porciones de Las migmatitas del Pital y El Zancudo, las cuales fueron datadas entre una edad de 1005 Ma y 972 Ma, equivalente al Precámbrico, por el método U-Pb LA-MC-ICP-MS según Ibáñez-Mejía et al. (2011). En esta área también se encuentra como basamento el Ortogranito de La Plata, el cual fue definido por Rodríguez (1995^a), como rocas metamórficas de alto grado con facies anfibolita y granulita, de edad Precámbrica por correlación con el Macizo de Garzón, clasificándose como monzogranitos de anatexia, neises migmatíticos de cuarzo, plagioclasa, hornblenda con microclina y biotita y granulitas cuarzo feldespáticas con ortopiroxeno, clinopiroxeno y hornblenda; predominando los monzogranitos y los neises migmatíticos (Velandia et al., 2001).

Estas rocas son intruídas por plutones como el Batolito de Ibagué, definido inicialmente por Hubach & Alvarado (1932) como el Batolito del Páez, el cual tiene una composición tonalítica a granodiorítica, con una edad Jurásica según Priem et al. (1989). De manera discordante, reposan sobre el basamento diversas secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias de origen marino, aflorantes en la zona de estudio, comprendiendo litológicamente a la Vereda Alto San Miguel

perteneciente al municipio de Paicol – Huila. Estas secuencias son definidas por las siguientes formaciones.

Formación Saldaña (Js), corresponde a una secuencia de rocas volcano-sedimentarias, que afloran principalmente en el Valle Superior del Magdalena y la Cuenca del Putumayo, siendo definida por Cediell et al. (1980), tomando el nombre del río donde afloran. De manera general, corresponden a secuencias de rocas piroclásticas que varían entre tobas líticas, vítreas y cristalinas, lavas, aglomerados y rocas de textura porfirítica de composiciones variadas (Rodríguez et al., 2016). Estas rocas se encuentran intruídas por el Batolito de Ibagué y están en contacto fallado con la Formación Hondita y Loma Gorda (Kh – Kl) y suprayacida de manera discordante por la Formación Caballos (Kc).

La Formación Caballos (Kc) fue definida por Corrigan (1967) como una secuencia de rocas sedimentarias que afloran en el Valle Superior del Magdalena. En la parte inferior está constituida por arenitas cuarzo-feldespáticas intercaladas con arcillolitas grises y negras; en la parte media dominan las arcillolitas grises y negras con intercalaciones de cuarzoarenitas de grano grueso; y hacia la parte superior se encuentran intercalaciones de niveles gruesos de cuarzoarenitas con arcillolitas negras. Esta unidad se encuentra en contacto en la parte superior con la Formación Hondita de manera concordante y neta (Marquínez et al., 2002). La edad de la Formación Caballos fue definida por Vergara (1994) entre el Albiano Inferior y Albiano Medio, basado en Foraminíferos hallados.

La Formación Hondita (Kh) es una secuencia de rocas sedimentarias que fue definida inicialmente por Porta (1965), quien describió la unidad como una alternancia de calizas arenosas, lutitas y shales. La edad de esta unidad abarca desde el Albiano medio hasta el Coniaciano

(Patarroyo 1993). Es característico que esta unidad es poco fosilífera y tiene presencia de concreciones calcáreas. Su contacto superior es neto con la Formación Loma Gorda.

Porta (1965) definió como Formación Loma Gorda (Kl), a una secuencia de rocas sedimentarias que en la base presenta shales y lutitas grises con abundantes concreciones calcáreas, seguidas por una alternancia de shales y lutitas con intercalaciones de cherts, sobre las cuales se encuentran arenitas y una sucesión de shales y lutitas negras. El límite superior para esta formación está marcado por la presencia de la Lidita inferior del Grupo Olini. Según Patarroyo (1993) la edad de esta unidad es Coniaciano, definida por la fauna de Ammonites reportada por algunos autores. Adicionalmente a estas unidades, en la zona de estudio se encuentran depósitos Aluviales (Qal) y Coluviales (Qc) (Figura 20).

La región o provincia estructural en la cual se encuentra la zona de estudio está limitada al W-NW por la Falla La Plata y al E-SE por la Falla de El Agrado, conformando un cinturón de pliegues y cabalgamientos con un estilo estructural de piel gruesa. Velandia et al. (2001) menciona la dirección general de transporte tectónico hacia el SE, generando el levantamiento del bloque de la Serranía de Las Minas. En medio de esta región se encuentra la Falla San Andrés ubicada en la vereda Alto San Miguel, a la cual se refiere Velandia et al. (2001) como una falla de cabalgamiento, en donde también se encuentra el anticlinal de Paicol, originado por propagación de falla, controlando las rocas de la Formación Caballos y Hondita. El sinclinal de Tesalia, fue definido por Marquínez et al. (2002) como una estructura asimétrica, debido a que el flanco oeste del pliegue cubre menos área que el flanco este; el eje tiene una dirección N-NE y la estructura se cierra hacia el norte, cerca de la población de Íquira, además, parece estar estructuralmente controlado por un lineamiento fotogeológico cuya dirección es N-NW. Hacia el oeste se encuentra esta estructura con la Falla de Pacarní o San Andrés.

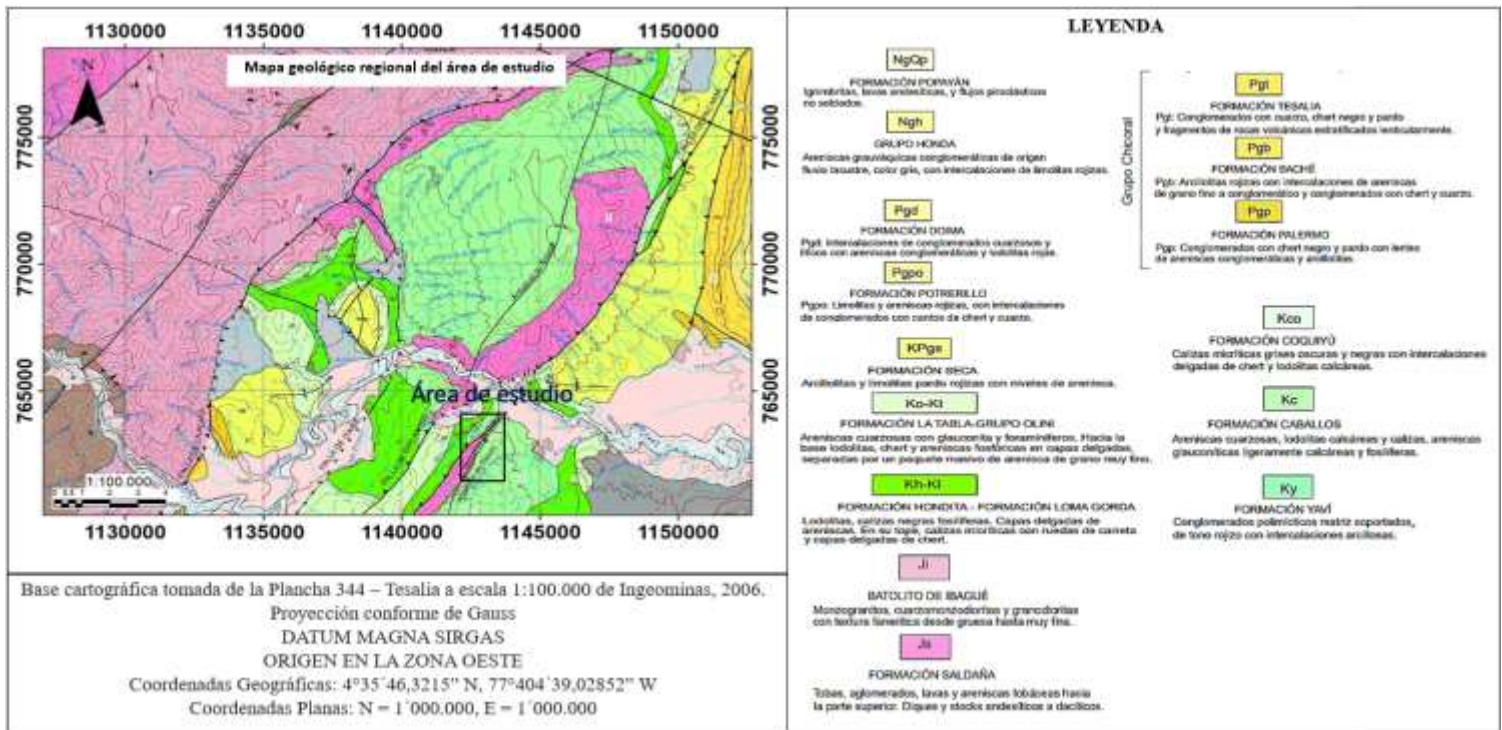


Figura 20. Mapa geológico a escala original 1:100.000. Fuente: modificado de Ingeominas (2006).

7.1 Geología local

Se expone el mapa de unidades geológicas elaborado en los límites de la vereda Alto San Miguel a escala 1:10.000 (Figura 25). Posteriormente se describen de la más antigua a la más reciente cada una de estas unidades con información secundaria recopilada de bibliografía, de los afloramientos y muestras de interés obtenidas y observadas en campo, las cuales se tomaron en los puntos de control que se muestran en el mapa de inventario de procesos morfodinámicos (Figura 26).

A continuación, se va a describir de manera general, el estado de conocimiento para las unidades que afloran dentro del área de estudio.

7.1.1 Formación Saldaña (Js)

Estas, abarcan un área de $2,36 \text{ km}^2$, por lo tanto afloran en un 16,11% de área total del mapa. En campo la unidad se encontró de las siguientes maneras: hacia el centro de la vereda, se observó un perfil totalmente meteorizado de la formación mencionada (Figura 21, c y d), se clasificó en el grado V (saprolito fino – suelo) según Dearman (1974) (Anexo 4), la composición del suelo comprende arcillas con tonalidades amarillas-pardas y se encuentran entre un 10-15% de fragmentos de roca fácilmente desmenuzables, que se componían de tobas líticas.

En la quebrada La Venta, la cual se encuentra al NW de la zona, se encontró un afloramiento por corte de quebrada (Figura 21, a), de roca fresca, masiva, compuesta de tobas vítreas de color grisáceo y rosado, con alto contenido de cristales y menormente de líticas. A pocos metros del mismo sector, en un afloramiento por corte de carretera se presencié un perfil de meteorización de grado 3, altamente decolorado (Figura 21, b), el cual se compone de tobas vítreas ya alteradas de color rojo, pardo y tobas cristalinas, de color grisáceo, contenido principalmente por Biotita, Anfíboles y Plagioclasa.

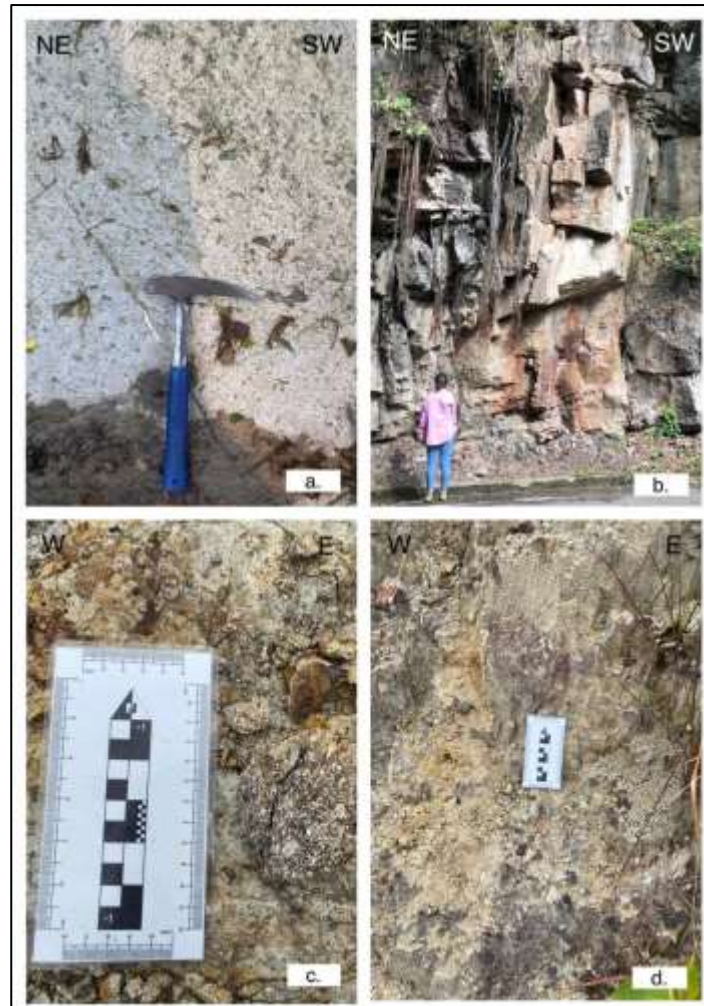


Figura 21. Afloramiento de la unidad geológica Formación Saldaña en la Vereda Alto San Miguel. a) Roca fresca sin signos visibles de meteorización. b) Perfil de meteorización grado III (macizo rocoso meteorizado). c) y d) Perfil de meteorización grado V (saprolito fino – suelo). Fuente: propia.

7.1.2 *Formación Caballos (Kc)*

Esta formación abarca un área de $6,56 \text{ km}^2$, por lo tanto, ocupa un 44,8% del área total de estudio; en campo esta unidad se observó en perfiles de meteorización desde grado IV hasta VI (suelo residual), corresponden a cuarzoarenitas de grano fino a muy grueso, con granos de alta esfericidad y subangulares a bien redondeados, bien seleccionados, de coloración variable entre café-amarilla, parda y gris, con intercalaciones de delgados niveles de arcillolitas fisiles grises

claras a oscuras; el suelo que lo comprende está compuesto de arcillas de color amarillo-rojizo y granos de tamaño finos – muy finos (Figura 22).

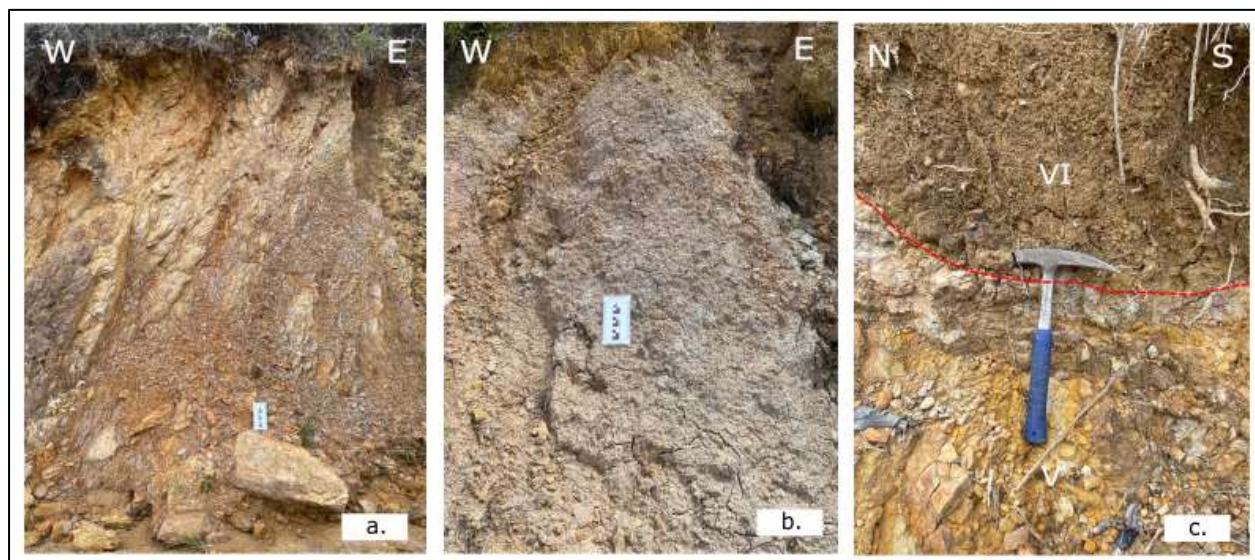


Figura 22. Afloramiento de la unidad geológica Formación Caballos en la vereda Alto San Miguel. a) Perfil de meteorización grado IV (saprolito intermedio). b) Perfil de meteorización grado V (saprolito fino). c) Perfil de meteorización grado V (saprolito fino – suelo) y grado VI (suelo residual). Fuente: propia.

