

FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN
PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS
DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA

ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA
URBANA (1:5.000) PARA EL CENTRO POBLADO ALTO CAUCA – MARSELLA -
RISARALDA

TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PASANTÍA PARA OPTAR TÍTULO DE GEÓLOGO

ELABORADO POR:
NICOLÁS PIMENTEL ASTAIZA
PASANTE DE GEOLOGÍA

UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES – CALDAS

2022

FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN
PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS
DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA

ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA A ESCALA
URBANA (1:5.000) PARA EL CENTRO POBLADO ALTO CAUCA – MARSELLA -
RISARALDA

NICOLÁS PIMENTEL ASTAIZA

TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD PASANTÍA PARA OPTAR TÍTULO DE GEÓLOGO

SUPERVISOR CONSORCIO GC
ANDRES FELIPE SANCHEZ SERNA

SUPERVISOR TRABAJO DE GRADO Y ASESOR
CARLOS EDUARDO GARCIA LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES – CALDAS

2022

TABLA DE CONTENIDO

1	RESUMEN	9
2	INTRODUCCIÓN	10
3	OBJETIVOS.....	12
3.1	Objetivo Principal	12
3.2	Objetivos Específicos.....	12
4	MARCO NORMATIVO	13
4.1	Decreto 1807 de 2014.....	13
4.2	Decreto 1077 de 2015.....	16
5	MARCO TEÓRICO	17
6	ANTECEDENTES.....	20
7	METODOLOGÍA	31
7.1	Geología y Unidades Geológicas Superficiales (1:25000)	31
7.2	Metodología de Levantamiento de Línea Base a escala 1:5.000	34
7.2.1	Inventario de procesos morfodinámicos.....	34
7.2.2	Unidades Geológicas para Ingeniería	37
7.2.3	Geomorfología a nivel de Elementos Geomorfológicos.....	51
7.2.4	Coberturas de la tierra	55
7.3	Metodología de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa (1:5000).....	57
7.3.1	Parámetros de evaluación dentro de los condicionantes	61
7.3.2	Cálculo de la susceptibilidad.....	68
8	LOCALIZACIÓN.....	70
9	GEOLOGÍA REGIONAL.....	71
9.1	Unidades Geológicas.....	71
9.1.1	Formación Barroso (K2-Vm)	73
9.1.2	Depósitos de caída piroclástica (Q-p)	75
9.2	Geología Estructural.....	77
9.2.1	Falla Cauca Almaguer	79
9.2.2	Fallas inferidas.....	79

9.3	Unidades Geológicas Superficiales (UGS).....	80
9.3.1	Suelo residual a partir de roca ígnea volcánica Basalto /Rígido (Formación Barroso) (Sriv).....	82
9.3.2	Suelo transportado volcánico de ceniza (Stv/c).....	83
10	<i>CENTRO POBLADO ALTO CAUCA</i>	85
10.1	Inventario de Procesos Morfodinámicos	87
10.2	Geología Local	89
10.2.1	Unidades Cartográficas	89
10.2.2	Columna cronoestratigráfica	94
10.2.3	Geología Estructural Local.....	94
10.2.4	Unidades Geológicas Superficiales para Ingeniería (UGI)	95
10.3	Elementos Geomorfológicos	118
10.4	Mapa de Pendientes	120
10.5	Coberturas de la Tierra.....	122
10.6	Relieve Relativo	124
11	<i>RESULTADOS</i>	125
12	<i>CONCLUSIONES</i>.....	135
13	<i>RECOMENDACIONES</i>	136
14	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Explicación grafica de la aplicación de cada una de las metodologías avaladas por el Decreto 1807 de 2014 en función del tipo de estudio, clase de suelo y escala de trabajo.	16
<i>Figura 2. Amenaza por movimientos en masa de la cuenca del río Otún.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Nivel de amenaza para la cuenca y Representación gráfica por municipio.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en la cuenca hidrográfica del río Campoalegre</i>	<i>24</i>
Figura 5 . Mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa en la cuenca hidrográfica del río Campoalegre Fuente: Comisión Conjunta CORPOCALDAS – CARDER, 2020	25
<i>Figura 6. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7. Índices de campo para determinar la resistencia a la compresión simple, de suelos cohesivos y rocas a partir de índices de campo.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 8. Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 9. Mapa Cualitativo de Unidades Geológicas Superficiales.....</i>	<i>45</i>
Figura 10. Mapa de UGS cuenca Campoalegre. Fuente: OMEGA & ASOCIADOS LTDA, 2019. Citado por CARDER (2020).	46
Figura 11. Flujograma representativo de la metodología seguida para el análisis de estabilidad de taludes.	50
Figura 12. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta para Ingeominas.	51
<i>Figura 13 Flujograma de trabajo para la obtención del mapa de pendientes.....</i>	<i>54</i>
Figura 14. Matriz de comparación de pares. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 15 Variables consideradas para el cálculo de susceptibilidad en los análisis a escala 1:5000, asociados a los centros poblados y cabecera de Marsella. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.	68
Figura 16 Categorización de susceptibilidad por movimientos en masa.....	69
<i>Figura 17. Mapa de localización del área de interes dentro del municipio de Marsella.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 18. Mapa geológico del área de interes dentro del municipio de Marsella.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 19. A) Afloramiento de Basalto ceolítico perteneciente a la Formación Barroso (K2-Vm) en la vía que comunica la cabecera municipal de Marsella con la vereda el Rayado. B) En la imagen contraste del mismo afloramiento se presentan algunas de las líneas de diaclasamiento que afectan la unidad.</i>	<i>74</i>

Figura 20. A) Afloramiento de Roca de una unidad Formación Barroso, con grado moderado de meteorización, vía que comunica la cabecera municipal con la Vereda el Rayado. B) Muestra de mano del Basalto ceolítico de la Formación Barroso...	75
Figura 21. Afloramientos de la unidad Depósito de caída piroclástica (Q-p) en inmediaciones de la Vereda El Rayo. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.	77
Figura 22. Mapa estructural del área de interes dentro del municipio de Marsella Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.....	78
Figura 23. Unidades geológicas superficiales del área de interes dentro del municipio de Marsella.	81
Figura 24. Afloramiento de la unidad geológica superficial: Suelo residual a partir de la Formación Barroso (Sriv)	83
Figura 25. A) Depósito de ceniza pardo amarillento, Centro poblado Alto Cauca B) Depósito de cenizas pardo oscuro, Centro poblado Alto Cauca.....	84
Figura 26 Localización del centro poblado Alto Cauca. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.....	85
Figura 27. Ortomosaico del centro poblado Alto Cauca.	86
Figura 28. Mapa de Inventario de procesos morfodinámicos para el Centro Poblado Alto Cauca	88
Figura 29. Mapa geológico del centro poblado Alto Cauca	90
Figura 30. Perfil meteorizado de la Formación Barroso.....	91
Figura 31. Depósitos de ceniza aflorantes en el centro poblado Alto Cauca.	92
Figura 32. Columna representativa del centro poblado Alto Cauca.....	94
Figura 33. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería del centro poblado Alto Cauca.	107
Figura 34. Fotografía izquierda Muestra de suelo alterada y muestra inalterada tipo Shelby. Fotografía Derecha Afloramientos de los depósitos de ceniza en el centro poblado Alto Cauca.....	109
Figura 35. Afloramiento de suelo residual de la Formación Barroso, estación M-AC-Geot04.	110
Figura 36. Toma de muestra tipo Shelby.....	111
Figura 37. mapa de Unidades Geológicas Superficiales, secciones geológico geotécnicas, puntos de reconocimiento litológico y muestreo geotécnico.	112
Figura 38. Sección 0+000, ubicada en la zona Norte del centro poblado Alto Cauca.	113
Figura 39. Sección 0+500, ubicada en la zona central del centro poblado Alto Cauca.	114
Figura 40.....	117
Figura 41.....	117

<i>Figura 42. Mapa de Elementos Geomorfológicos del centro poblado Alto Cauca</i>	119
Figura 43. Mapa de pendientes del centro poblado Alto Cauca.	121
Figura 44. Mapa coberturas de la tierra centro poblado Alto Cauca	122
Figura 45. Mapa de relieve relativo para el centro poblado Alto Cauca.	124
<i>Figura 46 Matriz de comparación de pares factores condicionantes del centro poblado Alto Cauca.</i>	127
<i>Figura 47 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para el centro poblado Alto Cauca.</i>	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escalas de trabajo según el Decreto 1807 de 2014.....	13
<i>Tabla 2. Tabla de clasificación genética de las unidades de suelo</i>	40
<i>Tabla 3. Textura de los suelos según el tamaño de las partículas.</i>	41
<i>Tabla 4. Terminología utilizada para describir la consistencia de suelos finos.</i>	41
<i>Tabla 5. criterios para definir la plasticidad</i>	42
<i>Tabla 6. Simbología propuesta para las unidades geológicas superficiales.</i>	44
Tabla 7. Metodologías utilizadas en los análisis de estabilidad de taludes.....	49
<i>Tabla 8. Rangos de clasificación de la pendiente.</i>	52
Tabla 9 Leyenda nacional de coberturas de la tierra Corine Land Cover Fuente: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia.....	56
Tabla 10 Escala numérica y escala verbal de comparación entre variables dentro de la matriz de pares. Fuente:.....	58
Tabla 11 RI (n): índice de consistencia aleatorio según el número de variables utilizadas. Fuente: (Saaty, 1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)).	60
Tabla 12 Parámetros de consistencia de la matriz de comparación de pares. Fuente: (Saaty, 1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)).	60
Tabla 13 Susceptibilidad de las coberturas de tierra con respecto a la profundidad radicular. Fuente: Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA,2007. Mencionado por (Servicio Geológico Colombiano, 2013))......	62
Tabla 14 Calificación de susceptibilidad de coberturas de tierra por el parámetro de profundidad radicular. Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2013)......	63
Tabla 15 Calificación de susceptibilidad de los rangos de pendiente y su relación con el tipo de material. Fuente: (Vargas, 2001. Mencionado en Servicio Geológico Colombiano (2013)).	64
Tabla 16 Calificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos con respecto a la inclinación de laderas y al IPM. Fuente: Modificado de (SGC, 2013).	65

Tabla 17 Susceptibilidad por intervalos de altura asociados al relieve relativo. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.....	66
Tabla 18 Calificación de susceptibilidad de de las unidades geológicas para ingeniería de acuerdo a su clasificación SUCS Fuente: Modificado de los datos del departamento de agricultura de EEUU (2013) y el Instituto Nacional de Defensa Civil, Perú (2011).	67
<i>Tabla 19. IPM para el centro poblado Alto Cauca</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 20. Localización de las estaciones del centro poblado Alto Cauca – Marsella.</i>	<i>96</i>
Tabla 21. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-01.	97
Tabla 22. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-01.	98
Tabla 23.. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-02.	99
Tabla 24. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-02.	100
Tabla 25. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-03. ..	101
Tabla 26. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-03.	102
Tabla 27. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-04. ..	103
Tabla 28. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-04.	104
Tabla 29. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-05. ..	105
Tabla 30. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-05.	106
Tabla 31 Clasificación de amenaza y condición de estabilidad de un talud ante deslizamiento. Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2016)..	116
Tabla 32. Propiedades físicas y geomecánicas consideradas para las Unidades Geológicas presentes en el centro poblado Alto Cauca.	116
Tabla 34. Rangos utilizados con propósitos de análisis edafológicos y de ingeniería.	120
Tabla 35. Estadísticas coberturas de la tierra Alto Cauca Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.	123
<i>Tabla 36. Jerarquización factores condicionantes para el centro poblado Alto Cauca.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 37. Evaluación de importancia entre factores y variables condicionantes.</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 38. Jerarquización de los Elementos Geomorfológicos para el centro poblado Alto Cauca.</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 39. Análisis de coberturas respecto a la profundidad radicular en el centro poblado Alto Cauca.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 40. Jerarquización del factor UGI para el centro poblado Alto Cauca.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 41. Jerarquización del factor pendientes para el centro poblado Alto Cauca.</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 42. Jerarquización del relieve relativo para el centro poblado Alto Cauca.</i>	<i>131</i>

1 RESUMEN

El objetivo principal de este estudio es la obtención de los mapas de amenaza por movimientos en masa para suelo urbano y suelo rural del municipio de Marsella con el fin de fortalecer las herramientas de planificación para el ordenamiento territorial de los municipios del departamento de Risaralda.

Para la sustentación de este proyecto de grado con el fin de obtener el título como Geólogo, se tomó como área de estudio el centro poblado Alto Cauca, que es uno de los cuatro centros poblados analizados en los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa para el municipio de Marsella – Risaralda, estudios realizados por el CONSORCIO GC durante los meses de abril y septiembre del presente año, donde se aplicó una metodología estadística multivariada para la obtención del mapa de susceptibilidad siguiendo los parámetros dispuestos en el Decreto 1807 de 2014.

Como resultado, se obtuvo el mapa de susceptibilidad para el centro poblado Alto Cauca acorde a los observado y corroborado en campo; donde principalmente las áreas con susceptibilidad alta y muy alta se relacionan a zonas que ya han presentado fenómenos de movimientos en masa y/o zonas con tasas de erosión muy alta que pueden llegar a desestabilizar el terreno aumentando la probabilidad de ocurrencia de uno de estos fenómenos.