7.1.3 Formación Hondita (Kh)

Esta formación abarca un área de $4,23 \text{ km}^2$, por lo que tiene una ocupación del 28,9% del área total de estudio. En campo esta unidad se observó desde roca fresca hasta en perfiles de meteorización, su litología comprende lodolitas negras fisiles intercaladas con lodolitas arenosas de color gris claro y oscuro (Figura 23).

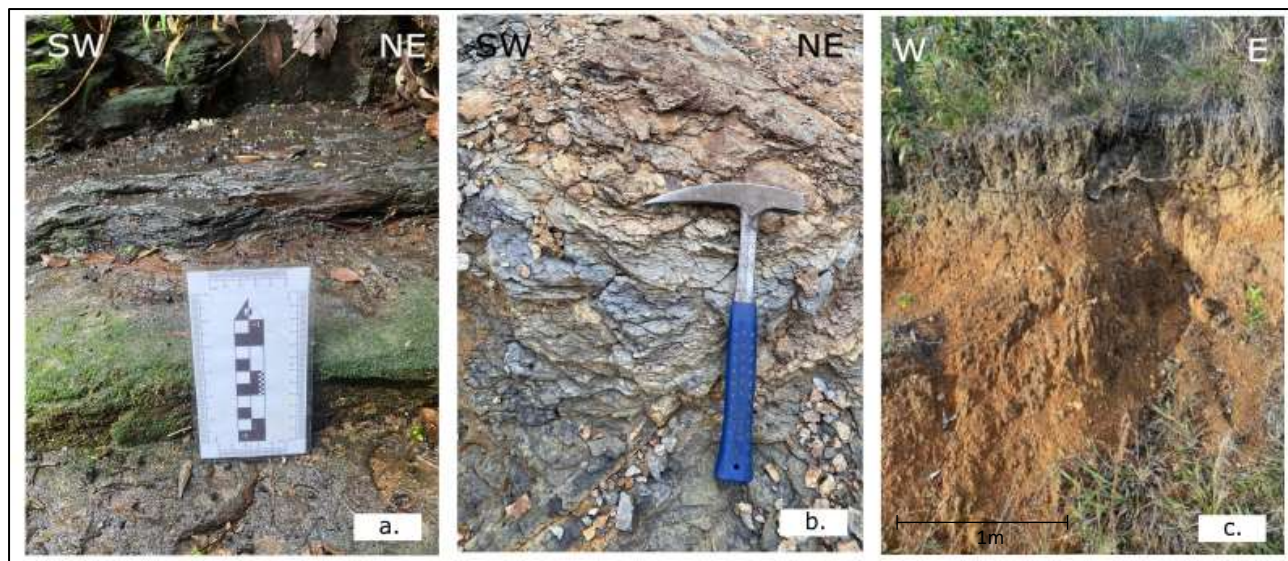


Figura 23. Afloramiento de la unidad geológica Formación Hondita en la vereda Alto San Miguel. a) Roca fresca sin signos visibles de meteorización. b) Perfil de meteorización grado III (macizo rocoso meteorizado). c) Perfil de meteorización nivel VI (suelo residual). Fuente: propia.

7.1.4 *Formación Hondita y Loma Gorda (Kh – Kl)*

Estas formaciones abarcan un área de $1,11 \text{ km}^2$, por lo que ocupa un 7,59% del área total de la zona de estudio. Esta unidad no se reconoció en campo.

7.1.5 *Depósitos aluviales (Qal)*

Estos depósitos abarcan $0,21 \text{ km}^2$ de área, por lo tanto, ocupan 1,47% del área total de la zona de estudio. Estos son el resultado del transporte y depositación de alguna fuente hídrica, en este caso, el Río Páez y la Quebrada La Venta. Se reconoció bajo fotointerpretación.

7.1.6 *Coluviones (Qc)*

Estos depósitos abarcan $0,15 \text{ km}^2$ de área, por lo tanto, ocupan 1,04% del área total de la zona de estudio. Se asocian a los depósitos generados por los deslizamientos presentes en la zona de estudio, aunque en la región se identificaron abundantes, solo se cartografiaron los que presentaban una extensión mínima para la escala del mapa (Figura 24).



Figura 24. Depósito coluvial en la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

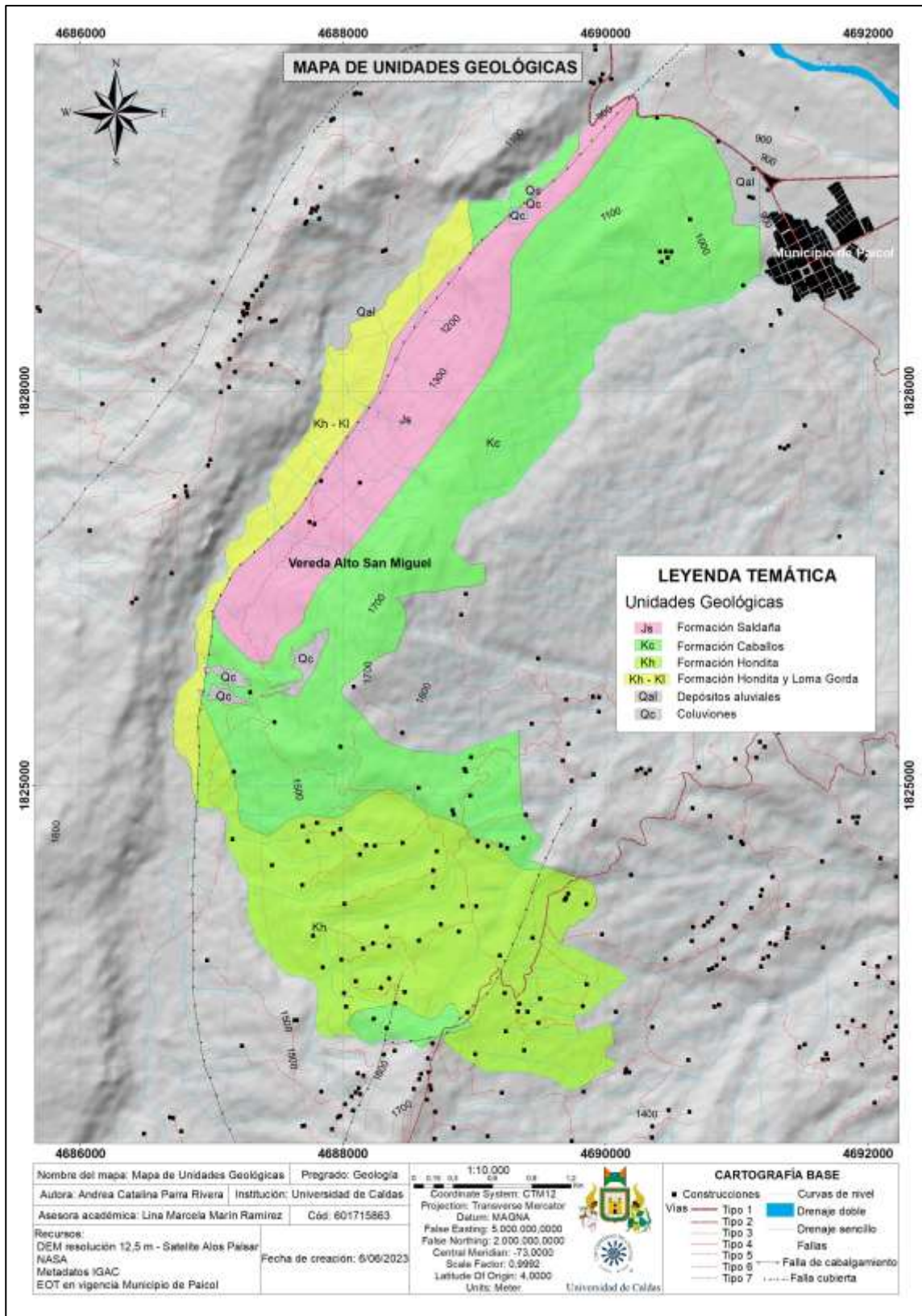


Figura 25. Mapa de Unidades Geológicas para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

7.2 Geología Estructural:

Según Velandia et al. (2001) en la zona sur del Valle Superior del Magdalena, como resultado de tectónica compresiva, se reconocen regionalmente fallas de cabalgamiento y pliegues, sobre los límites de la cuenca con las cordilleras.

El área ha sido intensamente afectada por eventos tectónicos superpuestos que incluyen plegamiento y fallamiento. Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas, pliegues, zonas de cizalla y lineamientos geológicos, que controlan en buena parte la topografía de la región, junto con las características de composición y textura de las rocas. (Velandia et al., 2001).

7.2.1 Falla San Andrés:

En la Plancha 366 Garzón se le denomina Falla de San Andrés, sin embargo, Marquínez et al. (2002) la menciona en la Plancha 344 Tesalia como Falla de Pacarní y la define como un cabalgamiento de carácter regional con dirección NE-SW y vergencia SW. Esta falla cabalga rocas de edad jurásica y cretácica de las formaciones Saldaña, Caballos, Hondita y Seca, y el Grupo Olini y sobre rocas de edad paleógena correspondientes al Grupo Chicoral.

Según el EOT del municipio esta falla en consecuencia de su cabalgamiento produce compresión y levantamiento parcial en relación con el Bloque de Paicol, el cual se ubica al este de la falla y está limitado al este por la falla de cabalgamiento de Pital – Agrado, constituyéndose en una cuña levantada y basculada hacia el oriente.

Apoyándose en la información recopilada en campo junto con la fotointerpretación del DEM del área de estudio, aunque se encontraron rocas trituradas, debido al alcance del estudio, no se logró hallar evidencias de que sea consecuencia de la tectónica de alguna falla, ni se encontró rasgos geomorfológicos indicativos de esta.

7.2.2 *Pliegues*

Debido a la escala y el enfoque que se implementó en el trabajo de campo sobre la vereda Alto San Miguel, además de la poca presencia de afloramientos de roca fresca donde se pudiera medir la disposición estructural de las secuencias sedimentarias, no se logró verificar y mapear el Anticlinal de Paicol y el Sinclinal de Tesalia anteriormente mencionados de manera bibliográfica en el contexto geológico.

8 Resultados

Aplicando la metodología para la elaboración de los mapas temáticos correspondientes a las variables que condicionan las propiedades del terreno y que según su coexistencia puede ser o no favorable a la ocurrencia de un movimiento en masa en la vereda Alto San Miguel, junto con el análisis de Susceptibilidad bajo el método de Pesos de Evidencia explicado previamente desde la fundamentación hasta los procedimientos que se llevan a cabo para lograr resultados con baja incertidumbre, se mostrarán y explicarán los productos obtenidos a continuación:

8.1 Inventario de procesos morfodinámicos:

Veintinueve deslizamientos fueron mapeados con base a los estudios geológicos de campo y de fotointerpretación, sin embargo, solo ocho alcanzaron la extensión necesaria para la escala mínima del mapa (Figura 26).

Los movimientos en masa cartografiados en la zona de estudio se caracterizan por tener diferentes tamaños, que varían entre los $500 m^2$ y los $100 m^2$, aproximadamente. De acuerdo con la clasificación de los movimientos en masa, ya que se está trabajando desde el método WofE, se caracterizaron deslizamientos, de los cuales se derivan en deslizamientos traslacionales y rotacionales que comprenden un 35% y 65% de los deslizamientos totales, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Área y porcentaje de los deslizamientos totales. Fuente: propia.

Tipo de deslizamiento	Área (m ²)	%
Traslacional	102789,34	34,73
Rotacional	193135,61	65,27
Total	295924,95	100

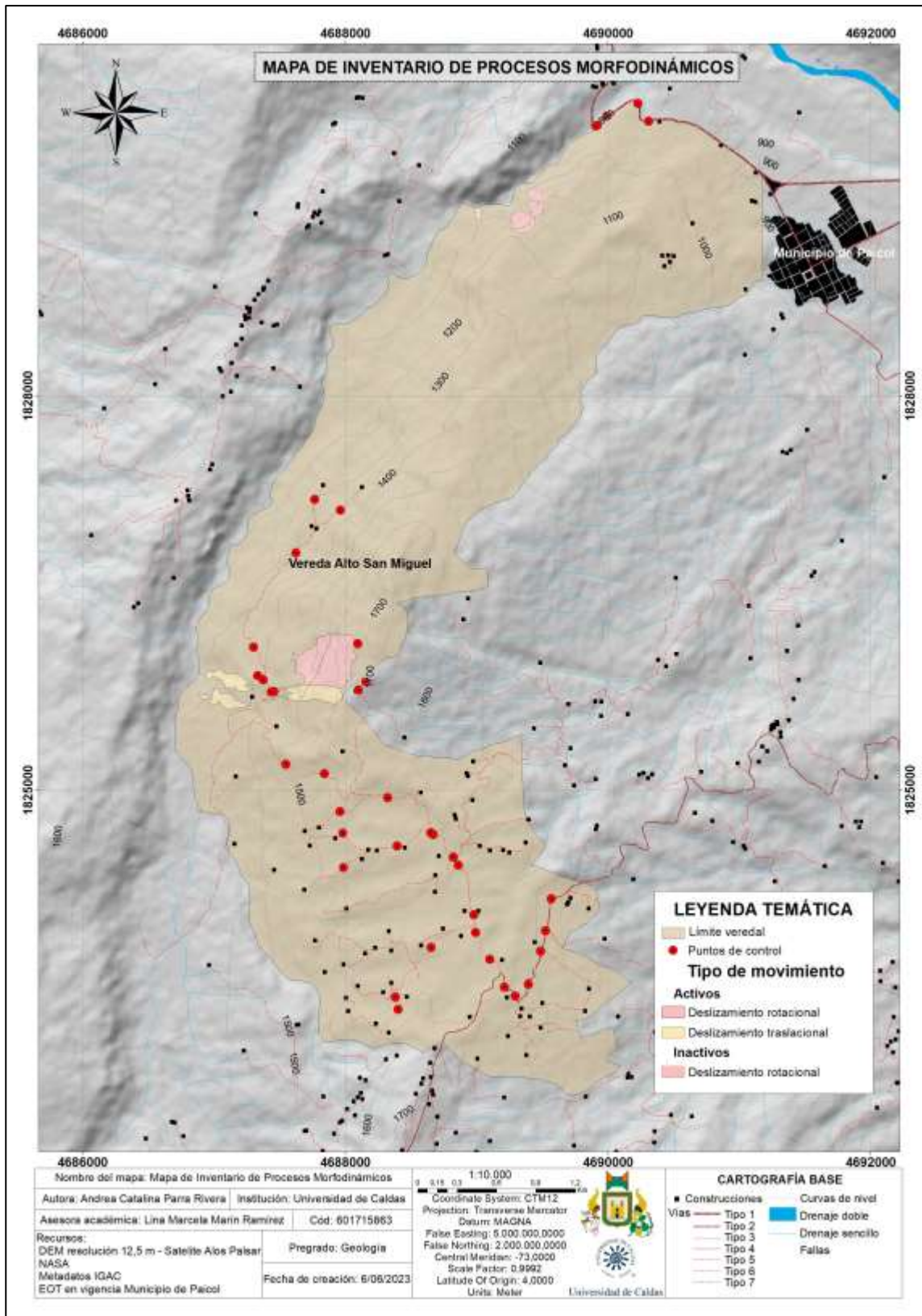


Figura 26. Mapa de Inventario de Procesos Morfodinámicos para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2 Mapas de factores condicionantes:

8.2.1 Unidades Geológicas Superficiales (UGS):

Para delimitar y caracterizar las UGS se realizaron visitas de campo en donde se definieron y caracterizaron las unidades correspondientes, bajo los parámetros mencionados previamente, obteniendo conocimiento de las propiedades geomecánicas de cada tipo de roca y suelo de interés presente en la zona. Se expone el mapa de las Unidades Geológicas Superficiales correspondiente a los límites del área de estudio (Figura 33).