Se rectificó la importancia de la incorporación de estos estudios básicos a los planes de ordenamiento territorial con el fin de salvaguardar la vida de las personas y las pérdidas materiales en todos los sentidos (social, cultural, económico, etc) que estos fenómenos ocasionan en el país.

2 INTRODUCCIÓN

La susceptibilidad a movimientos en masa es una medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes y puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos en masa existentes o potenciales. Para la zonificación de susceptibilidad en el municipio de Marsella se utilizaron insumos como los Inventarios de Procesos Morfodinámicos (IPM), la Geología, la Geomorfología y la Cobertura de la Tierra de acuerdo a la escala de trabajo.

Durante la ejecución de la “practica académica” desarrollada entre los meses de abril y septiembre del año 2022, se brindó apoyo al CONSORCIO GC (asociación entre la empresa GEOBIOMAS INGENIERÍA SAS y Cristian David Salazar Narvéez, geólogo especialista en gestión ambiental) en la ejecución del proyecto denominado “Zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala rural (1:25.000) y urbana (1:5.000) para el municipio de Marsella – Risaralda”. Todo esto a través de labores de campo centradas en la descripción de unidades, recolección de muestras para su posterior análisis de laboratorio y la obtención de un amplio registro fotográfico; complementado con el uso de elementos tecnológicos para la obtención, procesamiento y análisis de información geográfica obtenida a partir de sensores remoto y diferentes herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La elaboración de estos estudios, enfocados en la zonificación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, forman parte de los insumos que se contemplan en el decreto 1807 de 2014 en estudios básicos y detallados en la incorporación de gestión del riesgo, que contribuyen a la actualización y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios colombianos.

Este trabajo contiene el modelo de susceptibilidad a escala 1:5000 para el centro poblado Alto Cauca jurisdicción del municipio de Marsella, siguiendo una metodología estadística aceptada por el decreto 1807 de 2014 para esta escala de trabajo; además contiene las metodologías empleadas para la obtención de la línea base, así como los resultados obtenidos de la misma y su respectiva descripción.

Vale la pena aclarar que la información oficial referente a mapas de amenaza utilizada en este estudio no puede ser publicada y/o está restringida al público por contratos de confidencialidad, de tal forma que, la información oficial referente a

este asunto no podrá ser suministrada al lector en este documento debido a esta razón.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Principal

Prestación de servicios profesionales como geólogo practicante, para brindar apoyo al área de geotécnica – movimientos en masa.

3.2 Objetivos Específicos

- Apoyar las labores de exploración geotécnica y ensayos de laboratorio; realizar la estructuración del informe asociado para los municipios de santa Rosa de Cabal y Marsella el departamento de Risaralda a escala 1:5.000.
- Apoyar la elaboración del mapa Unidades de Geología para Ingeniería – UGI y estructuración del informe asociado para los municipios de santa Rosa de Cabal y Marsella el departamento de Risaralda a escala 1:5.000.
- Apoyar el análisis y zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa para suelo rural y urbano de los municipios de santa Rosa de Cabal y Marsella el departamento de Risaralda.
- Apoyar el análisis y zonificación de amenaza por movimientos en masa para suelo rural y urbano para los municipios de santa Rosa de Cabal y Marsella el departamento de Risaralda.
- Apoyar la elaboración de modelos geológicos – geotécnicos para las áreas en suelo urbano y de expansión urbana de los municipios de santa Rosa de Cabal y Marsella el departamento de Risaralda a escala 1:5.000.

4 MARCO NORMATIVO

Este estudio se ejecutó siguiendo las pautas normativas contempladas en el Decreto 1807 de 2014 [Presidencia de la Republica]. 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. 19 de septiembre 2014, junto con el Decreto 1077 de 2015 [Presidencia de la Republica]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015.

4.1 Decreto 1807 de 2014

TÍTULO I

DISPOSICIONES GENERALES

El primer factor a tener en cuenta para este estudio se expresa en el *Artículo 5. Escala de trabajo*, donde se explican las escalas de trabajo dependiendo del tipo de estudio y la clase de suelo como lo muestra la Tabla 1.

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

Tabla 1. Escalas de trabajo según el Decreto 1807 de 2014.

TÍTULO II

CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS BÁSICOS Y DETALLADOS

En su *Artículo 6. Análisis de la información disponible*. Expresa que:

Para la elaboración de los estudios básicos y detallados se deben realizar los análisis de la información técnica disponible, considerando entre otros, 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 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 decreto (Decreto 1807 de 2014, p.4).

Dentro de este mismo **Título** se desglosa el **Capítulo I** que expresa todo lo referente a las condiciones técnicas para la elaboración estudios básicos de amenaza de los tres fenómenos a evaluar (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales). Para este caso en particular se explicará a detalle a continuación, el *Artículo 8* que contempla lo referente a las especificaciones mínimas que debe tener un estudio para determinar las condiciones de amenaza por movimientos en masa tanto en suelos urbanos como de expansión urbana y rural.

Condiciones mínimas que contempla el *Artículo 8*:

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; mientras que para los suelos rurales se utilizará, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: de inventarios, heurísticos o estadísticos (Figura 1).

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 (Decreto 1807 de 2014, p.5).

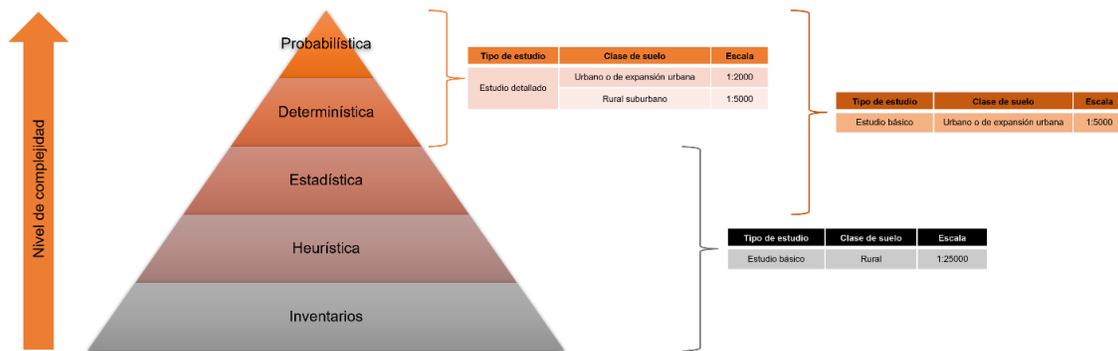


Figura 1. Explicación gráfica de la aplicación de cada una de las metodologías avaladas por el Decreto 1807 de 2014 en función del tipo de estudio, clase de suelo y escala de trabajo.

4.2 Decreto 1077 de 2015

En este decreto se establecen todas las acciones que deben tomarse en cuanto a la localización de viviendas, teniendo en cuenta las limitaciones asociadas a las diferentes categorías de riesgo. Así mismo define dentro de las soluciones de vivienda, la existencia previa de planes para la reubicación de hogares en zonas de alto riesgo. En general, este decreto dispone las acciones que pueden ser tenidas en cuenta para la localización de hogares en zonas de alto riesgo. De igual manera limita los nuevos proyectos de vivienda en áreas urbanas en zonas donde el resultado del riesgo es de rango alto.

En la sección 3 (Incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial), subsección 1 (Disposiciones Generales), Artículo 2.2.2.1.3.1.3. (Estudios básicos para la revisión o expedición de Planes de Ordenamiento Territorial (POT)), retoma todo lo dispuesto en el decreto 1807 de 2014, con el fin de asegurar su cumplimiento.

5 MARCO TEÓRICO

Para el abordaje de este documento y retomando los planteamientos teóricos del marco normativo antes mencionado, se consideraron dos temáticas principales, por un lado, el ordenamiento territorial y por otro los estudios básicos relacionados a movimientos en masa, además de conceptos particulares que abarcan estas temáticas.

La ley 1454 de 2011 [Congreso de la Republica]. Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones. 29 de junio de 2011. Describe en su artículo 2 que:

El ordenamiento territorial es un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del Estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia.

Este mismo artículo expresa que el ordenamiento territorial propiciará las condiciones para concertar políticas públicas entre la Nación y las entidades territoriales, con reconocimiento de la diversidad geográfica, histórica, económica, ambiental, étnica y cultural e identidad regional y nacional.

Los estudios básicos son incluidos a los planes de ordenamiento territorial mediante el Decreto 1807 de 2014 [Presidencia de la Republica]. 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. 19 de septiembre de 2014. Dicho decreto reglamenta las condiciones técnicas mínimas que deben tener los estudios básicos referente a los tres fenómenos que este contempla (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) además es retomado por el Decreto 1077 de 2015 [Presidencia de la Republica]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector

Vivienda, Ciudad y Territorio. 26 de mayo de 2015. Con el fin de asegurar su debido cumplimiento.

Los movimientos en masa son definidos por el Servicio Geológico Colombiano (2016) como un equivalente a las definiciones de procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa, deslizamientos o fallas de taludes y laderas; esta terminología y clasificación de movimientos en masa para este documento es conforme a la Guía para la evaluación de amenazas por movimientos en masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2007), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de gravedad como lo muestra la Figura 2.

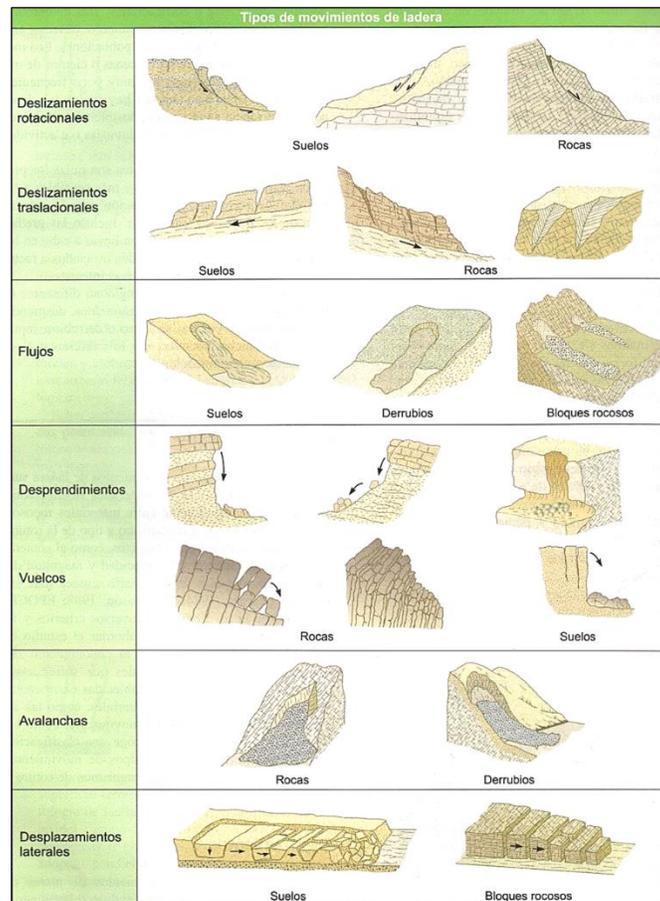


Figura 2. Clasificación de movimientos en masa.
Fuente: González de Vallejo (Geological engineering, 2002).

Para el modelaje de mapas de susceptibilidad y amenaza se hizo uso del método estadístico que consiste en una secuencia procedimientos para el manejo de los datos cualitativos y cuantitativos de la investigación, dicho manejo de datos tiene por propósito la comprobación de una parte de la realidad de una o varias

consecuencias verificables deducidas de la hipótesis general de la investigación. Las características que adoptan los procedimientos del método estadístico dependen del diseño de la investigación seleccionado para la comprobación de la secuencia verificable en cuestión; por otro lado, “Las técnicas multivariantes son, en su mayoría, herramientas muy poderosas que permiten al investigador extraer abundante información de los datos disponibles. Estas técnicas son, en sí mismas, relativamente complejas y requieren para su utilización un conocimiento profundo de sus fundamentos y condiciones de aplicabilidad. Sin embargo, el notable desarrollo de programas informáticos de manejo sencillo y el invariable avance de la tecnología están provocando que, en muchas áreas de conocimiento (...) las técnicas de análisis multivariante estén siendo ampliamente empleadas” (Antonio Humberto Closas, 2003, citado en Mendoza Méndez, Dorantes Coronado, & Cedillo Monroy, 2017)

El insumo primario para la obtención de la amenaza por movimientos en masa es la susceptibilidad por movimientos en masa, partiendo de la consideración que, la susceptibilidad por movimientos en masa es definida como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización o alcance, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativo o cuantitativo, con las áreas movidas o alcanzadas. Este análisis suele presuponer que el comportamiento futuro de la ladera seguirá las mismas pautas que las seguidas hasta el presente (Ayala Carcedo & Olcina, 2002).

Finalmente, la amenaza se describe como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se pueden expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

6 ANTECEDENTES

A partir de la revisión bibliográfica se genera una aproximación al conocimiento del terreno con enfoques diferenciales desde las temáticas a trabajar en el proyecto realizado. Esta es en sí la primera etapa del proceso de investigación, desde donde se identifica el estado del arte, qué se sabe y qué se desconoce que sea de interés dentro de la zonificación de amenazas para el municipio de Marsella, lo que permite a partir del análisis holístico generar el contexto geológico, geotécnico, geomorfológico y escenarios de riesgos dentro del área de estudio.

La revisión bibliográfica además se realiza con un enfoque hacia la zonificación de amenazas por movimientos en masa, encontrando información importante en algunos de los documentos, principalmente en informes técnicos como los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas - POMCAs y los diagnósticos de riesgos de cada municipio, con salidas gráficas que referencian zonas con diferentes niveles de amenaza por movimientos en masa.

A continuación, se realiza un resumen del análisis realizado a los documentos de información secundaria:

- **Documento: Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica Del Río Otún. Fase diagnóstica. III Caracterización del medio físico-biótico (2017).**

El POMCA Río Otún está conformado por tres componentes principalmente, Introducción, Caracterización de la Cuenca y Fases del POMCA, dentro de la fase diagnóstica en el apartado III Caracterización del medio físico- biótico. Se presenta la caracterización de las unidades geológicas de las cuencas del Río Otún, manejando una escala 1:25.000 con fines de ordenación de la cuenca, basados en la información del Servicio Geológico Colombiano de las cartografías a escala 1:100.000 y 1:200.000. Sumado a esto, se integran las verificaciones en campo, antecedentes estructurales (Consideración de los sistemas de fallas y lineamientos) y el análisis e interpretación a partir de fotografías aéreas.

La cuenca del río Otún se localiza sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central y su correspondiente y amplia zona de piedemonte, presentándose una alta variabilidad de franjas de litologías en relación con múltiples eventos de acreción, relacionada con la evolución tectónica de placas del occidente colombiano, a lo que se suman los eventos volcánicos calco-alcalinios de eje de la Cordillera Central, y a la evolución y dinámica de una amplia franja de fallamiento. Geológicamente, la Cuenca se encuentra integrada por materiales con edades desde el Carbonífero

Tardío hasta el Holoceno. Este documento permitió recopilar información sobre el municipio de Marsella, la distribución de las unidades geológicas que los constituyen y los antecedentes estructurales que configuran el municipio, entrando en consideración los sistemas de fallas, lineamientos y anotaciones de campo para poder establecer posibles puntos de control.

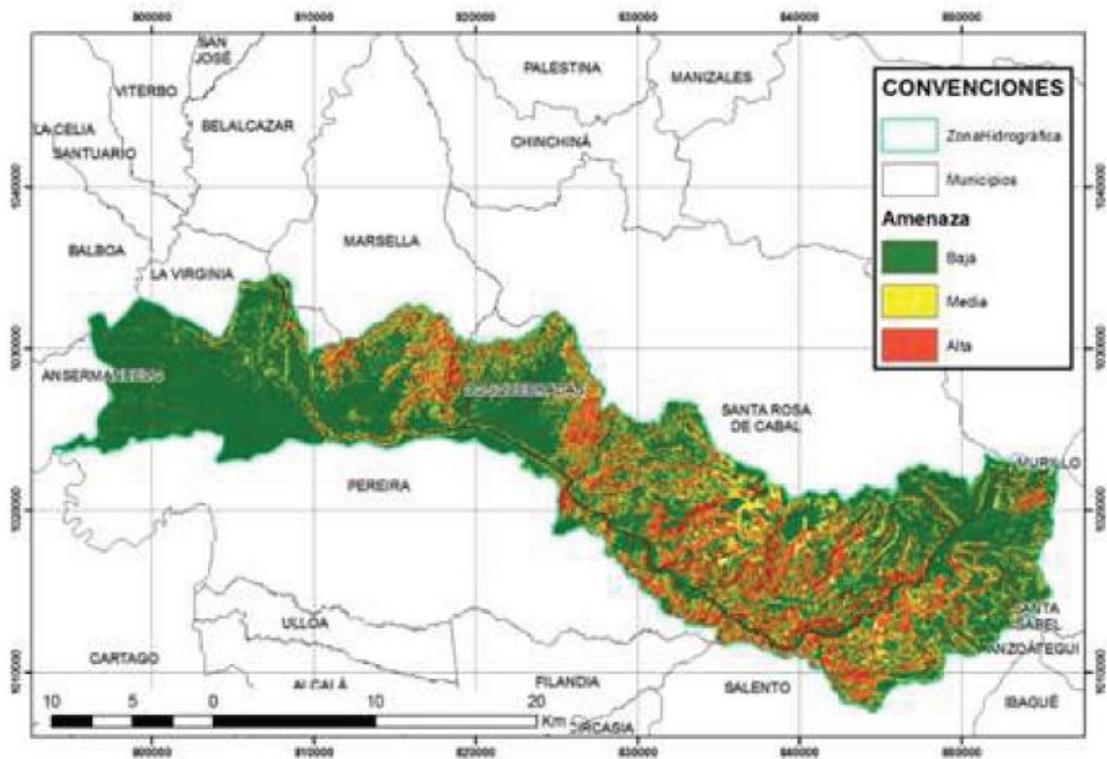
En general las unidades litológicas que se contemplan dentro del POMCA del Río Otún y que a su vez están dentro de la jurisdicción del municipio de Marsella son:

- Formación Barroso, Formación Armenia, Flujos piroclásticos y lahares, Aluviones recientes.

Dentro del Análisis estructural del POMCA del Río Otún se determinan importantes elementos estructurales tipo fallas y lineamientos que inciden no sólo en la generación de inestabilidad de laderas sino en la amenaza sísmica. Como consecuencia de la dinámica estructural de la zona, se presentan variabilidad en el grado de fracturamiento de las rocas presentes como también la presencia de plegamientos en algunas unidades.

En el documento (Pag 29), se realiza un análisis de la zonificación de la amenaza a movimientos en masa, teniendo que “Para la cuenca hidrográfica del río Otún, se observa una zonificación de amenaza entre valores bajos del 66%, medios del 16% y altos del 18% en el resto de la cuenca. La parte sureste de la cuenca cuenta con pendientes relativamente mayores sumadas a altos niveles de espesor de las láminas de agua para los diferentes tiempos de retorno y valores Geomecánicos menores, que dan mayor propensión a la inestabilidad de taludes de las unidades geológicas superficiales. Estas se logran contrastar en algunos sectores por el resultado del coeficiente de aceleración sísmica de la cuenca”. En la *Figura 3* se presenta el mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa en la cuenca hidrográfica del río Otún, la cual abarca una parte pequeña del sur de Marsella.

AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO OTÚN



*Figura 3. Amenaza por movimientos en masa de la cuenca del río Otún
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Otún, 2016*

Además, se relaciona por medio de un gráfico porcentual la afectación de los municipios que conforman la cuenca y por medio de una tabla el porcentaje de ocupación en área de cada uno de los niveles de amenaza presentado (Figura 4).

Amenaza	Área (ha)	Porcentaje
Baja	37.461	66%
Media	9.213	16%
Alta	10.166	18%
Total	56.840	100%

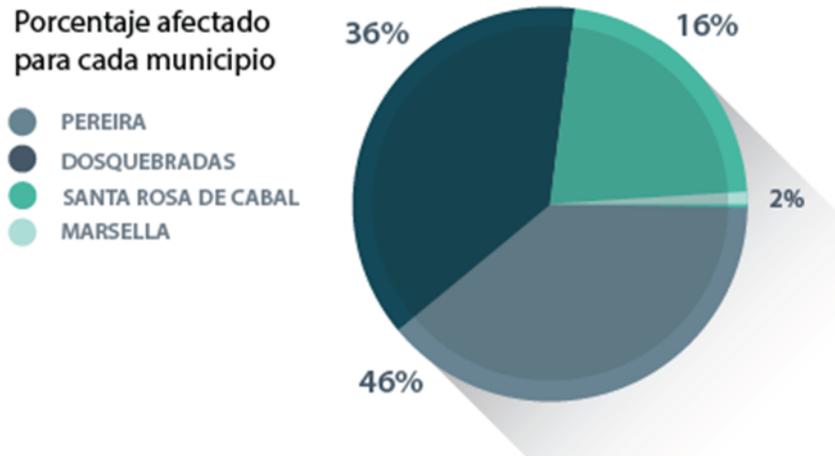


Figura 4. Nivel de amenaza para la cuenca y Representación gráfica por municipio.
Fuente: Consorcio Ordenamiento Cuenca Otún, 2016.

- **Documento: Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca del Río Campoalegre y otros directos al Cauca. Fase diagnóstica. III Caracterización Biofísica (2020).**

El POMCA Río Campoalegre y otros directos al Cauca, dentro de la fase diagnóstica en el apartado III Caracterización del medio biofísico. Se presenta la caracterización de las unidades geológicas de las cuencas del Río Campoalegre, manejando una escala 1:25.000 con fines de ordenación de la cuenca, basados en la información del Servicio Geológico Colombiano de las cartografías a escala 1:100.000 y 1:200.000. Sumado a esto, se integran las verificaciones en campo, antecedentes estructurales (Consideración de los sistemas de fallas y lineamientos) y el análisis e interpretación a partir de fotografías aéreas.

Desde la temática de geología, en la cuenca de Río Campoalegre se encuentran rocas desde el Carbonífero Tardío (Correspondientes al Complejo Cajamarca) hasta el Holoceno, la gran variedad de litologías describe la influencia de procesos de acreción y están suprayacidas por unidades volcánicas correspondientes a la actividad del Complejo Volcánico Ruiz-Tolima. Adicionalmente de manera regional

las unidades geológicas se encuentran afectadas por el Sistema de Fallas Romeral. Todo esto describe la gran complejidad estructural de la zona de estudio.

Dentro del análisis estructural del municipio de Marsella se encuentran 2 Fallas probables con tendencia predominante NNW y NNE, su génesis podría estar relacionada con configuraciones transpresivas asociadas con el sistema de Falla Romeral, esto debido a su continuidad y sus expresiones fisiográficas establecidas mediante fotointerpretación, estas están marcadas por relieves montañosos alineados, cambios altimétricos, ganchos de falla y aparentes facetas triangulares sobre el flanco occidental de la Cordillera Central que limita con el Río Cauca. Estos lineamientos podrían incidir en la inestabilidad de las laderas y podrían mostrar grados de fracturamiento o deformación en las unidades que atraviesan, siendo puntos obligatorios de corroboración en campo para efectos del proyecto.

Desde la temática de movimientos en masa se presentan dos mapas de zonificación, el primero de ellos zonifica la susceptibilidad a este tipo de procesos (Figura 5), y el segundo de ellos relaciona la zonificación de amenaza por movimientos en masa (Figura 6), esta zonificación abarca casi que la totalidad del municipio de Marsella.

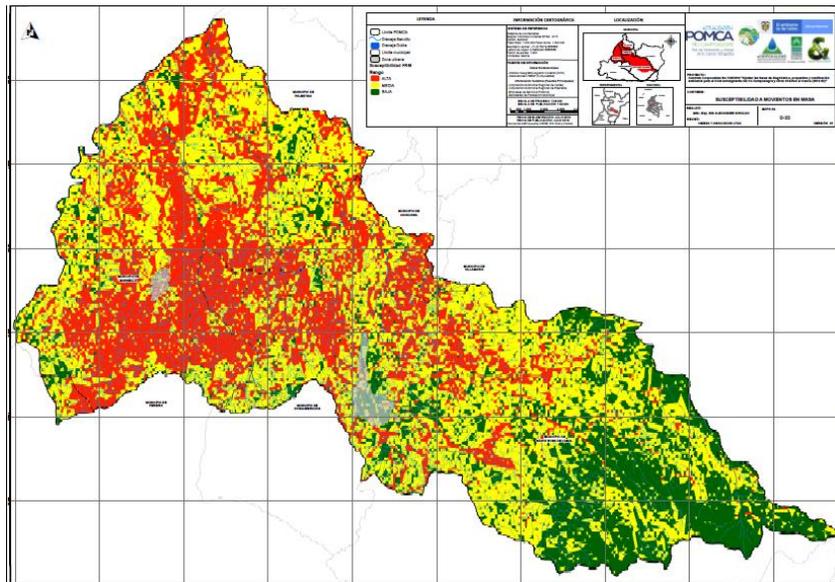


Figura 5. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en la cuenca hidrográfica del río Campoalegre