A continuación, se define y describe cada Unidad Geológica Superficial cartografiada para la vereda Alto San Miguel junto con el registro fotográfico tomado en campo.

Unidades de rocas:

Corresponden como roca los materiales que hacen parte de los grados de meteorización I, II y III según Dearman (1974).

Para la caracterización y definición de rocas se tuvo en cuenta los siguientes parámetros ya antes mencionados catalogados por el SGC (2017): Clasificación geomecánica (GSI), litología, génesis, propiedades ingenieriles (tamaño y forma de los granos, color), grado de meteorización y rasgos estructurales (pliegues y familias de discontinuidades).

Este material se divide entre rocas blandas (GSI: VI, VII, VIII y IX), rocas intermedias (GSI: IV y V) y rocas duras (GSI: I, II y III) y se definieron tres unidades:

✓ Roca intermedia de la Formación Hondita (Ris/lm):

Dentro de esta unidad están las rocas sedimentarias clásticas, asociadas a la Formación Hondita, las cuales se componen de lodolitas fisiles intercaladas con lodolitas arenosas, con granos

tamaño fino a medio, con una textura clástica consolidada, de color gris claro – oscuro y negro, con un grado de meteorización III, conformando un horizonte de meteorización de macizo rocoso meteorizado de espesores cartografiables (Figura 27); presentan unas condiciones de fracturamiento muy blocoso, contando con GSI regular, de clase IV – V, con un grado de 40-60%.



Figura 27. Afloramiento de la unidad geológica superficial: roca intermedia de la Formación Hondita. Fuente: propia.

✓ **Roca dura de la Formación Caballos (Rds/ar):**

Correspondiente a rocas sedimentarias clásticas, litológicamente compuestas por cuarzoarenitas de grano medio – grueso pertenecientes a la Formación Caballos.

Estas rocas no se vieron en campo por no disponibilidad de acceso, sin embargo, fueron definidas de esta forma basándose en el EOT del municipio de Paicol – Huila.

✓ **Roca dura de la Formación Hondita (Rds/lm):**

Se integran las rocas sedimentarias clásticas de tamaño limo, pertenecientes a la Formación Hondita, compuestas por lodolitas fisiles intercaladas con lodolitas arenosas, con granos tamaño fino a medio, con una textura clástica consolidada, de color gris claro – oscuro y negro, sin grado de meteorización (roca fresca), con un espesor cartografiable, sin discontinuidades, masiva o intacta (Figura 28); contando con un GSI muy bueno, de clase I, con un rango entre (80 – 100%).



Figura 28. Afloramiento de la unidad geológica superficial: roca dura de la Formación Hondita.
Fuente: propia.

Suelos residuales:

Los suelos residuales se derivan de las rocas que han tenido procesos de meteorización y descomposición y no han experimentado ningún tipo de transporte. Conforme a su origen (roca parental), composición litológica, propiedades ingenieriles, textura y granulometría, se clasificaron en dos unidades:

✓ **Suelo residual a partir de la Formación Saldaña (Sriv/a):**

Correspondiente a materiales producto de la meteorización de rocas volcánico – sedimentarias que comprenden tobas cristalinas de la Formación Saldaña, la cual fue clasificada en este informe como suelo transportado de ignimbritas de la Formación Saldaña. Conforman horizontes de saprolito fino. Texturalmente comprende un suelo grueso granular (no cohesivo), materiales de tamaño arcilla y arena que conformaban el suelo las cuales presentan una morfología variable, con baja y alta esfericidad, con granos angulares a subredondeados, moderadamente seleccionados, sin gradación, con un empaquetamiento matrizsoportado, un grado de compactación débil y un término de densidad relativa muy suelto y algunos fragmentos de roca más gruesos que pertenecían a la roca parental, en general contienen minerales de Plagioclasa, Anfíboles y Biotita, poseen colores grisáceos, amarillos y algunas apariciones de tonalidades pardas, en general secos, no se observa estructuras relictas. Su espesor oscila entre 2 y 3 metros aproximadamente (Figura 29).



Figura 29. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo residual a partir de la Formación Saldaña. Fuente: propia.

✓ **Suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita (Srs/lm):**

Correspondiente a materiales que conforman un perfil de meteorización de grado IV (saprolito grueso), V (saprolito fino) y VI, de origen sedimentario clástico, específicamente cuarzoarenitas, arcillolitas y lodolitas fisiles de la Formación Caballos y Formación Hondita, las cuales fueron clasificadas en este estudio como roca dura de la Formación Caballos y roca dura de la Formación Hondita, respectivamente. Texturalmente comprenden un suelo grueso granular, con materiales de tamaño arcilla y arenas con contenido importante de cuarzo que conforman las partículas del suelo, las cuales presentan una morfología esférica, subangular a redondeada, bien seleccionado, sin gradación, con un empaquetamiento matrizsoportado, un grado de compacidad débil y un término de densidad relativa muy suelto junto con otras partículas más gruesas que pertenecen a fragmentos de la roca parental de tamaño arena-grava, poseyendo colores amarillo pálido, amarillo-naranja, café y algunas tonalidades rojizas, algunos perfiles con estructuras heredadas y otros sin evidencia de esto, en general secos y con un espesor variable, entre 2 a 3 metros aproximadamente (Figura 30).

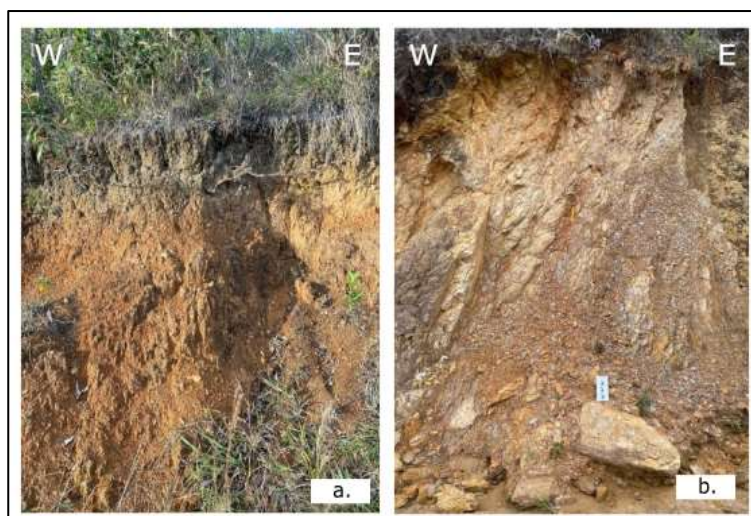


Figura 30. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita. a) suelo residual perteneciente a la Formación Hondita. b) suelo residual perteneciente a la Formación Caballos. Fuente: propia.

Suelos transportados:

Este tipo de suelos es el resultado de la acción de ciertos procesos morfológicos como deslizamientos, de los agentes naturales como la gravedad y sismos y las de medios de transporte de sedimentos como lo son el viento, hielo y agua, debido a esto, se encuentran en un lugar de origen distinto al “in situ”.

Estas unidades se definieron según su origen, composición litológica, propiedades ingenieriles y características físicas y se clasificaron en cuatro:

✓ **Suelo transportado de Ignimbrita de la Formación Saldaña (Stv/igni):**

Correspondiente a rocas de origen volcánico – sedimentarias perteneciente de la Formación Saldaña, compuesta litológicamente por tobas vítreas y tobas cristalinas, con cristales de grano medio y líticos de tamaño grueso – muy grueso, de textura cristalina masiva, con colores de grisáceo – rosado y pardo, con un grado de meteorización variable desde roca no meteorizada a ligeramente meteorizadas (por lo cual se da el color pardo), conformando horizontes de roca fresca y débilmente meteorizadas de espesores de hasta 10m de alto con distancias de hasta 500m; con unas condiciones de fracturamiento desde intacta a blocosa (Figura 31), contando con índice Geológico de Resistencia (GSI) variable desde muy buena a buena, de clase I – III, con un rango entre 60 – 100%.



Figura 31. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo transportado de ignimbrita de la Formación Saldaña. Fuente: propia.

✓ **Suelo transportado fluvial de terraza aluvial (Stf/tz):**

Corresponden a materiales de origen fluvial, los cuales fueron transportados y depositados en este caso por el cauce del Río Páez. Este depósito corresponde a una terraza sub-reciente. Por causas de no tener accesibilidad a la zona, no se pudo describir las propiedades del suelo.

✓ **Suelo transportado fluvial de llanura de inundación (Stf/Lli):**

Corresponden a materiales de origen fluvial, los cuales fueron transportados y depositados en este caso por el cauce de la Quebrada La Venta. Este depósito corresponde a una llanura aluvial. Por causas de no tener accesibilidad a la zona, no se pudo describir las propiedades del suelo.

✓ **Suelo transportado coluvial (Strc):**

Corresponden a los materiales transportados por la acción de la gravedad, debido a los fenómenos de movimientos en masa presentes en la vereda Alto San Miguel; el depósito que se identificó en campo corresponde a un deslizamiento traslacional con caída de rocas ubicado en la Formación Caballos, su composición en general son arenitas, principalmente cuarzoarenitas, de tamaño muy variable, texturalmente compuesto desde una matriz arcillosa hasta fragmentos de roca tamaño bloque, mayormente de baja esfericidad de formas angulares y subangulares, con gradación inversa y un empaquetamiento matrizsoportado, además presentan una compacidad débil y una densidad relativa muy suelta, poseen colores amarillos pálidos y grisáceos y en general son materiales secos (Figura 32).



Figura 32. Afloramiento de la unidad geológica superficial: suelo transportado coluvial. a) Suelo transportado coluvial perteneciente a la Formación Caballos. b) Fragmento de roca del depósito. Fuente: propia.

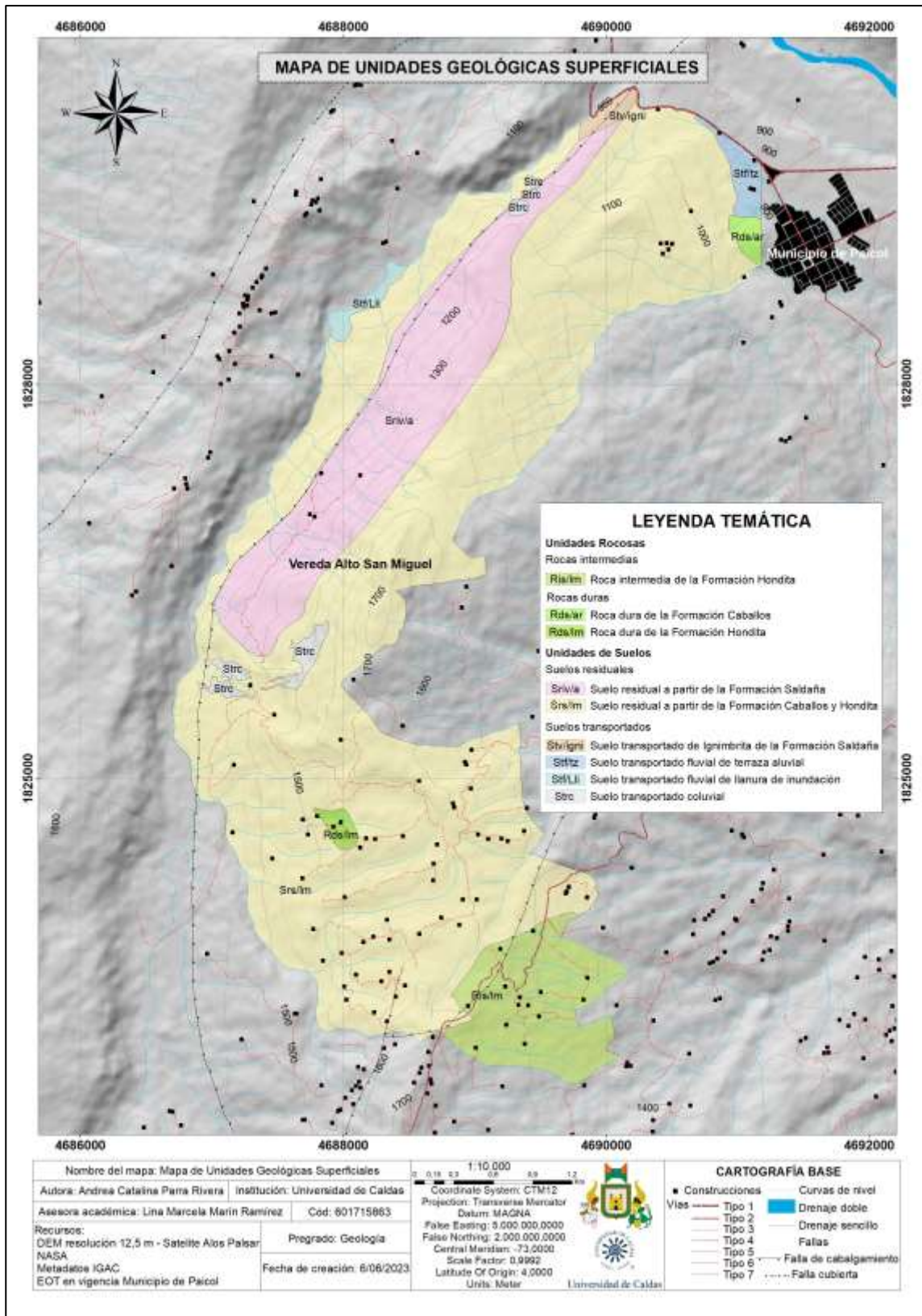


Figura 33. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.2 Elementos Geomorfológicos:

La zona de estudio se encuentra modelada por geoformas de origen denudacional en su mayor parte, en los cuales se presencian los fenómenos de movimientos en masa y los rasgos que lo componen, como el escarpe y el cono de deslizamiento, además, se evidencian formas de origen estructural y fluvial en menor proporción (Figura 35). Debido al detalle que se está trabajando, estas se definieron por su pendiente (Tabla 3) y longitud (Figura 34).