Fuente: Comisión Conjunta CORPOCALDAS – CARDER, 2020

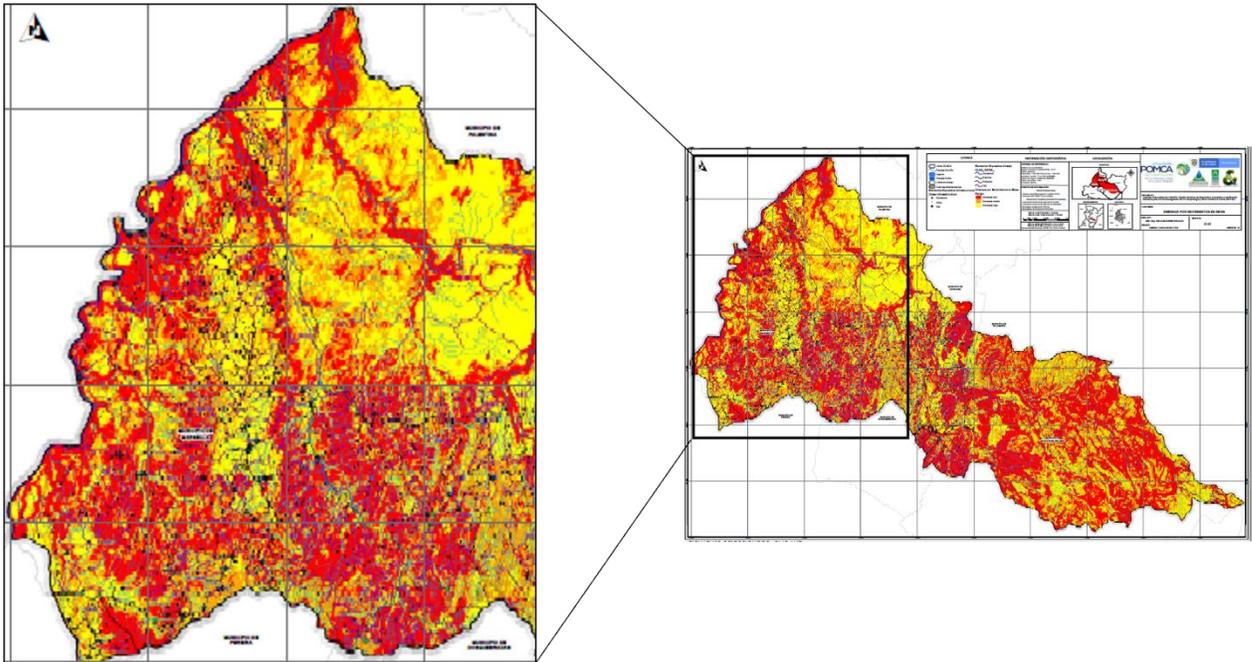


Figura 6 . Mapa de zonificación de amenaza por movimientos en masa en la cuenca hidrográfica del río Campoalegre

Fuente: Comisión Conjunta CORPOCALDAS – CARDER, 2020

- **Documento: Formulación POMCA Río Risaralda plan de ordenamiento de la cuenca Hidrográfica (2017).**

El POMCA del río Risaralda abarca alrededor de seis temáticas iniciando con la Metodología de la fase Prospectiva, Escenarios Deseados, Escenario Apuestas, Zonificación Ambiental, Espacios de Participación para Prospectiva y Zonificación Ambiental, Herramienta y Material Divulgativo. Dentro de la Metodología de la Fase Prospectiva está incorporado el subtema de los aspectos contribuyentes al aumento de Amenaza y Riesgos (Precipitación, Sismos, Erosión Hídrica, Pendiente, Tectónica, Geomorfología) y las Variables Contributivas Antrópicas, (Vertimientos y Cambios en el uso de suelos y deforestación, Excavaciones y Variaciones Antrópicas, llenos antrópicos, etc.), también se aborda el tema de nuevos escenarios de Riesgos para Movimientos en Masa esto teniendo en cuenta las proyecciones de la frontera agrícola esto por el aumento de los cultivos de café en zonas de alta pendiente.

El documento se encuentra en la fase Prospectiva y de Zonificación Ambiental, esto con la finalidad establecer escenarios futuros que parten del conocimiento del estado actual de la cuenca del río Risaralda, el desarrollado en la fase de diagnóstico desde la mirada de la gestión del riesgo, hace un análisis en cuenta a una serie de eventos como los últimos periodos de lluvia, la alta sismicidad, también

el predomina pendientes con una fuerte inclinación, la erosión hídrica (socavación lateral) y la densidad de fracturamiento.

En la cuenca del río Risaralda se encuentran llanuras aluviales sobre las cuales se presentan periódicamente inundaciones, afectando a la cabecera municipal principalmente. Los cambios tendenciales en la cobertura del suelo afectando más del 25% de los bosques en la franja superior a los 2000 msnm pueden aumentar la susceptibilidad a movimientos en masa. En términos de riesgo en el escenario deseado es necesario, la restricción del uso del suelo en las zonas con aprovechamiento en los centros poblados y cabeceras municipales.

- **Documento: Geología de las Planchas 205 Chinchiná. Escala 1:100.000-Memoria explicativa (2001).**

La Plancha 205 se localiza en la parte centro occidental de Colombia, al occidente de la ciudad de Manizales, abarca parte de la Cordillera Central, el valle del Río Cauca y la Cordillera Occidental. La plancha describe geológicamente el área de estudio donde se tienen en consideración recursos bibliográficos y datos recopilados en campo, permitiendo establecer relaciones estratigráficas de cada una de las unidades geológicas, su análisis composicional y su disposición estructural. De manera general, se presenta un basamento volcánico de tipo oceánico, que se encuentra acrecionado al continente posiblemente por la ocurrencia de 2 eventos tectónicos. Debido a esto se desarrolló un cinturón de rocas metamórficas de media a alta presión, adicionalmente se encuentran emplazados cuerpos máficos y ultramáficos asociados con secuencias ofiolíticas. Por otro lado, el basamento se encuentra intruido por cuerpos de composición intermedia asociados con procesos de subducción. También, se presenta una sedimentación de tipo continental y evidencias de actividad volcánica originada en la Cordillera Central.

Estructuralmente en la plancha se destaca el Sistema de Fallas Cauca y Romeral, caracterizado por generar el plegamiento de secuencias sedimentarias terciarias y el levantamiento tectónico de otros cuerpos rocosos. Dentro de un análisis de la Falla Cauca Almaguer se logra establecer que esta falla no presenta expresiones geomorfológicas claras en campo y en ciertas áreas solo se logran evidenciar rasgos de metamorfismo dinámico.

La Geología de la plancha 205 Chinchiná establece las relaciones estratigráficas de cada una de las unidades geológicas, su discriminación composicional y se refiere a la disposición estructural respecto a las fallas de carácter regional. Son consideraciones tanto generales como específicas que nos permitió conocer la

geología asociada con nuestra área de estudio dentro del municipio de Marsella. Localmente el municipio de Marsella con una longitud aproximada de 17,7 km y un ancho entre 5 en la parte norte y 11 km en la parte sur del municipio, está constituida en su mayoría por la Formación Barroso que corresponde a basaltos, diabasas, tobas y aglomerados con algunas intercalaciones de sedimentos silíceos. Constituye dos franjas con características litológicas diferentes, una occidental donde predominan tobas y aglomerados sobre los basaltos y diabasas, con intercalaciones de sedimentos silíceos, y una franja oriental con basaltos y diabasas donde no se encuentran rocas piroclásticas ni sedimentitas. Esta última, presenta una afinidad con un vulcanismo generado en una dorsal meso-oceánica, por otro lado, la occidental está asociado con un ambiente de arco de isla. Sugieren una edad del Cretácico tardío para estas rocas; sin embargo, sedimentitas asociadas con rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso en la región de Buriticá – Peque, al norte de la plancha 205, contienen fauna del Aptiano – Albiano hasta el Campaniano, lo cual sugiere que la edad del conjunto sea del Cretácico temprano tardío, que se extiende hasta el Cretácico tardío.

Los depósitos aluviales corresponden a zonas de acumulación, se caracterizan por su topografía plana, están constituidos por gravas, arenas y limos. Dentro del municipio de Marsella se logran evidenciar en las márgenes de Río Cauca al occidente y en el Río San Francisco al este del municipio. El aporte de material y tamaño del mismo está directamente ligado con los cambios de energía de la corriente, generando procesos de acumulación en los márgenes de los ríos, zonas bajas o llanuras.

- **Documento: Formación Barroso: Arco Volcánico Toleítico y diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia (2013).**

Este documento establece las diferencias entre la Formación Barroso y las Diabasas de San José de Urama, las cuales fueron agrupadas como una sola en la Formación Barroso. Estas se encuentran en el segmento norte de la Cordillera Central, entre las fallas Cauca-Almaguer y Dabeiba-Pueblo Rico. En este documento se exponen las consideraciones composicionales, geoquímicas, rango de edad, respecto a la Formación Barroso.

La Formación Barroso presenta un ancho de 5 a 15 km, dependiendo la sección de estudio. Los basaltos y andesitas que constituyen la formación, mineralógicamente presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (An) y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina, mientras las tobas y aglomerados contienen fragmentos de vulcanitas con variedad en textura y tamaño, se clasifican principalmente como

tobas líticas. Es común la presencia de minerales secundarios de alteración como clorita, epidota, saussurita y sericita. Respecto al contenido fósil, se han reportado amonites del Coniaciano localizados en el Boquerón de Toyo, sobre la vía a Urabá. A partir de esto, se logró concluir un rango de formación Turoniano-Aptiano con edades de 88 a 115 Ma asociadas con el arco volcánico que habría dado origen a esta formación.

- **Documento: Geología de la Plancha 224 Pereira (1984).**

La plancha geológica 224 a escala 1:100.000 - Pereira, comprende los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca con coordenadas en X: 1.040.000- 1.000.000 y en Y: 787.900- 835.100. En esta plancha se describen rocas desde el Paleozoico hasta el Cuaternario reciente. De manera general, establece la disposición y descripción de las rocas metamórficas asociadas con el Complejo Cajamarca (denominado en la plancha como grupo Cajamarca), de los cuerpos intrusivos de composición gabrodiorítica de Pereira y Santa Rosa, el Neis de Chinchiná (denominado en esta plancha de esta manera, pero estudios posteriores han definido la unidad como la migmatita de Manizales), secuencias de rocas volcánicas básicas y sedimentos marinos distribuidas en las dos cordilleras, la parte oriental correlacionable con la Formación Quebradagrande, se describen las ventanas de la formación Amagá que reposan sobre los cuerpos grabrodioríticos de Pereira y Santa Rosa y permitió establecer la disposición de los depósitos cuaternarios dentro del municipio de Marsella y como estos se encuentran constituidos geológicamente. Estructuralmente se destaca como la zona se encuentra tectonizada por los Sistemas de Fallas Cauca Romeral.

La zona de estudio se compone en gran parte de rocas basálticas, diabasas y piroclastos del Grupo Diabásico que se encuentra contacto intrusivo con el Pórfido andesítico de Pereira y en contacto fallado con esquistos verdes, anfibolíticos y grafitosos del Complejo Cajamarca. También se encuentra el Stock Diorítico de Santa Rosa y rocas volcánicas y sedimentarias del Complejo Quebradagrande cubiertos por Flujos de Lodo Volcánico. Se puede apreciar trazas del sistema de Fallas Romeral que ponen en contacto el Pórfido Andesítico con el Complejo Cajamarca y el Stock Diorítico de Santa Rosa con el Complejo Quebradagrande. Respecto a los depósitos cuaternarios, Los depósitos de caída piroclástica se encuentran moldeando la topografía de la zona de estudio, asociados con procesos de emisión volcánica. Por otra parte, los flujos escombros y cenizas o lahares se encuentran principalmente en el flanco occidental de la Cordillera Central en el extremo oriental de la plancha 224 y al norte y sur de Santa Rosa de Cabal. Los flujos de escombros y cenizas están constituidos por fragmentos piroclásticos, lapilli, fragmentos de rocas volcánicas y algunos fragmentos de rocas metamórficas e

intrusivas. Asociados con procesos de deshielo glacial e incisión de capas de cenizas y lapilli.

- **Documento: Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el Sistema de Fallas Romeral en los Andes del norte (2013).**

El área de estudio se encuentra ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Central y presenta una gran complejidad estructural con una serie de bloques litológicos de diferente naturaleza. El documento plantea un análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande, ya que ambos están constituidos por rocas volcánicas como basaltos y andesitas, junto a tobas y sedimentos de chert, limolitas, grauwacas y conglomerados que son discordantes a las rocas volcánicas. Los análisis de los óxidos mayores, elementos de tierras raras y trazas, permiten sugerir que la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande se formaron en un arco magmático, ya que ambas tienen afinidad con series toleíticas y calco-alcalinas media en K. Si bien el Complejo Quebradagrande tiene mayor contenido de Th y menor en Hf que la Formación Barroso, las dos unidades muestran una misma tendencia en los modelamientos geoquímicos. Adicionalmente las secuencias muestran un registro fósil, edades radiométricas y relaciones estratigráficas a partir de cuerpos intrusivos. Permitiendo establecer un rango de edad similar entre el Albiano-Aptiano. Se sugiere que, aunque pudieron deberse a la actividad de un arco magmático, estas fueron desmembradas por el Sistema de Fallas Cauca-Romeral.

Este estudio permite establecer las consideraciones preliminares de un modelo geológico a partir de este comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande, que debido a sus relaciones geoquímicas y litológicas propone un origen similar de las unidades y propone una reconfiguración entre los límites de corteza oceánica y continental propuesto para el flanco occidental de la Cordillera Central. La Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande presentan características litológicas y geoquímicas similares. Ambas unidades se encuentran constituidas por lavas basálticas y andesíticas, rocas piroclásticas y sedimentitas intercaladas. Por otro lado, geoquímicamente en diagramas de discriminación tectónica se encuentran en los mismos campos del diagrama TAS, correspondiendo a rocas de arco de afinidad subalcalina y respecto a el análisis de elementos traza y tierras raras presentan concentraciones afines a el marco tectónico de rocas generadas por encima de una placa subducida en un ambiente de arco. Esta similitud destaca la gran complejidad geológica de la zona de estudio y desde un

punto de vista más riguroso se requeriría redefinir los límites de la corteza oceánica y continental de este flanco occidental de la Cordillera Central.