LONGITUD DE LADERA	
LONGITUD	DESCRIPCION
< 50 m	Muy Corta
51 - 250 m	Corta
251 - 500 m	Moderada
501 - 1000 m	Larga
1001 - 2500 m	Muy Larga
> 2500 m	Extremadamente Larga

Figura 34. Rangos de longitud de la ladera usados para nombrar los elementos geomorfológicos.
Fuente: Ingeominas (2011).

A continuación, se describen los elementos geomorfológicos presenciados en la zona de estudio:

Ambiente Denudacional:

✓ **Cono de deslizamiento rotacional (Ddrt):**

Estructura en forma de cono de pendientes abruptas a muy abruptas (16° - 55°), con formas irregulares y escalonadas, de longitud corta a moderada, está asociada a procesos de transporte y depósito y es originada por fenómenos de movimientos en masa de tipo deslizamiento rotacional. Este elemento se halla localizado en diferentes áreas de la zona de estudio, por lo tanto, los depósitos se componen por diferentes litologías, desde volcánico-sedimentarias de la Formación Saldaña, hasta arenitas de origen sedimentario pertenecientes a la Formación Caballos, sin

embargo, están compuestos por una estructura similar, coluviones de tamaños variables que se contienen en una matriz de suelo arcillosa a arenosa

✓ **Cono de deslizamiento traslacional (Ddrt):**

Estructura en forma de cono, con morfología plana a suavemente ondulada, de pendientes moderadamente abruptas a abruptas (8° - 35°), de longitud moderada. Su origen está dado por fenómenos de movimientos de tipo traslacional de rocas y suelo a lo largo de una superficie de falla más o menos planar. El depósito está compuesto por arenitas de la Formación Caballos con fragmentos de roca de tamaño bloque a arena, conteniéndose en una matriz de suelo arcillosa a arenosa.

✓ **Escarpe (De):**

Porción de ladera con pendientes abruptas a muy abruptas, de longitud corta a moderada, de hasta 500m de extensión. Debido a que se encuentra ubicada en diferentes localizaciones del área de estudio, específicamente en las que están asociadas a movimientos en masa, su litología es variable, una parte se posiciona sobre la Formación Caballos que se componen de rocas y suelo de origen sedimentario y la otra porción se encuentra sobre las rocas y suelo de origen volcano-sedimentario perteneciente a la Formación Saldaña. Esta geoforma está relacionada con la inestabilidad del terreno y por consiguiente deslizamientos, generados por procesos denudativos, formando estas superficies escarpadas.

✓ **Escarpe de erosión menor (Deeme):**

Porción de ladera con pendientes muy abruptas (35° - 55°), de longitud corta, de pocos metros de extensión, ubicada sobre la Formación Caballos y originada por la socavación de la Quebrada La Venta, procesos de erosión y movimientos en masa.

✓ **Ladera denudada abrupta de longitud larga (Dldal):**

Prominencia topográfica, con una morfología montañosa, cóncava, convexa e irregular, de longitud moderada a muy larga y pendientes abruptas (16° - 35°). Este elemento se encuentra posicionado sobre diferentes litologías, principalmente en la Formación Caballos de origen sedimentario y la Formación Saldaña de origen volcano-sedimentario y en menor proporción en la Formación Hondita y Loma Gorda. Está modelada por procesos intensos de meteorización y erosión diferencial. En esta geoforma se presentan la mayoría de los movimientos en masa de tipo deslizamiento y la mayor parte de procesos erosivos de la vereda Alto San Miguel.

✓ **Ladera erosiva abrupta de longitud larga (Dleal):**

Superficie de inclinación moderadamente abrupta a abrupta (8° - 35°), de longitud moderada a larga, con una morfología alomada, de forma cóncava, convexa e irregular. Se encuentra asociada a suelo residual de la Formación Caballos y Formación Hondita y tiene una extensión de hasta 2 km y presenta procesos erosivos intensos.

✓ **Ladera ondulada moderadamente abrupta de longitud moderada (Dlomam):**

Superficie de morfología alomada (hasta 200 m de elevación con respecto a su nivel base), formadas por suelo residual perteneciente a la Formación Hondita y Formación Loma Gorda, exponiendo formas cóncavas y convexas. Este elemento presenta una extensión de

aproximadamente 1,5 km y se ubica sobre pendientes moderadamente abruptas (8° - 16°), con una longitud variable entre corta a moderada.

✓ **Montículo y ondulaciones denudacionales (Dom):**

Superficie con un tipo de relieve en montículos, dispuesto sobre rocas de la Formación Hondita y Formación Caballos que han sufrido intensos procesos de meteorización y erosión hasta estar convertidas en suelo residual, creando estas formas onduladas, las cuales no tienen una elevación topográfica mayor a 50 m con respecto a su nivel base local. Presentando inclinaciones variables desde planas a moderadamente abruptas (0° - 16°).

Ambiente fluvial:

✓ **Planicie aluvial confinada (Fpac):**

Superficie del terreno con morfología plana a suavemente inclinada, angosta y eventualmente inundable, se encuentra limitada hacia el este por geoformas denudativas de ladera ondulada moderadamente abrupta (Dlomam), ladera erosiva abrupta (Dleal) y ladera denudada abrupta (Dldal) y hacia el oeste por el afluente de la Quebrada La Venta. Está compuesta por material aluvial y debido a que está bordeada por estas morfologías colinadas, hacen que se genere un estrechamiento del plano aluvial hacia el este.

✓ **Terraza de acumulación sub-reciente (Ftas):**

Superficie plana a suavemente inclinada (0° - 4°), de morfología recta. Está limitada por un resalte topográfico que la define como terraza. Su origen está relacionado a la dinámica del río Páez, debido a la ampliación de su valle, además, está compuesta por sedimentos remanentes que depositó el afluente; debido a que en la actualidad se encuentra a aproximadamente 800 m del río Páez, tiene baja susceptibilidad de ser afectada por eventos de inundación.

Ambiente estructural:**✓ Ladera contrapendiente abrupta de longitud corta (Slcpac):**

Esta geoforma es generada por disponer estratos en contra de la pendiente del terreno. Las capas de la Formación Caballos, sobre la cual se dispone esta geoforma, presentan un buzamiento hacia el este, sin embargo, la pendiente de este elemento se dispone hacia el oeste. Se caracteriza por ser una superficie sub-vertical de longitud corta, de forma recta a irregular y con una pendiente abrupta a muy abrupta (16° - 55°).

✓ Ladera estructural moderadamente abrupta de longitud muy larga (Slemaml):

Esta geoforma se define por tener estratos inclinados a favor de la pendiente, en la zona de la vereda Alto San Miguel se caracteriza por ser de longitud larga, con forma convexa a recta y presenta pendientes moderadamente abruptas a abruptas (8° - 35°). Este elemento estructural ocupa un área considerable en el área de estudio y está posicionada sobre la Formación Caballos y la Formación Hondita cuyas capas buzan hacia el este.

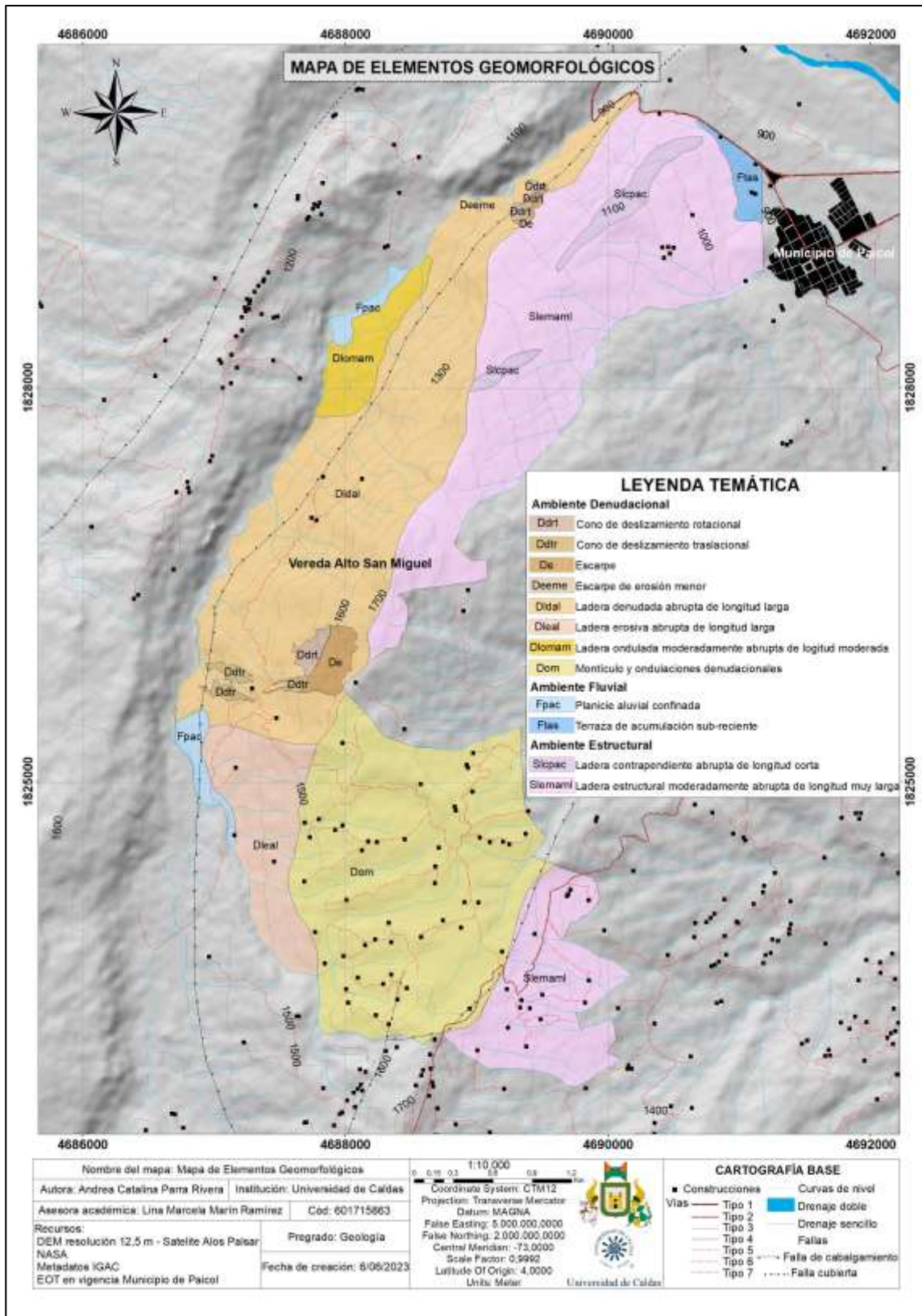


Figura 35. Mapa de elementos geomorfológicos para la vereda de Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.3 Pendientes:

Se expone el mapa de pendientes de la vereda Alto San Miguel (Figura 36). Los rangos para categorizar las pendientes con el objetivo de zonificar la susceptibilidad por movimientos en masa se muestran en la Tabla 3, el cual es tomado de la propuesta de Van Zuidam (1986).

Tabla 3. Rangos de pendientes utilizados con propósitos de análisis ingenieriles y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa. Fuente: modificado de Van Zuidam (1986).

Inclinación (°)	Descripción
0 - 2	Plano a casi plano
2 - 4	Suavemente inclinado
4 - 8	Inclinado
8 - 16	Moderadamente abrupto
16 - 35	Abrupto
35 - 55	Muy abrupto
>55	Extremadamente abrupto

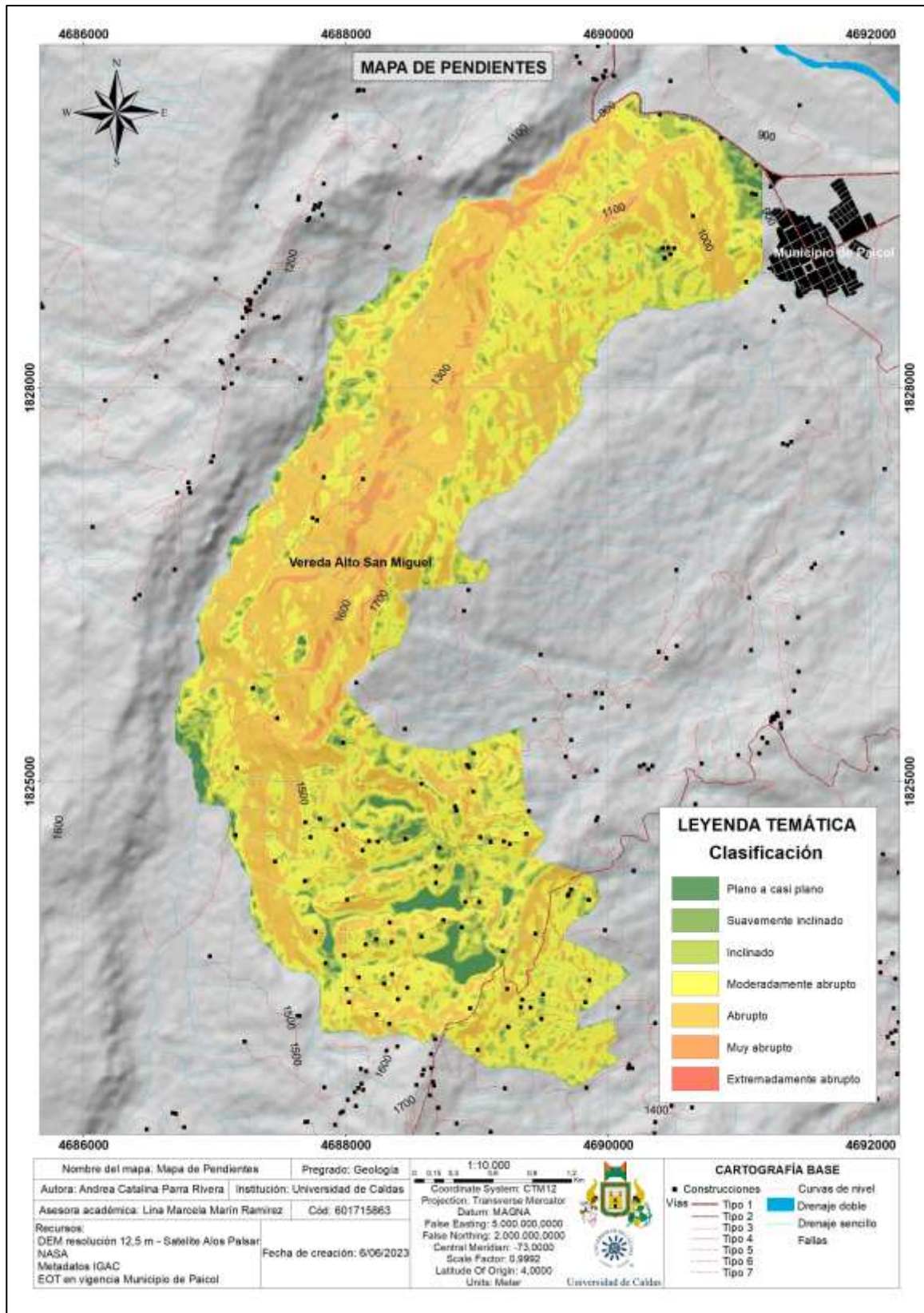


Figura 36. Mapa de Pendientes para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.4 *Curvatura de perfil y de plano:*

Se expone el mapa de curvatura de perfil y de plano respectivamente, para la vereda Alto San Miguel, siguiendo una clasificación que logra evidenciar una forma cóncava, convexa e irregular (Figura 37 y 38). En la siguiente tabla (Tabla 4), se mostrará los tres rangos de categorización según ArcGIS Desktop (s.f.).

Tabla 4. Rangos de curvatura de perfil y plano. Fuente: propia.

Rango	Clasificación
-0,4 - -0,01	Cóncavo
-0,01 - 0,01	Plano
0,01 - 0,4	Convexo

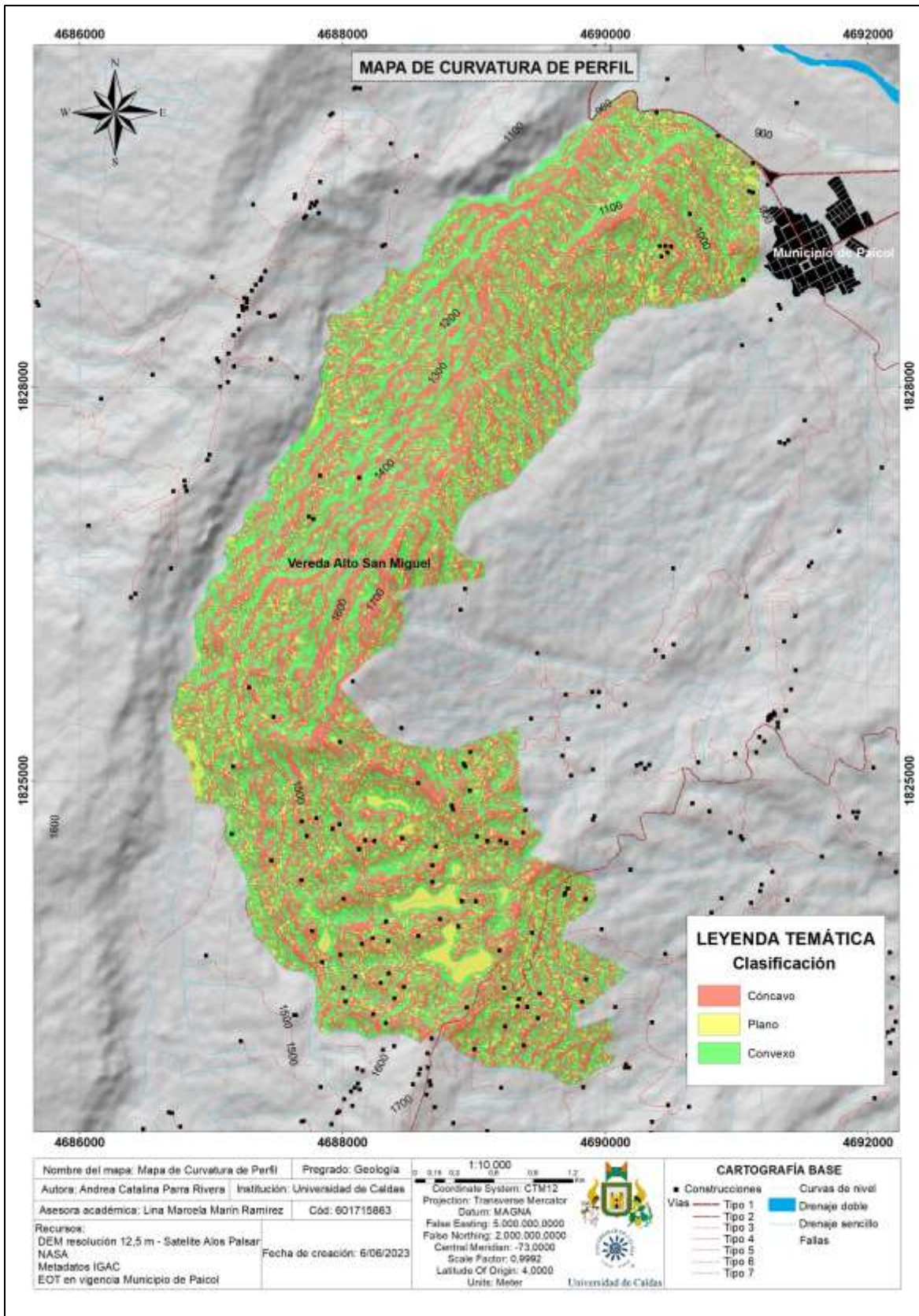


Figura 37. Mapa de curvatura de perfil para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

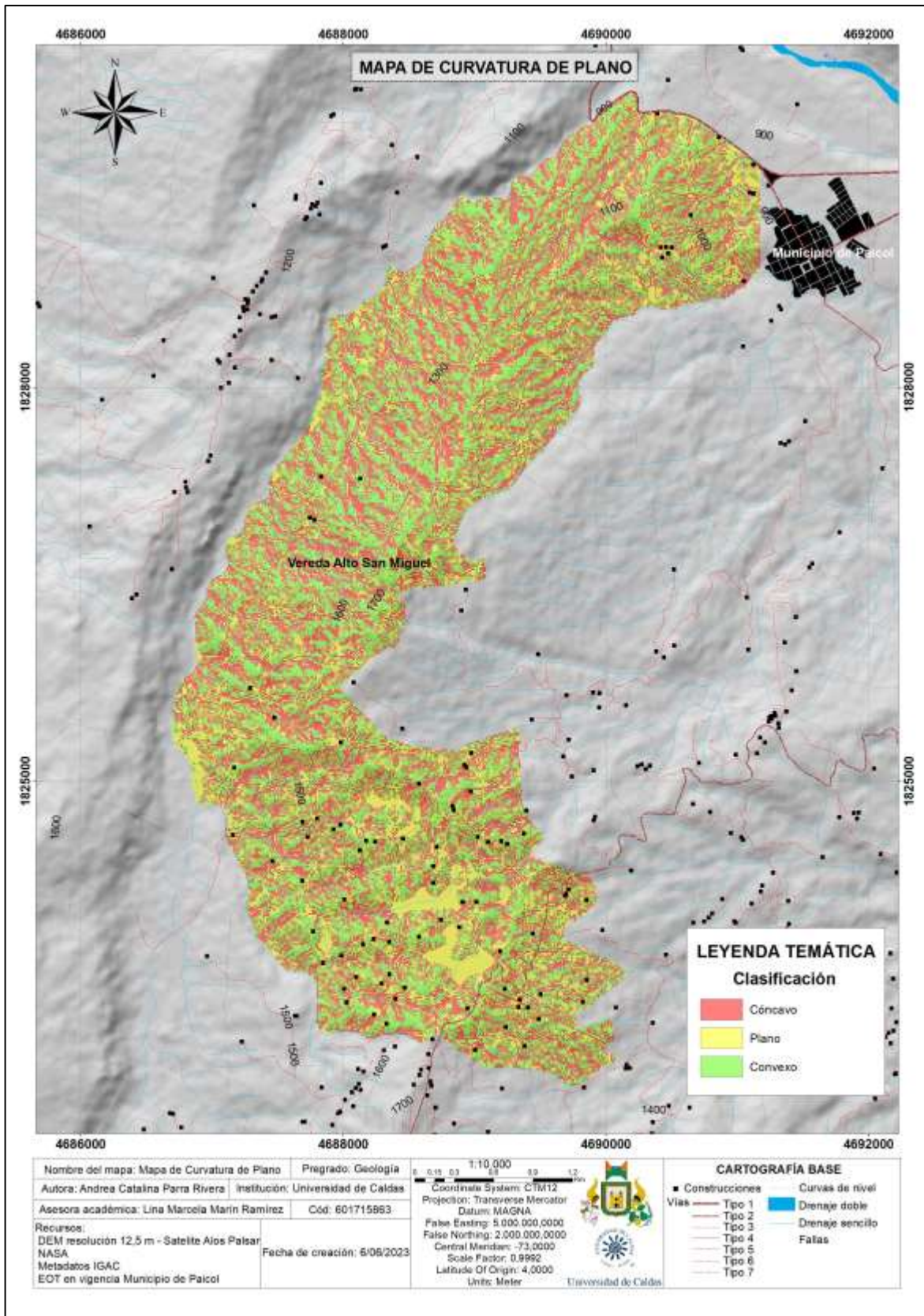


Figura 38. Mapa de curvatura de plano para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.5 Índice de rugosidad:

Se muestra el mapa de índice de rugosidad del terreno para la vereda Alto San Miguel (Figura 39). Este se divide en cinco rangos según el SGC (2013): rugosidad muy alta, alta, media, baja, muy baja, con el fin de categorizar este factor.

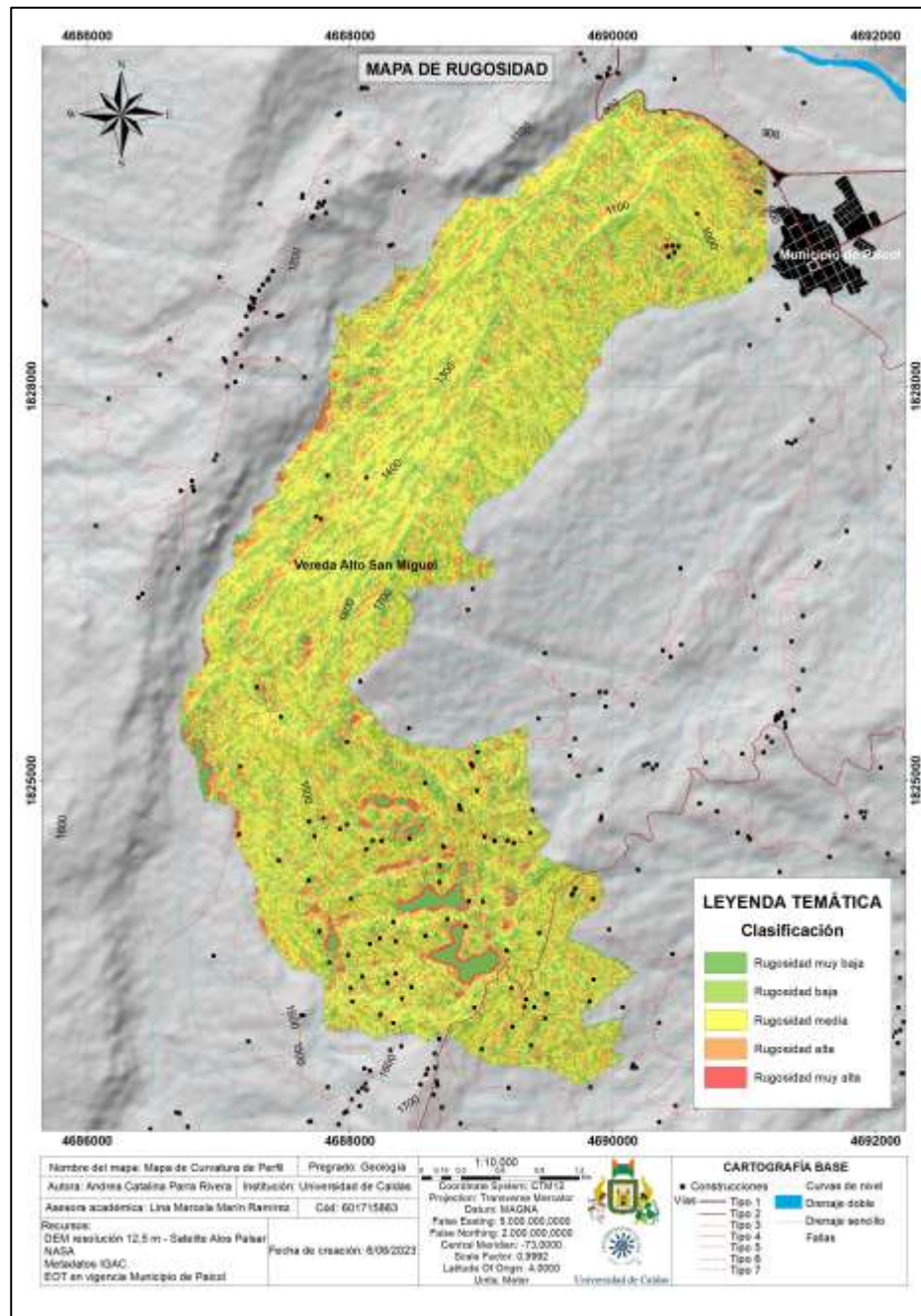


Figura 39. Mapa de Índice de Rugosidad para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.6 Área de acumulación de flujo:

Se expone el mapa de área de acumulación de flujo elaborado para la vereda Alto San Miguel (Figura 40), el cual se clasificó en cinco clases según el SGC (2013), divisoria de aguas, escorrentía lenta, flujo acumulado, drenajes no permanentes y quebradas o ríos.

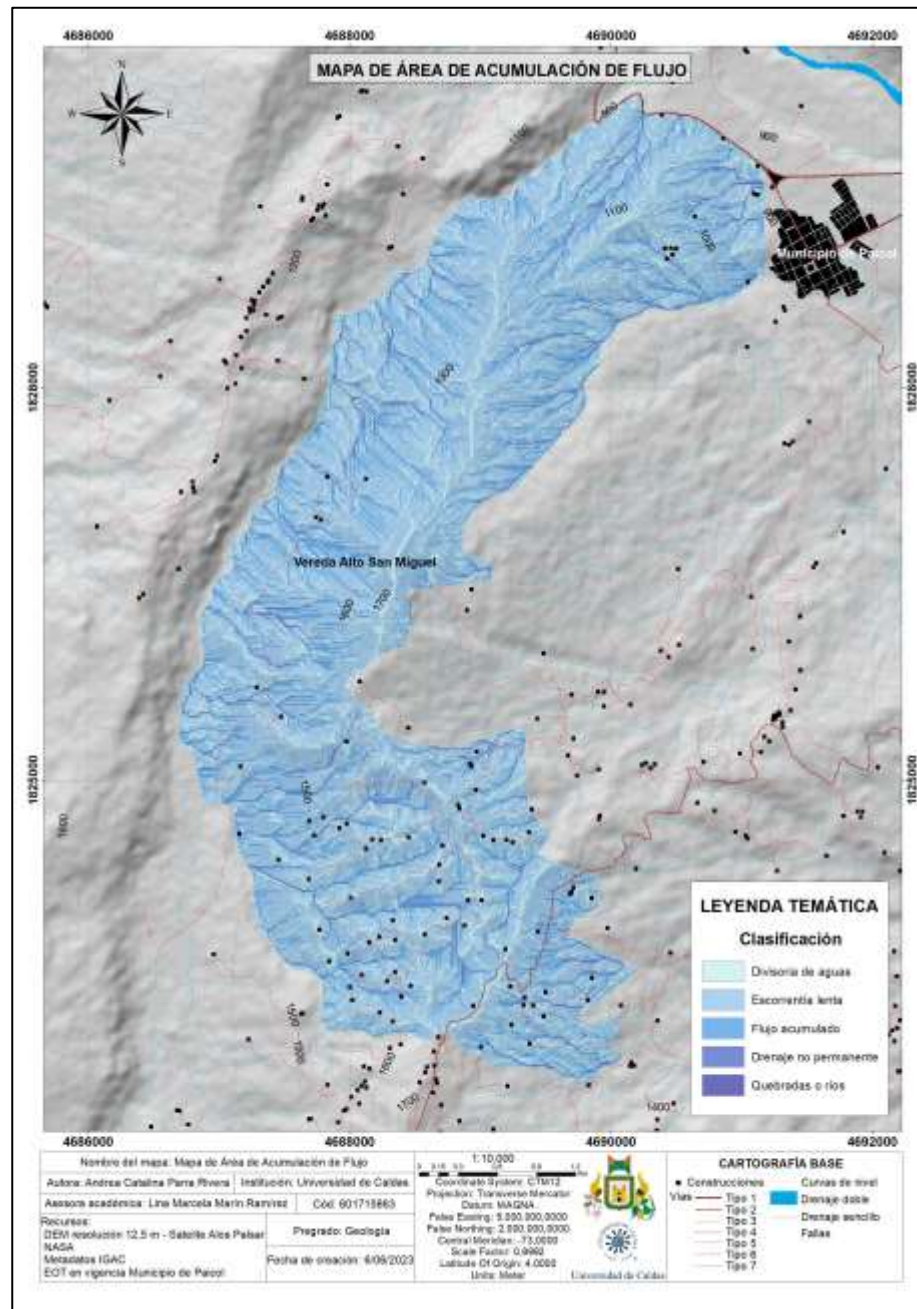


Figura 40. Mapa de Área de Acumulación de Flujo para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.2.7 Cobertura vegetal y uso del suelo:

En la vereda Alto San Miguel se presentan nueve tipos de coberturas las cuales varían entre cultivos transitorios, pastos, mosaicos de cultivos y pastos, mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, bosques de galería y ripario, vegetación secundaria o en transición, tierras desnudas y degradadas, ríos y canales, las cuales se representan en un mapa temático (Figura 41), adicionalmente, se representan estas unidades junto con su área correspondiente y su porcentaje de ocupación en el área total (Tabla 5).