- **Documento: Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Escala 1:100.000- Memoria explicativa (2001).**

La plancha 206-225 Nevado del Ruiz está localizada en la cordillera central abarca un área de 1800 km², dentro de la estratigrafía se encuentran rocas desde el paleozoico como el Complejo Cajamarca, Neis de Chinchiná, Intrusivos Gnéisicos; rocas mesozoicas como el Batolito de Sonsón, Formación Valle Alto, Formación Abejorral, Complejo Quebradagrande, Ultramafitas Serpentinizadas de Filadelfia, Complejo Arquía y el Stock de Manizales; rocas cenozoicas como el Batolito del Bosque, Sedimentitas de Aránzazu, Pórfidos de Neira, Flujos Andesíticos, Formación Casabianca, Flujos Piroclásticos, Rocas Piroclásticas, Depósitos Glaciares y Aluviones Recientes. En el área dentro de la geología estructural se localiza el Sistema de Fallas Palestina, Sistema de Fallas Romeral, la Falla Samaná Sur, Falla Río Dulce, Falla Río Hondo, Falla el Edén y la Falla Salento, también se hayan estructuras como lineamientos, diaclasas, plegamientos, lineamientos y Foliación de las rocas. Dentro del documento también se abordan temáticas como la Geología económica, la evolución geológica y las amenazas naturales a las que está expuesta el área entre las que se encuentran la amenaza volcánica, avenidas torrenciales, erosión e inundaciones, amenaza sísmica y movimientos en masa; estos dos últimos factores están relacionados mayormente con la topografía y el control estructural de la zona.

En este se identifican las generalidades de la Cordillera Central y las características geomorfológicas del Sistema de Fallas Romeral que permitieron establecer los trazos generales de las fallas de mayor relevancia que atraviesan el área de estudio. La zona de estudio se encuentra ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Central, está constituida por rocas que van desde el paleozoico como el Complejo Cajamarca, rocas cretácicas como el Complejo Quebradagrande, cenozoicas como Flujos Andesíticos y depósitos Cuaternarios entre ellos los Flujos Piroclásticos.

La actividad volcánica reciente termina con la emisión de productos piroclásticos por los volcanes del Complejo Ruiz - Tolima, que son los volcanes Cerro Bravo, Nevado El Ruíz, Nevado El Cisne, Nevado Santa Isabel, Nevado El Quindío, Nevado del Tolima; estos materiales, en parte, se depositan en medio acuoso que sirve de medio de transporte tanto hacia el este como al occidente de la Provincia Tectónica Volcánica San Diego-Cerro Machín, depositándolos a lo largo del cauce y zonas de inundación y constituyen geofomas caracterizantes y de fácil identificación en el área. La edad considerada para estos depósitos corresponde al

intervalo Pleistoceno tardío - Holoceno y son vestigios de la actividad volcánica cuaternaria que se extiende hasta hoy en el Complejo Volcánico Ruiz - Tolima y se manifiesta adicionalmente, en las fuentes termales que rodean a los volcanes anteriores.

7 METODOLOGÍA

Con el objetivo de dar un contexto geológico regional al lector, se suministran las metodologías utilizadas en la línea base a escala 1:25.000 (Geología, Unidades Geológicas Superficiales (UGS) y Geología estructural) ya que de dicha información se derivaron los datos primarios a una escala más detallada en el área correspondiente al centro poblado Alto Cauca; Por otro lado también se presentan las metodologías empleadas para el levantamiento de línea base a escala 1:5.000 junto con la metodología estadística multivariada empleada para la obtención del modelo de susceptibilidad en el centro poblado analizado; puesto que todas las metodologías empleadas contienen una fase previa de recolección de información secundaria, en algunos casos se incluyeron mapas pertenecientes a los antecedentes, con el fin de ilustrar de mejor manera los lineamientos seguidos para la obtención de la línea base.

7.1 Geología y Unidades Geológicas Superficiales (1:25000)

En una fase previa, se realizó la recopilación de toda la información secundaria disponible además se llevó a cabo la fotointerpretación de los modelos digitales de elevación del terreno donde a partir de los cambios de tonalidad, textura y relieve, se procedió a acotar de una mejor manera los límites de las diferentes unidades aflorantes en la zona de estudio, también se usaron ortomosaicos de fotografías aéreas como un apoyo adicional para delimitar de mejor manera los contactos entre unidades. Adicionalmente, se establecieron puntos de control estratégicos para la corroboración en la fase de campo y de esta manera poder concluir con una descripción geológica más detallada y precisa sobre las unidades que se encuentran aflorando en área de influencia y como están dispuestas estructuralmente.

Una vez establecidos los puntos de control se procedió a realizar las visitas de campo pertinentes, donde se examinaron cuidadosamente los distintos sitios donde afloraban las rocas representativas del área de interés, junto a esto, se tomaron muestras de las mismas además de datos estructurales en los afloramientos que así lo permitían y se efectuó un registro fotográfico de algunos de los afloramientos visitados. Finalmente, una vez concluida la fase de campo y del análisis de la

información recolectada, se ajustaron los límites cartográficos de las unidades aflorantes y se obtuvo el mapa geológico de la zona.

Para la geología estructural del municipio de Marsella, además de realizar lo antes mencionado en la etapa previa de recolección de información y fotointerpretación, se realizó una fase de campo donde se recolectaron datos estructurales de los afloramientos de roca que así lo permitían con el fin de entender de la manera más precisa posible la tectónica regional de la zona de estudio, además de esto, se realizaron visitas a las zonas altas del área de estudio que permitieran observar las zonas aledañas a las posibles áreas de influencia de las fallas y/o lineamientos estructurales presentes en los sectores visitados, esto con el fin de recolectar información de los indicadores geomorfológicos como hombreras de falla, silletas, ganchos de falla, espolones, deflexión de drenajes, entre otros, que permitieran ajustar de una mejor manera los trazos de los mismos, de igual manera se obtuvo un amplio registro fotográfico de los indicadores antes mencionados, que fueron incluidos en este informe y asociados a la estructura tectónica (Falla o Lineamiento) al que pertenecían.

Los diferentes informes de referencia contienen las descripciones y el mapa cualitativo de los materiales superficiales existentes en el área, basado en los datos aportados por el mapa de Geología Básica a escala 1:25.000, en el cual se diferenciaron las siguientes clases de macizos rocosos de acuerdo al tipo de material, grado de meteorización, origen, procedencia de formación y nomenclatura. Para las rocas se diferencian categorías asociadas al grado de meteorización como Roca dura, intermedia, blanda y muy blanda. También se diferenciaron algunos tipos de suelo de acuerdo con su origen, entre los que están: Residuales, transportados y antrópicos.

Para el levantamiento de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), además de la fase previa de recolección de información y fotointerpretación, en primera instancia se relacionaron las unidades geológicas, subunidades geomorfológicas y parámetros morfométricos como las pendientes, para así, poder establecer los límites donde prima la presencia de suelo o de roca durante la fase de campo.

La caracterización en campo de cada una de las UGS está definida mediante los parámetros establecidos por la guía metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1: 25.000 del SGC (2017). Inicialmente se considera la génesis u origen del material para la diferenciación entre roca y suelo, se definen las características litológicas que incluye la composición mineralógica, tamaño y forma de los granos, color, se establece una relación geomecánica del material de las propiedades ingenieriles de cada material donde se destacan la dureza o

resistencia, consistencia o compacidad y condición de humedad, se define el estado de meteorización del material y los rasgos estructurales que puede presentar. A partir de estas consideraciones, cada una de las UGS tiene una nomenclatura asociada que la identifica y se encuentra definida en la Figura 7. partiendo del tipo de material, origen y el tipo de UGS al que corresponde.

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 volcaniclasticos primarios	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos piroclásticos (Ignimbrita), oleada piroclástica, caídas piroclásticas (bombas, bloques y ceniza).
	Depósitos volcaniclasticos 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 fluviotorrenciales
	Depósitos lacustres y paludales	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos fluviolacustre • 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 Fluvioglaciares
	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
	Suelo transportado	

Figura 7. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen.

Fuente: modificado de Hermelín (1985), por el SGC (2017).

Adicionalmente, para cada una de las unidades se realizó una consideración de resistencia a la compresión simple a partir de los índices de campo expresados en la Figura 8.

CLASE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN EN CAMPO	APROXIMACIÓN AL RANGO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (MPa)
S1	Suelo muy blando	El puño penetra fácilmente varios cm	< 0,0025
S2	Suelo blando	El dedo penetra fácilmente varios cm	0,0025 – 0,05
S3	Suelo firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo	0,05 – 0,10
S4	Suelo rígido	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo	0,10 – 0,25
S5	Suelo muy rígido	Con cierta presión puede marcarse con la uña	0,25 – 0,50
S6	Suelo duro	Se marca con dificultad al presionar con la uña	> 0,50
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0,25 – 1
R1	Roca muy blanda	Al golpear con la punta del martillo la roca se desmenuza. Con navaja se talla fácilmente	1 – 5
R2	Roca blanda	Al golpear con la punta del martillo se producen ligeras marcas. Con navaja se talla con dificultad	5 – 25
R3	Roca moderadamente dura	Con un golpe fuerte del martillo puede fracturarse. Con la navaja no puede tallarse	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe del martillo para fracturarla	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes del martillo para fracturarla	100 – 250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpear con el martillo sólo saltan esquirlas	> 250

Figura 8. Índices de campo para determinar la resistencia a la compresión simple, de suelos cohesivos y rocas a partir de índices de campo.

Fuente: Tomado de ISRM (1981), citado por el SGC (2017).

7.2 Metodología de Levantamiento de Línea Base a escala 1:5.000

La línea base escala 1:5000 es la caracterización inicial del área de ejecución del estudio, en este caso el área del centro poblado Alto Cauca que sirve como cimiento en el proceso de elaboración del presente estudio, esta línea base tiene como insumos el modelo de elevación digital del terreno (DEM), el inventario de procesos morfodinámicos (IPM), las Unidades Geológicas para Ingeniería, la Geomorfología, parámetros morfométricos como Inclinación y relieve relativo del terreno, la Cobertura Vegetal y el Uso actual de los Suelos.

7.2.1 Inventario de procesos morfodinámicos

El inventario de procesos morfodinámicos es la recopilación de la información histórica de los movimientos en masa para el centro poblado Alto Cauca reportados por diferentes entidades del orden nacional y local en conjunto con la digitalización de movimientos en masa por medio de los sensores remotos disponibles en

diferentes temporalidades y la verificación de estos en el levantamiento de campo actual.

El inventario de procesos morfodinámicos (IPM) para este centro poblado, se realizó siguiendo los lineamientos de la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:5.000 y 1:25.000 (Servicio Geológico Colombiano, 2017) la cual contempla los siguientes procesos:

- Recopilación y revisión de la información histórica reportada por diferentes entidades como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través de visitas de emergencia, el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) el sistema de inventario de efectos de desastres (DesInventar), los reportes anuales de emergencias de la UNGRD, reportes de las autoridades civiles y/o de emergencia local y los diagnósticos de riesgos de cada municipio
- Fotointerpretación: esta se realizó a partir del modelo de elevación digital del terreno (DEM) y la Ortomosaicos de la zona, estos insumos son de fuente propia.
- Digitalización de los movimientos en masa e identificación de algunos rasgos geomorfológicos utilizando el software ArcGIS© 10.5 para posteriormente diligenciar la base de datos para cada uno de los procesos a partir de la información que se obtiene de fuentes secundarias e interpretación de sensores remotos.
- Levantamiento y verificación de campo del IPM.
- Actualización y complementación de la base de datos del IPM con base en la información levantada en campo.
- Elaboración del mapa final de IPM.

Adicional a esto se utilizaron otros insumos de la misma guía como la clasificación de rangos de pendientes (Figura 9) utilizada para la zonificación de movimientos en masa.

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 9. Rangos de pendiente utilizados con propósitos de análisis de ingeniería y zonificación de amenazas por movimientos en masa.

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

La caracterización morfodinámica permite la identificación y la definición de la evolución de los procesos denudativos (deslizamientos, reptación y subsidencia) y erosivos (erosión por sobrepastoreo, erosión laminar y surcos) que ocurrieron en una determinada área. A continuación, se realiza la descripción de los procesos mencionados anteriormente que hacen parte del IPM a escala 1:5.000 para el municipio de Marsella.

- **Deslizamiento:** Tipo de movimiento de tamaño considerable que se produce cuando la masa del terreno se convierte en una zona inestable y se desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño.
- **Reptación:** Es un tipo de movimiento superficial extremadamente ralentizado e imperceptible en largos periodos de tiempo. Estos movimientos son favorecidos por la presencia de materiales ricos en arcillas que periódicamente absorben agua.
- **Subsidencia:** Es un hundimiento o asentamiento gradual y progresivo de la superficie del terreno que puede ser ocasionado por diversos factores como terremotos, vacíos creados por el hombre en actividades mineras, aguas subterráneas, colapso de cavernas subterráneas, entre otros.
- **Erosión laminar (Erosión 1):** Pérdida de una capa delgada o más o menos uniforme de suelo en un terreno inclinado generado por circulación superficial difusa del agua de escorrentía cuando la intensidad de la precipitación excede la infiltración o cuando el suelo se satura de agua.

- **Erosión por sobrepastoreo (Erosión 2):** Se produce cuando las plantas están expuestas al pastoreo intensivo durante largos períodos, o sin períodos suficientes de recuperación. Puede ser causado por el ganado en las aplicaciones agrícolas mal gestionadas, o por sobrepoblaciones de animales salvajes nativos o no nativos.
- **Surcos (Erosión 3):** suelo arrastrado por el flujo de agua que se canaliza y jerarquiza generando surcos.

7.2.2 Unidades Geológicas para Ingeniería

En el área de estudio se delimitaron y describieron las propiedades de los suelos desde el punto de vista ingenieril sin perder de vista su influencia en la de gestión del riesgo, objeto del presente estudio, para lograr dicho propósito se toman como base las guías metodológicas para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 y 5.000 realizadas por SGC (2016) y SGC (2017), en las cuales se proponen los elementos y formas de evaluación que deben tenerse en cuenta para estandarizar la clasificación de las Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) dentro del centro poblado Alto Cauca, además, se entregan formatos de campo que ayudan a llevar un control de información relevante dentro de cada estación de reconocimiento.

Un mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI), permite separar el terreno en unidades homogéneas en cuanto a las características mecánicas de los suelos, se consideran tres aspectos fundamentales para obtener los modelos que permitan realizar los análisis de estabilidad: 1) diferenciar los materiales aflorantes entre suelos y rocas, 2) definir los espesores de suelo o las características estructurales del macizo rocoso, y 3) caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas, para la correcta caracterización de unidades se discriminan entre: rocas, suelos residuales y saprolitos, suelos transportados y por último suelos de origen antrópico. SGC (2016). Se consideran como formaciones correlativas de los procesos morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre, Hermelín (1987. Citado por CARDER (2020)).

Para la recopilación de la información secundaria y la realización de los mapas preliminares de las Unidades Geológicas para Ingeniería aflorantes en el centro poblado, se tiene en consideración el mapa realizado por CARDER (2020) que grafica la distribución de las unidades dentro de la cuenca del río Campoalegre. El documento representa una fuente de información asociada de manera directa con el objeto del presente estudio ya que el perímetro del centro rural está contenido dentro de la extensión de la cuenca. Es de aclarar que, para la generación del mapa final de unidades geológicas superficiales, expuesto en este documento, se toma

en consideración un híbrido entre la información primaria levantada en los puntos de control de campo, con los datos bibliográficos antes mencionados.

Para complementar y ajustar la cartografía se procedió a realizar visitas de campo en las inmediaciones del centro poblado, con el fin de buscar zonas donde los suelos aflorantes fueran los representativos en el área, una vez ubicados se realizó la respectiva descripción en cuanto textura, tamaño de grano, composición, color, humedad, plasticidad, etc. Además, se toman muestras de suelo tanto alteradas como de suelos inalteradas tipo Shelby, dichas muestras se someten a ensayos geotécnicos y de clasificación en laboratorio para completar la descripción de las propiedades del subsuelo.

7.2.2.1 Caracterización de las unidades de suelo

Para SGC (2016) se definen como suelos aquellos materiales sueltos o inconsolidados, compuestos de una mezcla de materia orgánica, fragmentos de roca, arcilla y minerales, producto de la descomposición in situ del material rocoso o de sedimentos transportados por diferentes medios. Se consideran materiales que se pueden excavar fácilmente por métodos manuales y se clasifican como suelos residuales (horizonte VI del perfil de meteorización de Dearman, 1995) y transportados (depósitos de gravedad-coluvial, aluviales, glaciares y eólicos, entre otros).

El suelo se debilita o ablanda por inmersión en agua; puede ser el resultado de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan para producir un material rico en materia orgánica con horizontes característicos (capas) a poca profundidad. El proceso de formación de un suelo puede ser de la erosión o meteorización de rocas más duras o de suelos más antiguos "in situ" o puede ser material transportado o depositado como una formación geológica débil, Selby (1993. citado por (Servicio Geológico Colombiano, 2017)).

Las propiedades de los suelos están directamente relacionadas con la granulometría, forma de las partículas, gradación, contactos, entre otros. Es importante aclarar y de interés para el presente trabajo contemplar que dentro de los suelos a describir también se incluyen los depósitos recientes inconsolidados asociados por ejemplo a los coluviones, depósitos piroclásticos y los depósitos glaciares.

Hay un número de propiedades generales que son comunes para cualquier tipo de suelo, por ejemplo: el origen, la composición de las partículas, el color, la condición de humedad y estructuras relictas y/o discontinuidades en la masa de suelo. Sin

embargo, existen también características propias para los suelos finos tales como la consistencia y la plasticidad, así las que identifican en particular a los suelos gruesos: forma (redondez y esfericidad) y tamaño, gradación, selección, estructura y empaquetamiento, compacidad y densidad relativa (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Para clasificar correctamente el suelo, la metodología toma en cuenta los siguientes factores:

- **Génesis**

Tanto para suelos cohesivos como no cohesivos, debe diferenciarse el origen del suelo o roca entre: Roca inalterada, suelo derivado de roca in situ y suelo transportado (SGC, 2016).

La Tabla 2 presenta la clasificación genética de las unidades de suelo descritas por Hermelín, 1985, y Salazar (1995. Citado por (SGC, 2016)).

Origen de la UGI	Tipo de UGI
Derivadas de roca In situ	Roca inalterada Saprolito Suelo residual
Depósitos aluviales	Aluviones recientes o de lecho de río Llanuras aluviales Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluviotorrenciales
Depósitos lacustres y paludales	Planicie lacustrina, artesa lagunar, plano anegadizo
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluviones Talus Flujos (de lodo, tierra y de escombros) Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	Deltas, barras, playas, etc.
Depósitos volcánicos	Tefras Surges Flujos de piroclastos Ignimbritas Flujos de lodos volcánicos Lahares Cenizas Coladas de lava
Depósitos eólicos	Dunas, medanos Loess Cenizas volcánicas
Depósitos glaciares	Morrenas y tillitas Fluvioglaciares, valle glaciar, abanicos de lavado
Depósitos antrópicos	Rellenos sanitarios o de basuras

Origen de la UGI	Tipo de UGI
Derivadas de roca In situ	Roca inalterada Saprolito Suelo residual
Depósitos aluviales	Aluviones recientes o de lecho de río Llanuras aluviales Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluviotorrenciales
Depósitos lacustres y paludales	Planicie lacustrina, artesa lagunar, plano anegadizo
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluviones Talus Flujos (de lodo, tierra y de escombros) Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	Deltas, barras, playas, etc.
	Rellenos de excavaciones Escombreras o botaderos

*Tabla 2. Tabla de clasificación genética de las unidades de suelo
Fuente: Hermelín, 1985, y Salazar (1995. Citado por (SGC, 2016)).*

- **Composición**

Depende del protolito del suelo, la descripción incluye tanto partículas identificables a simple vista como las identificadas mediante lupa, generalmente los fragmentos más grandes corresponden a partes de roca, y las partículas más pequeñas corresponden a minerales individuales como cuarzo, micas, entre otros (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

- **Forma, esfericidad, redondez y tamaño (Textura).**

Para suelos gruesos corresponde a la forma, esfericidad, redondez y tamaño, características resultantes de interperismo y erosión. La redondez de los fragmentos en un depósito se define de acuerdo con la clasificación tradicional sedimentológica propuesta por Wadell (1933. citado por (Murcia H. , y otros, 2013)), que clasifica los fragmentos como muy angulares, angulares, subangulares, sub-redondeados, redondeados y bien redondeados.

A continuación, en la Tabla 3 se presentan la propuesta realizada por ASTM (2011), para definir la textura de los suelos según el tamaño de las partículas.

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
0,425-2,2	Arenas medias	
0,075-0,425	Arenas finas	
<0,075	Finos (Limos-arcillas)	Arcilla, arcillolimosa, limoarcillosa y limosa

Tabla 3. Textura de los suelos según el tamaño de las partículas.

Fuente: (ASTM, 2011).

- **Condición de humedad**

Existen varios criterios para describir la humedad natural, en caso de suelos gruesos considera que se debe describir la condición de humedad de la matriz. Indica las categorías: Seco, cuando no hay humedad visible; húmedo, cuando el material se comporta de forma plástica pero dentro de él no fluye agua libre; Mojado, cuando contiene humedad suficiente para comportarse como un líquido, pero el agua no fluye; muy mojado, el agua fluye de la pasta del suelo. (Varnes (1998) en (Servicio Geológico Colombiano, 2017))

- **Consistencia**

Descrita para suelos de granulometría fina, corresponde a la firmeza o solidez que presenta la masa de suelo, mide la resistencia del suelo a ser deformado o amasado que dependerá del contenido de humedad. Puede relacionarse con la resistencia al corte no drenado, en la medida en que su determinación mediante pruebas de campo puede relacionarse directamente con valores de resistencia del suelo ante la aplicación de esfuerzos de corte.

La Tabla 4 presenta la terminología utilizada para describir la consistencia en los suelos finos.

Término	Resistencia al corte no drenada (Kn/m ²)	Prueba de campo
Muy blanda	<20	Se escurre entre los dedos al apretarse en la mano
Blanda	20 - 40	Se puede penetrar fácilmente con el dedo pulgar y se puede moldear mediante ligera presión de los dedos
Media	40 - 75	El pulgar penetra con esfuerzo y puede ser moldeado con una presión fuerte de los dedos
Alta	75 – 150	El pulgar deja solo una marca y no puede ser moldeado entre los dedos
Muy alta	150 -300	Se puede marcar con la uña del pulgar y el cuchillo penetra cerca de 15 mm
Dura	>300	No puede ser marcado con la uña del pulgar

Tabla 4. Terminología utilizada para describir la consistencia de suelos finos.

Fuente: Weltman & Head (1983. Citado por (Servicio Geológico Colombiano, 2017)).

- **Plasticidad**

Como una de las características más importantes de los suelos finos, se refiere a la capacidad que tiene un suelo para ser moldeado o deformado sobre un amplio rango de contenido de humedad, sin agrietamiento o sin mostrar ninguna tendencia al cambio de volumen NZGS (2005. Citado por (Servicio Geológico Colombiano, 2017)).

Para evaluar la plasticidad en el campo es necesario remodelar el suelo sobre un rango de contenido de humedad. El procedimiento consiste en enrollar el suelo en las manos hasta formar un cordón de cerca de 3 mm de diámetro, sin que dichos cilindros se desmoronen. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

La Tabla 5 muestra los criterios para definir la plasticidad según ONU (2009. Citado por (Servicio Geológico Colombiano, 2017)).

Código	Nombre	Descripción
NPL	No plástico	No pueden formarse rollos con ningún contenido de humedad
SLP	Ligeramente plástico (baja)	Se forma el cordón pero se rompe inmediatamente si se le curva en forma de aro; la masa de suelo se deforma por una fuerza muy ligera
PL	Plástico (Media)	Se forma el cordón pero se rompe al doblarlo en forma de aro; se requiere una fuerza ligera a moderada para deformar la masa de suelo
Vpl	Muy plástico (Alta)	Se forma el cordón y se puede doblar en forma de aro; se requiere una fuerza moderadamente fuerte a muy fuerte para deformar la masa de suelo

Tabla 5. criterios para definir la plasticidad

Fuente: ONU (2009. Citado por (Servicio Geológico Colombiano, 2017)).

• **Nomenclatura**

Establecido el origen y la litología de las unidades se define la nomenclatura asociada, la cual se ajusta de acuerdo con la caracterización de los materiales en la actividad de comprobación de campo. Los criterios de nomenclatura propuestos por SGC (2016), son los siguientes:

- 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.

La simbología propuesta para las unidades geológicas superficiales dentro del proyecto corresponde a las planteadas por el SGC (2004) y SGC (2017). Dicha clasificación se presenta en a continuación en la Tabla 6.