De estas coberturas se deriva el uso del suelo en el territorio, el cual produce al menos seis usos actuales, entre ellos, producción, pastoreo semiintensivo, sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería, sistemas combinados de agricultura y forestería, protección, afectación y cuerpos de agua naturales, de estos, los más representativos en la zona son los sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería y seguidamente la producción y protección (Tabla 6).

Tabla 5. Estadísticas de la ocupación de la variable cobertura vegetal para la vereda Alto San Miguel.

Fuente: propia.

NIVEL I	Cobertura	Área (km2)	% Área
Territorios agrícolas	Cultivos transitorios	0,08	0,547570157
	Pastos	0,03	0,205338809
	Mosaico de cultivos y pastos	0,18	1,232032854
	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	7,34	50,23956194
Bosques y áreas seminaturales	Bosque de galería y ripario	1,23	8,41889117
	Vegetación secundaria o en transición	5,27	36,07118412
	Tierras desnudas y degradadas	0,29	1,984941821
Superficies de agua	Ríos	0,04	0,273785079
	Canales	0,15	1,026694045
TOTAL		14,61	100

Tabla 6. Estadísticas de la ocupación de uso de suelos para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

Grupo de uso	Uso actual	Área (km2)	% Área
Agricultura	Producción	0,08	0,547570157
Ganadería	Pastoreo semintensivo	0,03	0,205338809
Agricultura	Producción	0,18	1,232032854
Agrosilvopastoril	Sistemas combinados de agricultura, ganadería y forestería	6,04	41,34154689
Agroforestal	Sistemas combinados de agricultura y forestería	1,3	8,898015058
Conservación	Protección	0,13	0,889801506
Conservación	Producción -protección	1,1	7,529089665
Agroforestal - conservación	Producción - protección	5,27	36,07118412
Sin uso	Afectación	0,29	1,984941821
Cuerpos de agua naturales	Cuerpos de agua naturales	0,04	0,273785079
Cuerpos de agua naturales	Cuerpos de agua naturales	0,15	1,026694045
TOTAL		14,61	100

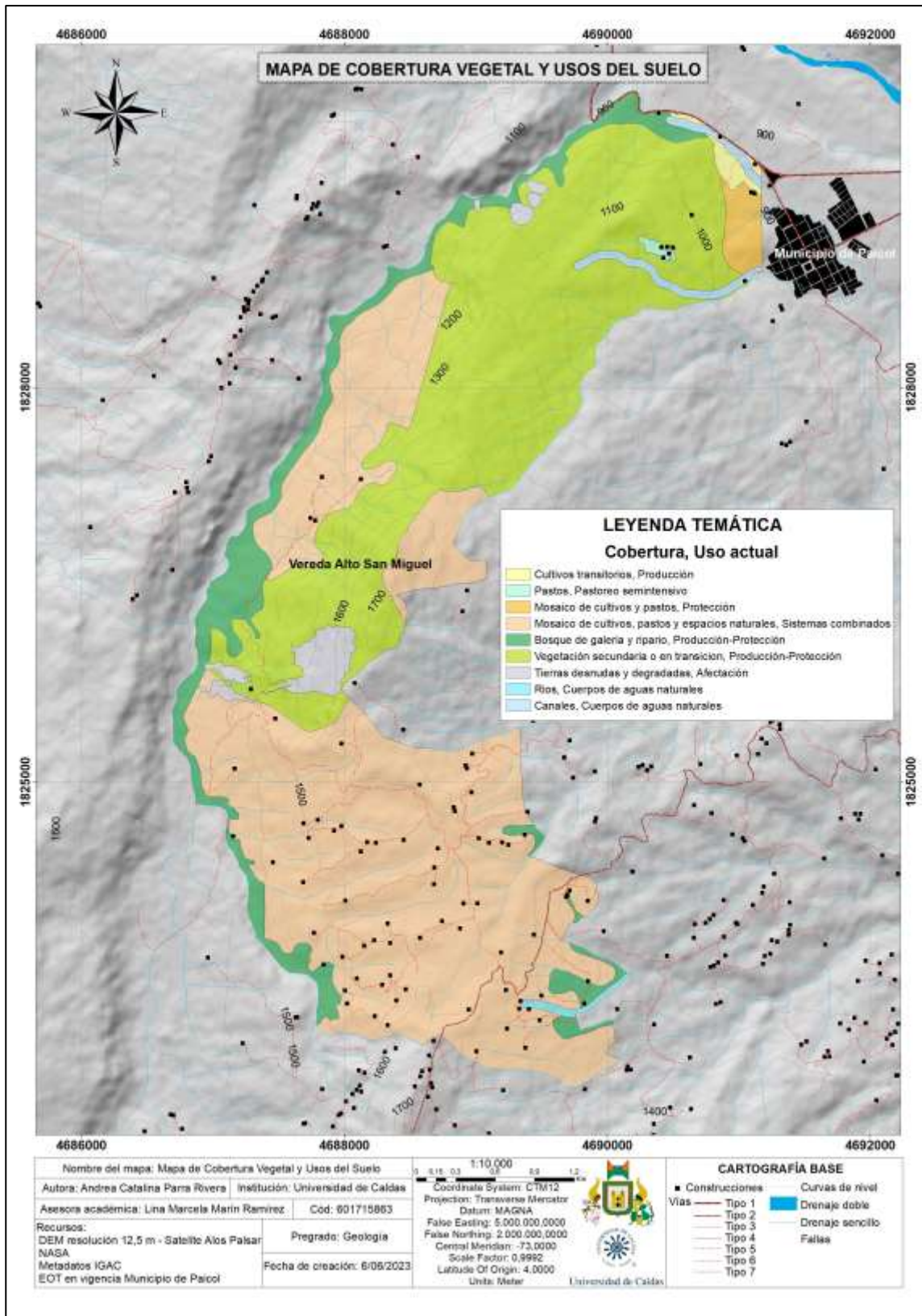


Figura 41. Mapa de cobertura vegetal y usos del suelo para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

8.3 Pesos de evidencia y análisis de susceptibilidad:

Cada una de las variables de entrada V1, V2, V3, X1, X2, X3, X4, X5 fueron evaluadas mediante el método estadístico bivariado, aplicando la metodología para el cálculo de pesos de evidencia, estos, se derivaron de los mapas anteriormente expuestos. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 7. Pesos de evidencia para la variable explicativa Geomorfología.

V1		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	Ftas	-28,2399276
2	Slemaml	-2,6270867
3	Slcpac	-2,456367898
4	Fpac	-28,74789887
5	Dlomam	-29,31609443
6	Dmo	-31,88008934
7	Dldal	4,224725705
8	Dleal	-30,24246249

Tabla 8. Pesos de evidencia para la variable explicativa Unidades Geológicas y Superficiales.

V2		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	Rds/lm	-27,4766109
2	Rdv	-27,5324229
3	Ris/lm	-30,4606161
4	Stv/c/lm	-0,12133482
5	Stf/tz	-28,2399276
6	Rds/ar	-27,5616127
7	Srs/ar	0,762493898
8	Stf/Lli	-27,7106881

Tabla 9. Pesos de evidencia para la variable explicativa Cobertura vegetal y usos del suelo.

V3		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	Canales	-28,36565225
2	Bosque de galería y ripario	-28,40607829
3	Pastos	-26,63896578
4	Cultivos transitorios	-27,72506573
5	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	-2,146080163
6	Mosaico de cultivos y pastos	-28,57138048
7	Bosque de galería y ripario	-0,249720417
8	Vegetación secundaria o en transición	2,376480017
9	Ríos	-27,08267488
10	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	-30,6420622

Tabla 10. Pesos de evidencia para la variable explicativa Pendientes.

X1		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	0 - 2°	-2,016839225
2	2 - 4°	-0,710762666
3	4 - 8°	-1,369675691
4	8 - 16°	-1,177719142
5	16 - 35°	0,787734165
6	35 - 55°	2,062914611
7	> 55°	-22,61778581

Tabla 11. Pesos de evidencia para las variables explicativas curvatura de plano y de perfil.

CÓDIGO	CLASE	X2	X3
		WF	WF
1	Cóncavo	0,171556839	0,114373209
2	Plano	-0,262804707	-0,479752151
3	Convexo	-0,034068696	0,065197176

Tabla 12. Pesos de evidencia para la variable explicativa índice de rugosidad.

X4		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	Baja	-0,692360726
2	Muy baja	0,136988843
3	Media	0,071130048
4	Alta	-0,096804426
5	Muy alta	-0,517535304

Tabla 13. Pesos de evidencia para la variable explicativa área de acumulación de flujo.

X5		
CÓDIGO	CLASE	WF
1	Divisoria de aguas	-0,570854665
2	Escorrentía lenta	0,203144176
3	Flujo acumulado	0,434334065
4	Drenaje no permanente	-2,769460436
5	Quebradas o ríos	-25,41149794

Fuente de Tablas 7 – 13: propia.

Se evidencia qué clase de cada factor mencionado es independiente de la distribución espacial de los deslizamientos (valores cercanos a cero), las que con su presencia favorecen directamente a la ocurrencia de estos procesos (valores positivos) y las que con su ausencia contribuyen a esta ocurrencia (valores negativos).

Mediante estas tablas, igualmente, se refleja qué factor contribuyó más en el LSI y por consiguiente qué clase. En este caso, la clase que más favoreció con su presencia al modelo fue el número siete, la cual equivale a ladera denudada abrupta de longitud larga, que pertenece a la variable de entrada V1 (elementos geomorfológicos), siendo un resultado muy adecuado, ya que era lo esperado según los deslizamientos reportados y las condiciones geológicas en la zona de estudio, así mismo, los X2, X3 y X4, no tuvieron gran participación en la generación del resultado.

Se expone el mapa de Susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda Alto San Miguel, el cual es generado a través del modelamiento de los resultados obtenidos del cálculo del LSI, usando el método WofE y aplicándolo a los factores anteriormente mencionados, utilizando herramientas del software ArcMap (Figura 43).

Principalmente, en el resultado del LSI se obtiene un conjunto de datos, que se clasifican en rangos para evaluar la diferencia de las categorías de la población de Susceptibilidad, en este

caso se usa rupturas naturales de Jenks, a los cuales se les aplica estadística bivariada para estimar la validez del modelo mediante la curva de éxito y el área bajo la curva.

Se observa la evaluación para el modelo a partir del valor AUC, de su respectiva curva ROC, el resultado que se obtuvo está por encima del mínimo aceptado, contando con una exactitud del 88,3% (Figura 42).

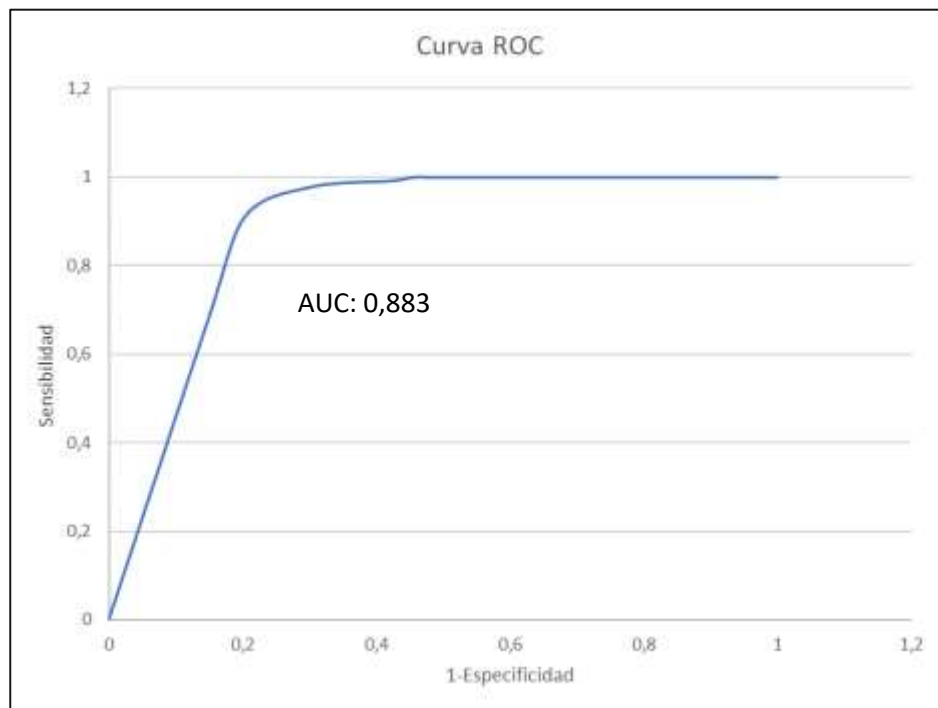


Figura 42. Gráfico de la curva ROC para los datos obtenidos del LSI y su área bajo la curva (AUC). Fuente: propia.

La curva proporciona una base para distinguir las categorías de la susceptibilidad, estas se derivaron de los cambios de pendiente más representativos y se clasificaron en tres zonas, cada una con una probabilidad de ocurrencia relativa de deslizamientos: susceptibilidad baja, susceptibilidad media y susceptibilidad alta.