Tipo de Material	Unidades	Origen	Tipo de U.G.S	Símbolo/Comp osición
SUELOS (S)	Transportado (st)	Fluvial (Stf)	Aluviones de lechos	St/al/ar,lm
			Fluviales	
			Llanura de inundación	Stf/Lli/a,ar
			Terraza aluvial	Stf/tz/gr,ar
			Abanico/cono-aluvial	Stf/ab-co/gr,ar
			Depósitos torrenciales	Stf/dt/bl,gr,ar
			Depósitos fluvio.torrenciales	Stf/ft/bl,gr,a
		Lagunar (Stl)	Depósitos lacustres	Stl/a,ar,lm
			Depósitos paludales	Stl/a,lm,tur
			Depósitos fluvio-Lacustres	Stlf/ar,a,gr
		Glaciar (Stg)	Morrenas	Stg/mr/bl,gr,ar
			Tillitas	Stg/tll/gr,ar
		Fluvio-Glaciar (Stfg)	Abanicos fluvioglaciares	Stfg/ab/gr,ar
			Terrazas fluvioglaciares	Stfg/tz/gr,ar,a
		Volcanico (Stv)	Depósitos de ceniza	Stv/c/lm,ar,a
			Lapilli	Stv/lp/bl,gr,ar,lm
			Tefras	Stv/t
			Lahares	Stv/lh/bl,gr.ar
			Flujos de piroclastos	Stv/fp/gr,ar,lm
			Flujos de lodos	Stv/flv/ar,lm,a
			Volcánicas	
			Ignimbritas	Stv/igni
		Coladas de lava	Stv/cl/ar,lm,a	
		Eolico (Ste)	Depósitos de loess	Ste/l/ar,lm
			Depósitos de dunas	Ste/d/ar,lm
			Baijanes	Ste/b/ar,lm
		Costero (Stc)	Depósitos de deltas	Stc/d/a,ar,lm
			Barras	Ste/b/ar,a,bl
			Playas	Ste/p/ar,a,lm
			Arrecifes	Ste/lm,a,ar
			Terrazas	Ste/tz/ar,a,gr
			Planicies	Stc/pi/a,lm

Tipo de Material	Unidades	Origen	Tipo de U.G.S	Símbolo/Composición	
		Gravedad y ladera (Stgl)	Coluviones	Stglc/ar,a,bl	
			Talus/cono de talus	Stglt/bl,cl,gr	
			Derrubios de pendiente	Stglc/bl,fr,gr	
			Flujos (de lodo, tierra y de escombros)	Stglc/f/l,t,e/ar,gr,l m	
	Residuales (Sr)	De Rocas	S.r de roca parental de textura clástica cementada y granulometría gruesa areniscas y conglomerados	Srs/ar,cng	
		Sedimentarias (Srs)	S.r de roca parental de granulometría fina; arcillolitas, limolitas y Areniscas	Srs/a,lm,ar	
			De Rocas Igneas	S.r. de roca parental de textura cristalina masiva y granulometría gruesa	Srii/ar,lm,a
		Intrusivas o extrusivas (SriiSrie)	S.r de roca parental de composición básica y Granulometría fina	Srii/a,lm,ar	
			De rocas Igneas Volcánicas (Sriv)	S.r de roca parental de origen volcánico y granulometría fina a gruesa	Sriv/ar,lm,a,bl
		De Rocas Metamórficas (S r m)	S.r de roca parental de textura cristalina y bien Foliada	Srm/a,lm,ar	
			S.r. de rocas parentales de textura cristalina masivas y granulometría gruesa (cuarcita, marmol, neis)	Srm/ar,a,lm	
		Depósitos Antrópicos (Sa)	Depósitos Antropogénicos	Rellenos sanitarios o de basuras	Composición heterogénea
				Rellenos de excavaciones o de escombros o botaderos	Composición heterogénea
		Tipo de Material	Unidades		
	ROCAS (R)	Blandas	Resistencia baja <1000Kg/cm2		
		Intermedias	Resistencia Intermedia a Alta 1000 a 2000Kg/cm2		
		Duras	Resistencia Alta a muy Alta > 2000Kg/cm2		

Tabla 6. Simbología propuesta para las unidades geológicas superficiales.

Fuente: SGC (2004) y SGC (2017).

Para la descripción de las UGI relacionadas a los centros poblados se consideraron una serie de insumos bibliográficos y de fuente propia a un mayor detalle que permitió ajustar y describir adecuadamente todas las características asociadas con estas unidades superficiales. Inicialmente a partir de la compilación de información

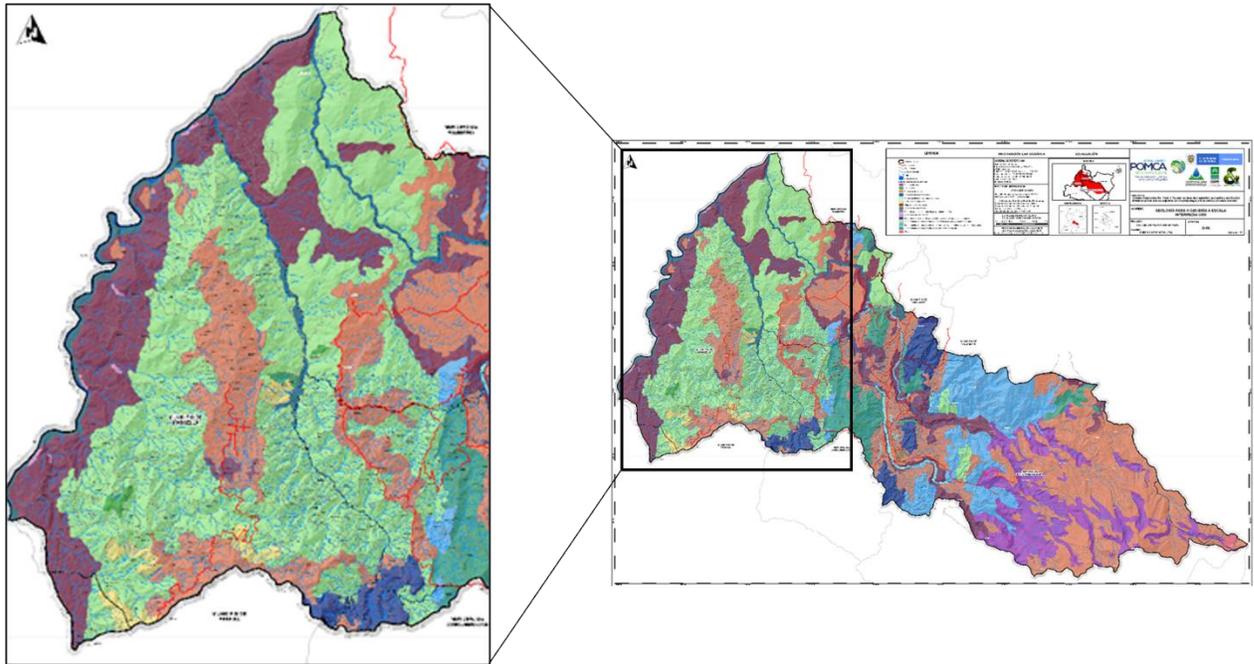


Figura 11. Mapa de UGS cuenca Campoalegre.

Fuente: OMEGA & ASOCIADOS LTDA, 2019. Citado por CARDER (2020).

7.2.2.2 Muestreo geotécnico y secciones geológico-geotécnicas.

Para la elaboración del componente geotécnico en primera medida se analiza y valida la información existente y posteriormente se levanta la necesaria. Seguidamente, se realizan los estudios que contribuyen a la zonificación de las amenazas presentes en el área de estudio, en cuya evaluación se tienen en cuenta aspectos de los diferentes componentes elaborados de manera previa en la línea base del presente estudio. De manera conjunta con el resto de componentes se lleva a cabo durante tres fases.

- **Fase pre-campo**

Durante esta fase se busca obtener información que permita establecer las zonas de mayor interés para realizar los respectivos muestreos, en primer lugar, se utilizaron como base las UGS a escala 1:25.000 para obtener una idea inicial de las posibles unidades aflorantes en la zona delimitada con anterioridad y así poder establecer una maya de puntos con los posibles muestreos.

- **Fase de campo**

Para complementar y ajustar la cartografía se procedió a realizar visitas de campo en las inmediaciones del centro poblado, con el fin de buscar zonas donde los suelos aflorantes fueran los representativos en el área, una vez ubicados se realizó la respectiva descripción en cuanto textura, tamaño de grano, composición, color, humedad, plasticidad, etc. Además, se toman muestras de suelo tanto alteradas como de suelos inalteradas tipo Shelby, dichas muestras se someten a ensayos geotécnicos y de clasificación en laboratorio para completar la descripción de las propiedades del subsuelo.

- **Fase post-campo**

En la fase de oficina y teniendo los insumos necesarios se procede a determinar la zonificación geotécnica y análisis de estabilidad de taludes como se describe a continuación.

Para el desarrollo del presente informe, fue utilizada la teoría de límite equilibrio, mediante la aplicación del software Slide v6.0.

Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática, la cual depende del objetivo del análisis y de los resultados que se deseen obtener. Los objetivos principales del análisis matemático de los taludes son los siguientes:

- Determinar las condiciones de estabilidad del talud (si es estable o inestable y el margen de estabilidad).
- Investigar los mecanismos potenciales de falla (analizar cómo ocurre la falla).
- Determinar la sensibilidad o susceptibilidad de los taludes a diferentes mecanismos de activación (Efecto de las lluvias, sismos, inundaciones, etc.).
- Comparar la efectividad de las diferentes opciones de remediación o estabilización y su efecto sobre la estabilidad del talud.
- Diseñar los taludes óptimos en término de seguridad, confiabilidad y economía.

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes. Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio, son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de deslizamientos sea traslacional y rotacional, así como las fallas de inclinación ("Toppling") y las fallas en cuña. Igualmente, los métodos de límite de equilibrio permiten el análisis combinado con técnicas probabilísticas (Stead y otros, 2000). En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías

de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos. Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos.

La metodología utilizada en los análisis de estabilidad se presenta en la Tabla 7.

Método	Parámetros utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones
Esfuerzo deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elastoplásticas y de "creep". Niveles freáticos, resistencia	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de "creep".	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada
Discontinuos Esfuerzo deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades resistencia y niveles freáticos	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas

Método	Parámetros utilizados	Ventajas	Limitaciones
Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales
Dinámica de flujos	Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado

*Tabla 7. Metodologías utilizadas en los análisis de estabilidad de taludes.
Fuente: Suarez (2010).*

La metodología empleada para en análisis de estabilidad de taludes fue el Equilibrio límite apoyados en el software Slide que requiere los siguientes parámetros

Resultados de laboratorio cohesión, ángulo de fricción, humedad, nivel de aguas freáticas en caso que no haya se asume uno hipotético sobre los materiales permeables, coeficientes de aceleración sísmica de acuerdo a la NRS10. Secciones transversales con polígonos cerrados para integrarlos en el software, geometría o espesores de las capas.

En la Figura 12 se ilustra el desarrollo sistemático para la elaboración del análisis de estabilidad de taludes.



Figura 12. Flujograma representativo de la metodología seguida para el análisis de estabilidad de taludes.

Fuente: Elaboración Propia

7.2.3 Geomorfología a nivel de Elementos Geomorfológicos

La morfogénesis estudia el origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron forma al paisaje, cuya cartografía es la base de los mapas geomorfológicos. El modelado del paisaje está fuertemente influenciado por la combinación de procesos endógenos (deformación, fallamiento, magmatismo) y exógenos (meteorización y erosión), que actúan sobre la superficie terrestre en proporciones e intensidades diferentes y durante intervalos de tiempos geológicos, generando una serie de geoformas que pueden ser diferenciadas y clasificadas (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Las formas del terreno se pueden definir en una región dada dependiendo de la escala de trabajo para lo que se utiliza una jerarquización geomorfológica que permite la clasificación desde grandes áreas geográficas (<1:2.500.000) hasta el máximo nivel de detalle (>1:10.000) (Figura 13). A continuación, se realiza la descripción del rango de clasificación para la caracterización geomorfológica a la escala de trabajo en este estudio propuesta por INGEOMINAS modificada por Carvajal (2011).

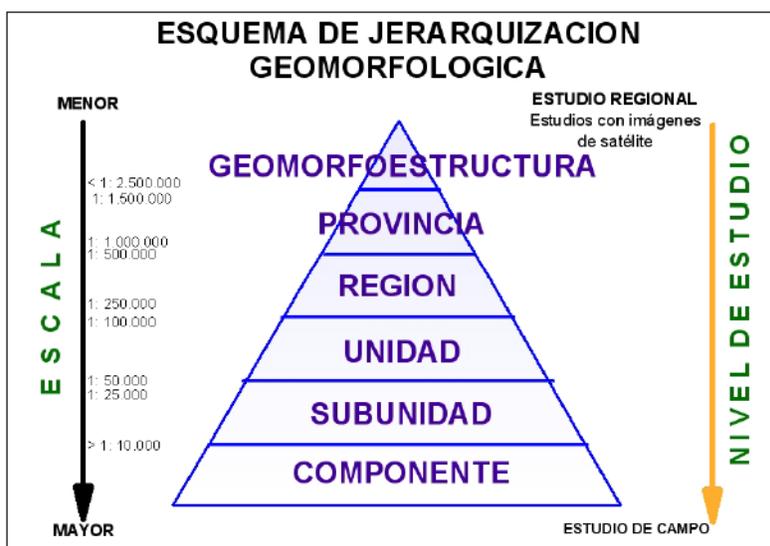


Figura 13. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta para Ingeominas.
Fuente: (Carvajal, 2011).

El componente o elemento geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle dentro de la Jerarquización Geomorfológica ya que se representa a escalas mayores de 1:10.000, está definido por los rasgos del relieve, la morfometría

detallada del terreno y por los micro relieves asociados a una característica litológica con base en análisis detallados. (Carvajal, 2011).