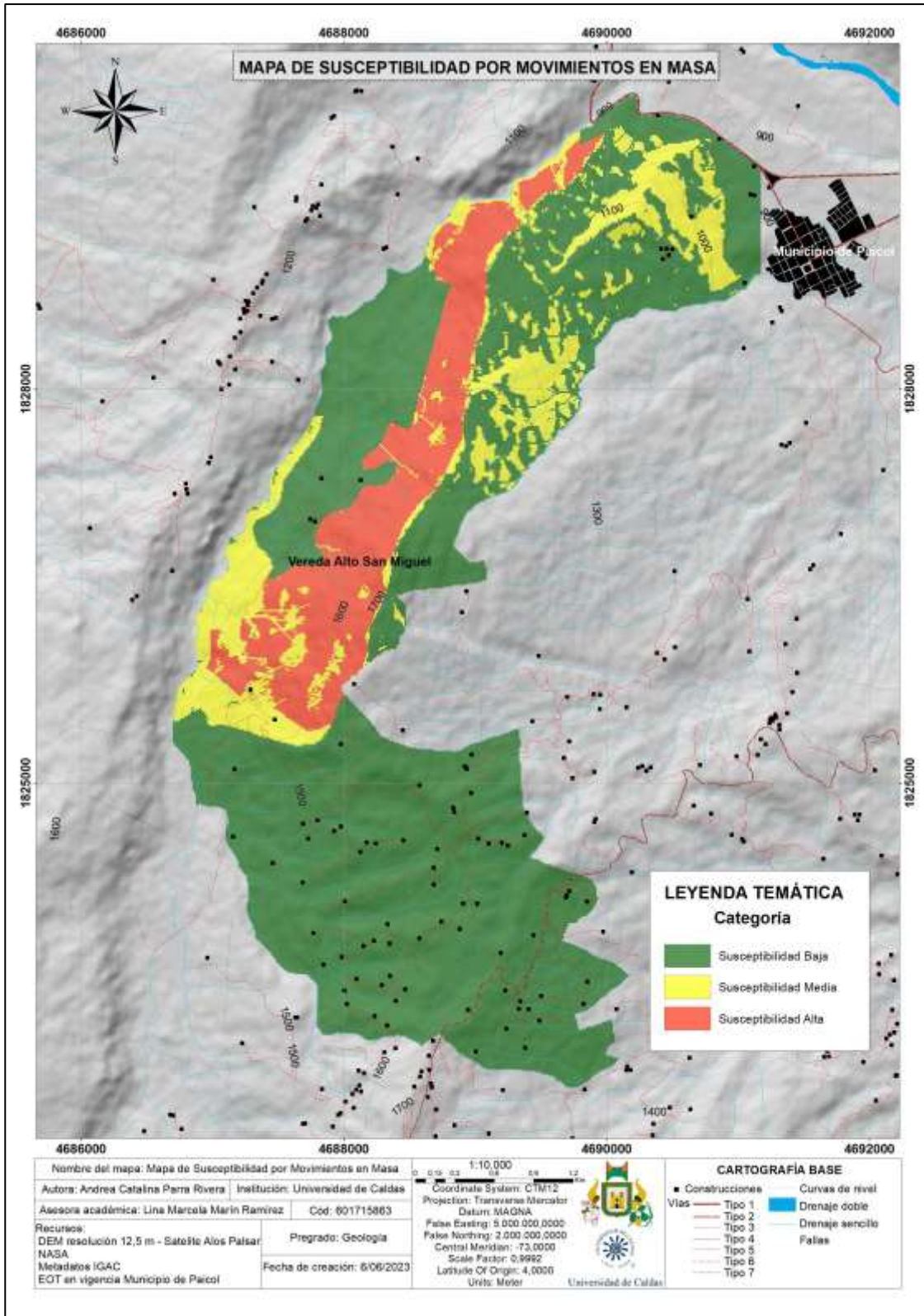


Figura 43. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda Alto San Miguel. Fuente: propia.

- **Susceptibilidad Baja:**

La vereda Alto San Miguel se encuentra en su mayoría determinada por esta categoría, la cual se zonifica en mayor parte hacia el sur, al W en menor proporción y al NE se observa de manera dispersa junto con la susceptibilidad media. Esta categoría cuenta con pendientes planas a moderadamente abruptas ($0 - 16^\circ$), hallándose sobre elementos geomorfológicos como algunas zonas de las laderas estructurales, laderas erosivas y onduladas, montículos y ondulaciones denudacionales y geoformas de origen fluvial, además, se encuentran en mayoría en la unidad de suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita y en unidades de rocas, con una cobertura vegetal de vegetación secundaria o en transición, bosques y mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales. Este nivel cuenta con procesos de erosión menores y en bajas cantidades, no afectando ni propiciando la inestabilidad.

- **Susceptibilidad Media:**

Esta categoría se localiza de manera dispersa en la vereda Alto San Miguel, concentrándose en zonas donde se encuentren pendientes abruptas ($16 - 35^\circ$) y en geoformas como algunas porciones de laderas estructurales, laderas contrapendiente y pequeñas áreas de laderas denudadas, presenciándose una cobertura vegetal de bosques y vegetación secundaria o en transición y en baja proporción tierras desnudas y degradadas. Este nivel de susceptibilidad se asocia con los suelos residuales a partir de la Formación Caballos y Hondita y a partir de la Formación Saldaña, además de presenciarse en algunos suelos de transporte coluvial. Cuenta con algunas pocas áreas de afectación por la presencia de procesos morfodinámicos y procesos de erosión laminar.

- **Susceptibilidad Alta:**

Esta categoría se encuentra relacionada geomorfológicamente con los conos de deslizamientos, escarpes y en una gran porción a ladera desnuda abrupta, estas geoformas cuentan con pendientes muy abruptas a extremadamente abruptas ($35 - >55^\circ$). Se encuentran mayormente en coberturas de vegetación secundaria o en transición y en tierras desnudas y degradadas. Esta zonificación se ubica en una mayor parte en suelo residual a partir de la Formación Saldaña, en el suelo de transporte coluvial y de menor manera en el suelo residual de la Formación Caballos y Hondita. En este nivel se posicionan la mayor parte de movimientos en masa registrados en el Inventario de procesos morfodinámicos y procesos de erosión laminar y en surcos.

- **Hipótesis de falla:**

Se evidencia la categorización de las clases involucradas dentro de cada factor condicionante de susceptibilidad, según el criterio experto, el conocimiento del área de estudio, y análisis del inventario de procesos morfodinámicos, clasificándolas en las tres categorías resultantes y comparándolas con los resultados del cálculo estadístico de los pesos de evidencia obtenidos para el estudio (Tabla 14).

En esta tabla se logra evidenciar cómo las hipótesis planteadas en un inicio usando el conocimiento recolectado mediante información secundaria y trabajo de campo acerca de las clases que condicionan o no la ocurrencia de movimientos en masa, es coherente con los resultados obtenidos a través de la metodología aplicada (WofE). Solo se encontraron algunas pequeñas discordancias entre ambos para el factor de cobertura vegetal, sin embargo, son despreciables.

Tabla 14. Hipótesis de falla propuesta para el estudio. Fuente: propia.

Categoría	Clases aportantes	
	Según conocimiento	Según pesos de evidencia
Susceptibilidad Baja	<p>Esta categoría se asocia a pendientes planas a moderadamente abruptas, con geoformas de origen fluvial, montículos y ondulaciones denudacionales, laderas erosivas y onduladas y las laderas estructurales con menor pendiente, además, se relacionan con unidades de suelo residual de la Formación Caballos y Hondita que se encuentran sobre laderas más estables, todas las unidades de rocas, debido a su mayor resistencia y suelos transportados fluvial, por su pendiente casi plana. Las coberturas presentes son: la porción con menor pendiente de la vegetación secundaria o en transición, bosques de galería y riparios y mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, cultivos transitorios como los cereales. Estas clases se caracterizan por no tener ningún tipo de deslizamiento y por presentar erosión menor.</p>	<p>Esta categoría cuenta con pendientes planas a moderadamente abruptas (0 – 16°), hallándose sobre elementos geomorfológicos como algunas zonas de las laderas estructurales, laderas erosivas y onduladas, montículos y ondulaciones denudacionales y geoformas de origen fluvial, además, se encuentran en su mayoría en la unidad de suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita y en unidades de rocas, con una cobertura vegetal de vegetación secundaria o en transición, bosques y mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales. Este nivel cuenta con procesos de erosión menores y en bajas cantidades, no afectando ni propiciando la inestabilidad.</p>
Susceptibilidad Media	<p>Este nivel se asocia geomorfológicamente a laderas contrapendiente, laderas estructurales y laderas denudadas, con una pendiente abrupta. Las coberturas normalmente corresponden a vegetación secundaria o en transición, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, bosques con una pendiente abrupta y sobre pocas tierras desnudas y degradadas. Esta categoría está presente en suelos residuales a partir de las Formaciones Caballos, Hondita, en mayor medida y a partir de la Formación Saldaña, esto debido a la resistencia del material, también, en baja proporción de suelos transportados coluvial causados por deslizamientos. En general, se caracteriza por su pendiente y por la baja presencia de movimientos en masa y erosión.</p>	<p>Esta categoría se localiza en zonas donde se encuentran pendientes abruptas (16 – 35°) y en geoformas como algunas porciones de laderas estructurales, laderas contrapendiente y pequeñas áreas de laderas denudadas, presenciándose una cobertura vegetal de bosques y vegetación secundaria o en transición y en baja proporción tierras desnudas y degradadas. Este nivel de susceptibilidad se asocia con los suelos residuales a partir de la Formación Caballos y Hondita y a partir de la Formación Saldaña, además de presenciarse en algunos suelos transportados coluvial. Cuenta con algunas pocas áreas de afectación por la presencia de procesos morfodinámicos y procesos de erosión laminar.</p>
Susceptibilidad Alta	<p>Esta categoría está asociada al elemento geomorfológico ladera denudada abrupta, en la cual se encuentran la mayor parte de los movimientos en masa inventariados los cuales están representados mediante conos de deslizamiento y escarpes, presentando una pendiente muy abrupta a abrupta. Las UGS están relacionadas a esta categoría en lo que se refiere a suelos residuales y suelos transportados coluvial. Cuenta con una cobertura vegetal de vegetación secundaria o en transición y tierras desnudas y degradadas. Este nivel se caracteriza por contener la mayoría de los deslizamientos, procesos de erosión mayor y por su pendiente.</p>	<p>Esta categoría se encuentra relacionada geomorfológicamente con los conos de deslizamientos, escarpes y en una gran porción de la ladera denudada abrupta, estas geoformas cuentan con pendientes muy abruptas a extremadamente abruptas (35 - >55°). Se encuentran mayormente en coberturas de vegetación secundaria o en transición y en tierras desnudas y degradadas. Esta zonificación se ubica en una mayor parte en suelo residual a partir de la Formación Saldaña, en el suelo transportado coluvial y de menor manera en el suelo residual a partir de la Formación Caballos y Hondita. En este nivel se posicionan la mayor parte de movimientos en masa registrados en el Inventario de Procesos Morfodinámicos y procesos de erosión laminar y en surcos.</p>

9 Conclusiones

- Los estudios de Susceptibilidad en suelo urbano y rural son necesarios en los Planes y Esquemas de Ordenamiento Territorial, debido a que aportan favorablemente al conocimiento geológico y geotécnico, estableciendo planes para la prevención y/o mitigación del riesgo, de este modo, preservando y salvaguardando las vidas humanas y los bienes materiales que habitan en la zona.
- Los mapas de susceptibilidad son esenciales para la planificación del uso de la tierra a nivel local/regional, generando, con base en la información que contiene este, nuevos proyectos que garanticen un desarrollo más seguro del territorio.
- Los métodos estadísticos, debido a que son basados en datos, generan un mayor grado de certeza, en comparación de un método heurístico basado en el conocimiento; los primeros, se ejecutan a través de la información recolectada en el levantamiento de campo sobre los factores condicionantes y el inventario de deslizamientos y se procesan cuantitativamente (no de manera subjetiva), obteniendo resultados más confiables referente a la susceptibilidad.
- El ambiente geomorfológico que modeló el paisaje inicialmente en la zona de estudio corresponde al estructural, en consecuencia de la geología estructural que originó una serie de pliegues y cabalgamientos en el territorio; sin embargo, en la actualidad y por materia de la escala usada, se puede evidenciar que la mayoría de áreas de este territorio están siendo modeladas por procesos erosivos, por consiguiente, generando y presentando geoformas provenientes de un ambiente denudativo, siendo así una superficie propensa a la ocurrencia de movimientos en masa.

- Los factores dominantes que influyen en la ocurrencia de deslizamientos son en primer lugar la geomorfología, seguido de la cobertura vegetal, pendientes, unidades geológicas superficiales, curvatura de plano, curvatura de perfil e índice de rugosidad. Las últimas tres variables fueron despreciadas a la hora de generar el LSI.
- Se puede observar una retroalimentación positiva en las laderas que presentan procesos de movimientos en masa y erosivos intensos en la zona de Alto San Miguel. La coexistencia de los factores condicionantes de deslizamientos en esta misma área genera una amplificación de estos mismos procesos a medida que va evolucionando el paisaje.
- El mapa final de susceptibilidad por deslizamientos en la vereda Alto San Miguel, generado a partir del método WofE, evidencia resultados satisfactorios y coherentes entre este y los datos del inventario de procesos morfodinámicos, así mismo, la curva de éxito y validación muestra que el modelo resultante tiene alta confiabilidad en lo que concierne a la estimación de la probabilidad de susceptibilidad de las áreas evaluadas.

10 Recomendaciones

- Se recomienda incluir los estudios de susceptibilidad en los planes y esquemas de Ordenamiento Territorial en todos los municipios de Colombia, para así disminuir las pérdidas y afectaciones humanas y económicas a causa de la ocurrencia de diferentes tipos de movimientos en masa, los cuales se generan principalmente como consecuencia de no implementar estrategias territoriales para la gestión del riesgo.
- Se sugiere renovar los planes y esquemas de Ordenamiento Territorial en cuanto termine su vigencia, actualizando los estudios básicos y detallados de susceptibilidad y amenaza, manteniendo así un constante conocimiento de la evolución geológica y geomorfológica del área, con el fin de estructurar nuevos proyectos, generando un desarrollo seguro en el territorio.
- Socializar y promover con las comunidades que residen en el territorio sobre temas de gestión del riesgo, de esta manera se concientiza a la sociedad de los posibles fenómenos naturales que podrían ocurrir en la región y su posible afectación, así, en equipo, junto con los entes reguladores de cada municipio, mantenerse informados y atentos ante cualquier evidencia de posibles amenazas y en conjunto poder reducir y mitigar el riesgo.

11 Referencias

- ArcGIS Desktop. (s.f.). *Función de curvatura*.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>
- Bonham-Carter GF (1994). *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS comp Meth Geos vol 13*. New York.
- Carvajal Perico, J. H. (2011). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: INGEOMINAS.
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Cediel, F.; Mojica, J.; Macía, C. (1980). *Definición estratigráfica del Triásico en Colombia, Suramérica, Formaciones Luisa, Payandé y Saldaña*. Newsletter Stratigraphic.
- Charman, P. V., & Murphy, B. W. (2000). *Soils: their properties and management* (2nd ed.). Melbourne y Oxford: Oxford University Press.
- Congreso de Colombia. (2012, 24 de abril). *Ley 1523 de 2012*. Departamento Administrativo de la Función Pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Corrigan, H. (1967). *Guidebook to the geology of Upper Magdalena Basin, Northern portion*. Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysists. Bogotá.
- Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). *Landslides. Investigation and mitigation*. Special Report, Transportation Research Board, National Research Council. Washington DC.

Dearman, W. (1974). *Weathering Classification in the characterization of rock for engineering purposes in British practice*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur.

Hermelín, M. (1985). *Suelos, Rocas y Formaciones Superficiales*. DYNA.

Hubach, E.; Alvarado, B. (1932). *Estudios geológicos en la ruta Popayán – Bogotá*. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.

Ibañez-Mejía, M., Ruiz, J., Valencia, V.a., Cardona, A., Gehrels, G.E. & Mora, A.R. (2011). *The Putumayo Orogen of Amazonia and its implications for Rodinia reconstructions: New U–Pb geochronological insights into the Proterozoic tectonic evolution of northwestern South America*. Precambrian Research. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.005>.

IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000*. Bogotá: Scripto Ltda.

IDEAM. (2012). *Ecosistemas*. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>

Iliá, I., Tsangaratos, P. (2016). *Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map*. Landslides.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2004b). *Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería - Volumen II*. Bogotá.

Marquínez et al. (2002). *Mapa Geológico de Colombia Plancha 344 Tesalia Escala 1:100.000*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: INGEOMINAS.

Pamela, Sadisun, I. A, Arifianti, Y. (2018). *Weights of Evidence Method for Landslide Susceptibility Mapping in Takengon, Central Aceh, Indonesia*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

Patarroyo, P. (1993). *Las formaciones cretácicas Hondita y Loma Gorda a propósito de la nomenclatura estratigráfica del Valle Superior del Magdalena, Colombia*. 6 Congreso Colombiano Geología. Medellín.

PMA: GCA. (2007). *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional.

Porta, J. DE. (1965). *Estratigrafía del Cretácico Superior y Terciario en el extremo Sur del Valle Medio del Magdalena*. UIS, Boletín Geológico. Bucaramanga.

Presidencia de la República. (2014, 19 de septiembre). *Decreto 1807 de 2014*. Departamento Administrativo de la Función Pública.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>

Priem, H. N. A.; Kroonenberg, S.B.; Boelrijk, N. A. I. M.; Hebeda, E. H. (1989). *Rb-Sr and K-Ar evidence for the presence of a 1.6 GA basement underlying the 1.2 Ga Garzon-Santa Marta Granulite Belt in the Colombian Andes*. Precambrian Research. Amsterdam.

Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. (2020). *Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes*. In: Gómez, J. & Mateus-Zabala, D. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 35, p. 37–63. Bogotá.

<https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>.

Rodríguez, G. (1995). *Petrografía del Macizo de La Plata. Departamento del Huila*. Rev. Ingeominas. Santa Fe de Bogotá.

Rodríguez, G., Arango, M.I., Zapata, G., y Bermúdez, J.G. (2016). *Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia, Formación Saldaña. Cordilleras Central y Oriental Tolima, Huila, Cauca y Putumayo*. Servicio Geológico Colombiano. Medellín.

Servicio Geológico Colombiano (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa Esc. 1:100.000*. Bogotá D.C.

Servicio Geológico Colombiano (2017, octubre). *Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos geológicos de Colombia*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2017, diciembre). *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1: 25.000*. Bogotá.

Suárez Niño, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Restrepo, J.J. & Toussaint, J.F. (1989). *Terrenos alóctonos en los Andes colombianos: Explicación de algunas paradojas geológicas*. V Congreso Colombiano de Geología. Memoirs, I, p. 92–107. Bucaramanga

Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003, noviembre). *Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment*. Natural Hazards.

Van Westen, C.J. (2002). *Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping*. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Netherlands.

Van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C., Mantovani, F. (1999). *Comparing landslide hazard maps*. In Natural Hazards Volume 20.

Van Westen, C.J.; Rengers, N.; Soeters, R. (2003). *Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment*. Natural Hazards.

Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. The Hague: Smiths Publishers.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. (R. L. Schuster, & R. J. Krizek, Eds.). *Special Report 176: Landslides: Analysis and control*.

Velandia et al. (2001). *Levantamiento Geológico de la Plancha 366 Garzón Escala 1:100.000*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: INGEOMINAS.

Vergara, L. E. (1994). *Stratigraphic, micropaleontologic and organic geochemical relations in the Cretaceous of the Upper Magdalena Valley, Colombia*. Gießener Geol. Schriften. Giessen.

12 Anexos

TÉRMINO	TAMAÑO DE GRANO EN ROCAS (mm)	EQUIVALENCIA CON TIPO DE SUELO
Grano muy grueso	> 60	Cantos y guijarros
Grano grueso	2 - 60	Gravas
Grano medio	0,06 - 2	Arenas
Grano fino	0,002 - 0,06	Limos
Grano muy fino	< 0,002	Arcillas

Anexo 1. Clasificación del tamaño de grano en las rocas. Fuente: SGC (2017).

TEXTURA FÁBRICA	TIPO GENÉTICO	CARACTERÍSTICAS
Cristalina Masiva	Igneas plutónicas y volcánicas de cualquier litología y composición, como granito, basalto, diabasa, etc. Sedimentarias químicas como la caliza o el chert	Metamórficas masivas, como cuarcita, mármol o neis con poca mica Las rocas de este grupo son las más resistentes y menos deformables, independientemente de su origen y estas propiedades no están afectadas por direccionalidad
Cristalina Foliada		Metamórficas foliadas, como pizarra, esquistos, filita y neis con bastante mica Estas rocas son resistentes, algo menos que las anteriores, y sus propiedades están direccionadas por los planos de esquistosidad y foliación
Clástica Consolidada	Clásticas de granulometría fina, que abarca las lutitas	Estas rocas presentan un comportamiento variable esfuerzo-deformación, y poseen direccionalidad de sus propiedades mecánicas. Las más resistentes son las variedades shale y argilita. De estas, las cementadas con sílice y carbonato de calcio son las más durables.
Clástica Cementada	Clásticas de granulometría gruesa, que abarca las areniscas y los conglomerados	
Rocas de falla o Brecha de falla	Cualquier litología afectada por fallamiento intenso	Presencia de brecha (fragmentos visibles > 30% de masa de roca); gouche (fragmentos visibles < 30% de masa de roca) y brechas trituradas (con fragmentos de roca entre > 0,5 cm y < 0,1 cm)

Anexo 2. Clasificación de las rocas en general según su textura/estructura. Fuente: SGC (2017).

CALIDAD DE MACIZO	CLASE O TIPO DE MACIZO	RANGO GSI
Muy mala	VIII - IX	0 - 20
Mala	VI - VII	20 - 40
Regular	IV - V	40 - 60
Buena	II - III	60 - 80
Muy buena	I	80 - 100

Anexo 3. Rangos de clasificación de macizo según el GSI. Fuente: SGC (2017).

HORIZONTES	RECONOCIMIENTO DE CAMPO	COMPORTAMIENTO GENERAL
VI SUELO RESIDUAL	No se reconoce fábrica relicta o heredada; a lo sumo algo de fábrica mineral. Retorno de agua turbia en la perforación, sin pérdida	Incompetente como material de fundación e inestable en excavaciones, si no hacen obras de protección y mitigación
V ROCA COMPLETAMENTE DESCOMPUESTA (saprolito fino)	Roca decolorada muy deleznable con fábrica relicta. Retorno de agua turbia en la perforación, con algo de pérdida. <i>Sin recobra</i>	Puede excavar a mano; incompetente como fundación de grandes estructuras; en cortes de talud se requiere protección vegetal
IV ROCA ALTAMENTE DESCOMPUESTA (saprolito grueso)	Roca decolorada; los fragmentos se pueden desmenuzar aún con la mano. Pueden recobrase algunos núcleos de perforación. Pérdidas de agua de lavado. <i>Recobra de núcleos < 30% - 40%</i>	Las fallas de los taludes son controladas por la fábrica relicta o heredada
III ROCA MODERADAMENTE DESCOMPUESTA	Roca decolorada; los fragmentos no pueden romperse con la mano y presentan meteorización química. Se pierde casi toda el agua de lavado si no se usa lodo. <i>Recobra de núcleos > (30% - 40%)</i>	Requiere el uso de explosivos para excavar; sirve como fundación de estructuras pequeñas y puede usarse para relleno semipermeable; su estabilidad en cortes depende de su actitud estructural
II ROCA DÉBILMENTE DESCOMPUESTA (roca)	Roca algo decolorada, presenta apariencia de roca fresca, salvo que posee meteorización superficial en las diaclasas y fracturas. Sin meteorización química pero con bastante oxidación superficial	Requiere el uso de explosivos para excavar; estable como fundación de grandes estructuras; las diaclasas abiertas y la posibilidad de que circule agua a presión por estas es desfavorable para la estabilidad de excavaciones
I ROCA FRESCA (roca)	Roca parental sana, sin oxidación superficial o muy poca	Estable como fundación; las fallas de taludes de corte están controladas estructuralmente

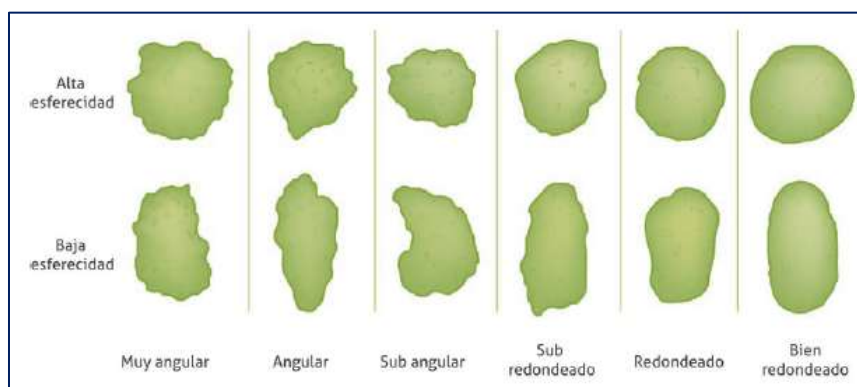
Anexo 4. Descripción y comportamiento del perfil de meteorización. Fuente: Dearman (1974) en SGC (2017).

TÉRMINO	DESCRIPCIÓN
Seco	No hay humedad visible.
Húmedo	Contiene algo de humedad pero no se observa agua libre; el material se puede comportar plásticamente pero no fluye.
Mojado	Contiene humedad suficiente para comportarse en parte como un líquido pero este no fluye.
Muy mojado	El agua fluye de la pasta de suelo.

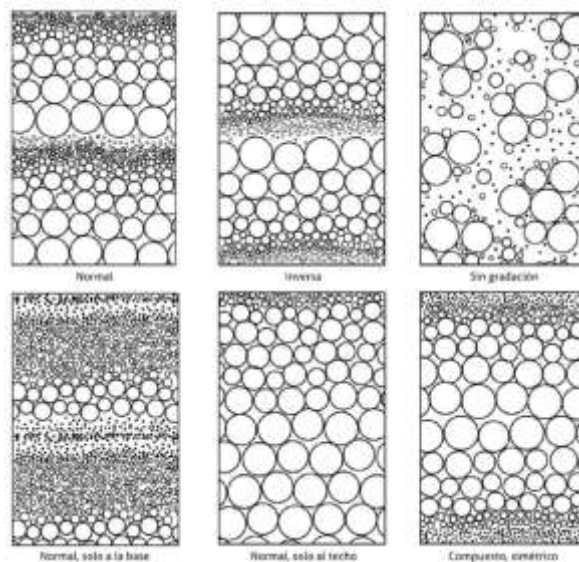
Anexo 5. Terminología para describir la humedad natural o condición de humedad en el campo. Fuente: Varnes (1978), en SGC (2017).

TAMAÑO (mm)	CLASIFICACIÓN	TEXTURA
> 300	Bloques	Bloques y cantos
75 - 300	Cantos	
19 - 75	Gravas gruesas	Gravosa
4,75 - 19	Gravas finas	
2,0 - 4,75	Arenas gruesas	Arenosa
0,425 - 2,0	Arenas medias	
0,075 - 0,425	Arenas finas	
< 0,075	Finos (Limos y arcillas)	Arcillosa, arcillo limosa, limo arcillosa y limosa

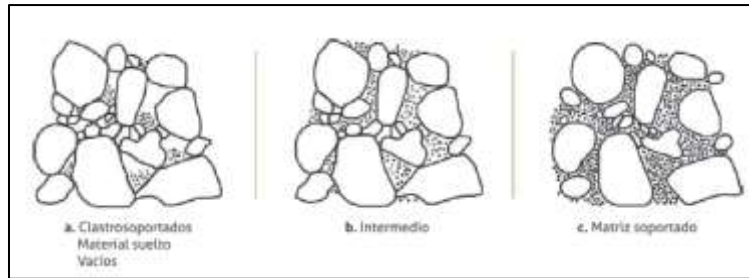
Anexo 6. Texturas de los suelos según el tamaño de las partículas. Fuente: ASTM en SGC (2017).



Anexo 7. Carta de comparación visual de la redondez y esfericidad de los clastos o granos. Fuente: Coe et al. (2010), en SGC (2017).



Anexo 8. Tipos de gradación. Fuente: Coe et al. (2010), en SGC (2017).



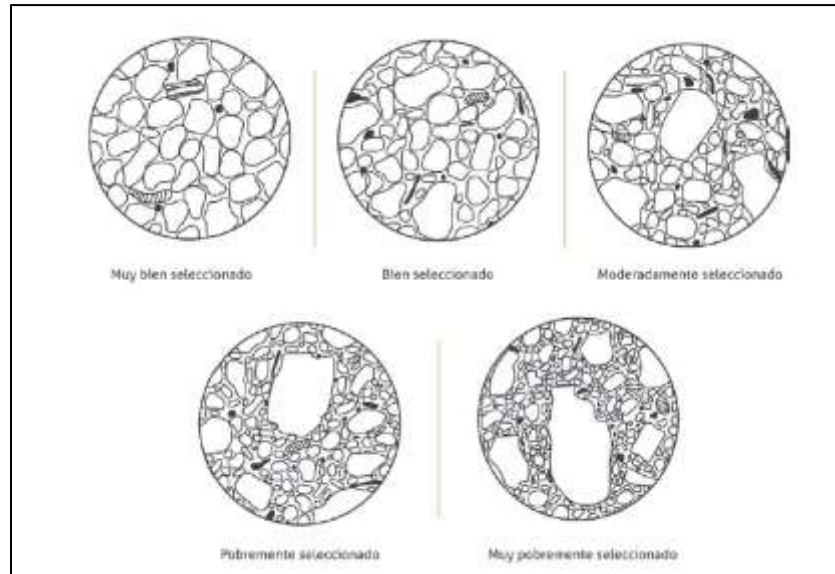
Anexo 9. Tipos de empacamiento o estructuras de soporte en depósitos. Fuente: Suarez (1998).

DESCRIPCIÓN	DESCRIPCIÓN PRUEBA DE CAMPO
Débil (Suelta)	Se desmorona o rompe con poca presión en los dedos.
Moderada (Media)	Se desmorona o rompe con considerable presión de los dedos.
Fuerte (Densa)	No se desmorona con la presión de los dedos.

Anexo 10. Criterios para describir la compacidad. Fuente: U.S. Bureau of Reclamation (2001), en SGC (2017).

TÉRMINO	PRUEBA DE CAMPO
Muy suelta	Puede ser excavado con la mano.
Suelta	Puede ser excavado con pala. Se puede introducir fácilmente una puntilla de 50 mm. Fácilmente triturado entre los dedos.
Densa	Se requiere pica para ser excavado. Una puntilla de 50mm es introducida con dificultad. Se puede triturar entre los dedos con una presión fuerte.
Muy densa	Con la pica se remueven terrones que pueden ser desintegrados.

Anexo 11. Terminología para describir la densidad relativa de los suelos arenosos. Fuente: SGC (2013), en SGC (2017)



Anexo 12. Tabla de comparación visual para la clasificación de la selección (sorteamiento) de las partículas. Fuente: Coe et al. (2010), en SGC (2017)