Para la identificación de elementos geomorfológicos en el centro poblado Alto Cauca, se realizó una primera etapa de fotointerpretación en el área por medio del análisis de diferentes insumos de información secundaria como ortofotomosaicos, mapas de pendientes, modelo de elevación digital (DEM), y sus variables geométricas como el relieve sombreado y el aspecto; estas herramientas permiten obtener una diferenciación de los elementos geomorfológicos y así realizar un mapa geomorfológico preliminar. Posteriormente se llevó a cabo la corroboración de esta información con el recorrido de campo realizando los ajustes pertinentes a estos elementos en cuanto al tipo, forma, longitud, entre otros. Finalmente se modificó el mapa de elementos geomorfológicos con base en los análisis mencionados, identificando desde su ambiente de formación, el tipo de proceso modelador y la clasificación de acuerdo a los diferentes rangos de pendiente (Tabla 8) a partir de la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia por Carvajal.

Índices de inclinación	
Inclinación	Descripción
< 5°	Plana o suavemente inclinada
6°-10°	Inclinada
11°-15°	Muy inclinada
16°-20°	Abrupta
20°-30°	Muy abrupta
31°-45°	Escarpada
>45°	Muy escarpada

Tabla 8. Rangos de clasificación de la pendiente.

Fuente: (Carvajal, 2011).

Teniendo en cuenta la escala de trabajo se elaboró un mapa de elementos geomorfológicos (EGMF) para lo cual se siguieron los criterios de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, escala 1:5.000 del SGC (2016), cuyo objetivo es identificar y caracterizar las geoformas del terreno desde la morfogénesis, morfología, morfometría y morfodinámica que relacionan la interacción dinámica interna de la tierra (deformación, magmatismo, fallamiento) con los procesos que suceden sobre la superficie (meteorización y erosión).

7.2.3.1 Morfometría

Para el análisis y clasificación morfométrica se hace uso del procesamiento digital de imágenes satelitales y la categorización de modelos digitales de elevación (DEM) con el objetivo de obtener los valores de los parámetros geomorfológicos

descriptivos. Estas variables que constituyen las características geométricas de ladera, también llamadas variables derivadas del DEM, elaboradas para el presente estudio corresponden a inclinación de ladera y curvatura, tal como se definen a continuación:

7.2.3.1.1 Inclinación de la ladera

El Análisis de las pendientes de un terreno se ha convertido en una herramienta indispensable para los estudios de gestión del riesgo de cualquier territorio ya que es considerado una de las principales variables temáticas para los análisis de susceptibilidad del terreno a presentar fenómenos naturales tales como movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Al conjugar dicho mapa con otros factores condicionantes del terreno se pueden identificar unidades cartográficas con mayor susceptibilidad a uno de estos tipos de fenómenos, o bien por sí solo, al confrontarse con inventarios de eventos históricos se pueden llevar a cabo zonificaciones en los rangos definidos por el equipo profesional que lleva a cabo el análisis.

La pendiente del terreno es definida como la zona con mayor tasa de cambio de elevación en un área determinada y es una forma de medir el grado de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal, a mayor inclinación del terreno mayor es su valor.

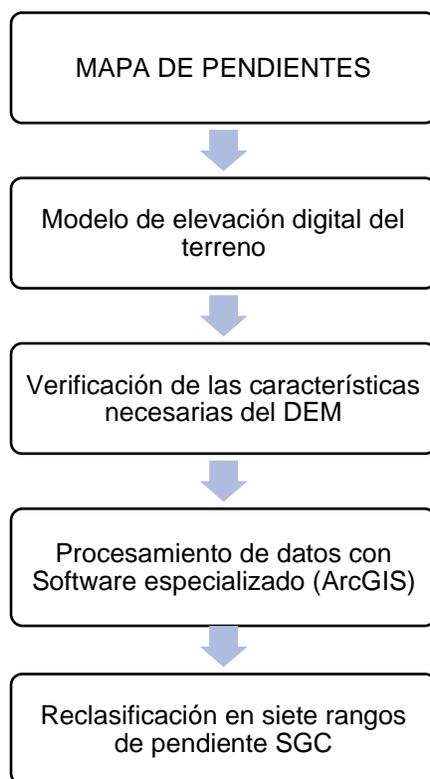
Puede ser representada con dos tipos de unidades de medida:

- Valores en grados (°) donde el rango de valores de pendiente en grados es 0 a 90°.
- Valores en porcentaje (%) para la elevación en porcentaje, cuándo el ángulo de la pendiente es igual a 45° la elevación es igual al avance, el rango es 0 hasta la aproximación al infinito. Una superficie plana es 0%, una superficie de 45° es 100% y, a medida que la superficie se vuelve más vertical, la elevación en porcentaje se vuelve cada vez mayor (ESRI, 2016).

En el caso del presente estudio, se ha representado las pendientes con valores en grados (°) según los rangos propuestos por el SGC para estudios de gestión del riesgo.

El mapa de pendientes fue construido utilizando un software especializado SIG partiendo de un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus iniciales en inglés) que es una representación visual y matemática de los valores de altura (z) con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los

elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular. En los Modelos de Elevación Digital existen dos cualidades esenciales que son la precisión en la altura y la resolución horizontal o grado de detalle digital (pixel o tesela) de representación en formato digital. En la Figura 14 se muestran las etapas para la obtención del mapa de pendientes. Para el municipio los DEM utilizados tiene una resolución por pixel de 0,16 m para el centro poblado Alto Cauca, cumpliendo así con la escala de trabajo indicada en el decreto 1807 de 2014 para estudios básicos de gestión del riesgo que corresponde a 1:5.000 para la zona urbana como es el caso.



*Figura 14 Flujograma de trabajo para la obtención del mapa de pendientes.
Fuente: Elaboración propia*

Mediante el procesamiento de la información de la topografía del terreno obtenida a partir del DEM se generó el mapa de pendientes en grados para el área de estudio, los siete rangos de clasificación de pendientes (Tabla 8) son definidos de acuerdo a la categorización de pendientes de Carvajal (2011). De lo anterior, se obtuvo como productos las salidas cartográficas para las pendientes del área de estudio en grados con su respectiva leyenda.

7.2.4 Coberturas de la tierra

El IGAC (2013), define la cobertura del suelo como el aspecto morfológico y tangible de este, que comprende todos los elementos que constituyen el recubrimiento de la superficie terrestre, de origen natural o cultural, los cuales son observados y permiten ser medidos, con fotografías aéreas, imágenes de satélite u otros. Este concepto se relaciona con lo que se conoce como uso de la tierra, que hace referencia a las funciones que se desarrollan sobre aquellas cubiertas (actividades realizadas por el hombre) de forma parcial o permanente.

Se lleva a cabo la validación de coberturas del centro poblado Alto Cauca con el fin de corregir los errores preliminares que puedan evidenciarse. Para esto se solicitaron los archivos correspondientes de SIG, los cuales primeramente se exportaron para visualizar en el Software ArcGIS los mapas necesarios que contenían la información específica de las Coberturas de la tierra en conjunto con las ortofotografías respectivas de cada área de análisis.

Las coberturas que allí se nombran, fueron digitalizadas con base principalmente a la metodología CORINE Land Cover, la cual nació en 1985, con el inicio del programa CORINE, “Coordinación de información de medio ambiente”, que es un proyecto de tipo experimental para recopilar, coordinar y homogeneizar la información del estado del medioambiente y los recursos naturales, con el objetivo fundamental de recolectar datos de tipo numérico y geográfico sobre el tipo de vegetación o cobertura a través de la interpretación de imágenes satelitales.

La metodología CLC, llegó a Colombia y fue modificada y ajustada por entidades como el IGAC, IDEAM, Cormagdalena, y asesorados por expertos del Instituto Geográfico Nacional de Francia. Estas entidades desarrollaron un proyecto piloto para la estandarización del sistema de clasificación y elaboraron la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. La leyenda está constituida en forma jerárquica e incluye los territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua, estas se dividen internamente hasta coberturas de nivel 6 para escalas muy grandes, así como se muestra en la Tabla 9, extraída del documento oficial de La Leyenda Nacional de coberturas de la tierra: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Sin embargo, en el presente informe se trabajaron con coberturas hasta de nivel 4 para los mapas a escala 1:5.000 del centro poblado.

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 ripano
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	3.2. Áreas con vegetación herbáceas y/o arbustiva
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	3.2.1.1. Herbazal denso
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.3. 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. Viñedos	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. Saltral
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

Tabla 9 Leyenda nacional de coberturas de la tierra Corine Land Cover
Fuente: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia

Con esta información se obtuvieron los datos estadísticos que permitieron identificar el área por hectáreas de cada una de las coberturas y así mismo el porcentaje que representan en la zona de estudio, además de algunos registros fotográficos que permitieron tener una visión cercana y hacer una descripción cualitativa de cada área de estudio en términos de uso de suelo.

7.3 Metodología de zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa (1:5000)

La susceptibilidad es la medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes y puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos en masa existentes o potenciales. Los mapas de susceptibilidad contienen información sobre el tipo de deslizamiento que puede ocurrir y sobre su posibilidad de ocurrencia espacial en términos de identificación de las áreas de iniciación más probables y la posibilidad de extensión. Es la representación gráfica de la división del territorio en áreas o dominios homogéneos y su categoría de acuerdo con el nivel de susceptibilidad, amenaza o riesgo actual o potencial (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Para el cálculo de la susceptibilidad se utilizó un método de tipo estadístico que permitió establecer relaciones entre los factores condicionantes, los procesos morfodinámicos identificados en la zona, y las posibles zonas susceptibles a presentarlo en el futuro. Dicho análisis se realizó en primera medida estipulando las condiciones de estabilidad teóricas que pueden asociarse a las variables dentro de cada condicionante (UGI, EGMF, Coberturas, Pendientes, Relieve relativo), para lo anterior se usaron parámetros de jerarquización como la inclinación de laderas, textura de los suelos y profundidad radicular, en algunos casos la relación con el número de procesos morfodinámicos y el área de ocupación. Estos descriptores que se pueden considerar variables independientes, categorizan el presente método como estadístico multivariado, el cual da como resultado una matriz que se analiza usando regresiones múltiples o análisis discriminantes. Con este método se han tenido buenos resultados en zonas homogéneas o en áreas con apenas pocos tipos de movimientos en masa.

Para la generación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:5000 se emplearon variables cualitativas como coberturas, Elementos Geomorfológicos, Unidades Geológicas para Ingeniería y cuantitativas como pendientes y relieve relativo. Factores a los cuales se les asignaron valores mediante una matriz de comparación, que a su vez representan la preponderancia con respecto al resto de variables utilizadas. En la Tabla 10 se presentan los valores de referencia utilizados para determinar dicho calificativo dentro de las comparaciones realizadas.

ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo.
5	Más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
1	Igual	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Tabla 10 Escala numérica y escala verbal de comparación entre variables dentro de la matriz de pares. Fuente:

Es de tener en cuenta que el orden de importancia o jerarquización de las variables fue un proceso analítico que se determinó de manera particular en cada zona de interés, debido a que los factores condicionantes inciden de manera diferente en cada unidad de estudio.

En la Figura 15 se presenta el ejemplo de matriz general, dentro de la cual se asignaron los pesos anteriormente mencionados (Tabla 10), dicha matriz es utilizada para el cálculo de los porcentajes de importancia de todas las temáticas evaluadas, además permite calcular el índice y la relación de consistencia, que funcionaron como mecanismo de control para determinar qué tan acertado fue cada modelo propuesto.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE PARES														
IMPORTANCIA														
FACTORES CONDICIONANTES	ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	COBERTURAS	PENDIENTES	RELIEVE RELATIVO	UGI	MATRIZ DE NORMALIZACIÓN (VN)					vector de priorización (VP)	%	vector suma ponderada %	linda (λ)
ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	1,000	2,500	5,000	7,14285 714	10,000	0,543	0,590	0,549	0,445	0,390	0,504	50	2,640	5,243
COBERTURAS	0,400	1,000	2,500	5	7,143	0,217	0,236	0,275	0,312	0,279	0,264	26	1,372	5,202
PENDIENTES	0,200	0,400	1,000	2,500	5,000	0,109	0,094	0,110	0,156	0,195	0,133	13	0,676	5,090
RELIEVE RELATIVO	0,140	0,200	0,400	1,000	2,500	0,076	0,047	0,044	0,062	0,097	0,065	7	0,328	5,020
UGI	0,100	0,140	0,200	0,400	1,000	0,054	0,033	0,022	0,025	0,039	0,035	3	0,175	5,039
SUMA	1,840	4,240	9,100	16,043	25,643	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	100		5,119
1/SUMA	0,543	0,236	0,110	0,062	0,039									

Figura 15. Matriz de comparación de pares.
Fuente: Elaboración propia.

En la parte media de la matriz se realiza un tratamiento de datos que permiten la normalización de los calificativos mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Valor de normalización (VN): } \textit{peso} / \left(\frac{1}{\textit{suma del condicionante}} \right)$$

Una vez obtenidos los datos de normalización se calcula la sumatoria de manera horizontal del vector priorización, valor asociado al porcentaje (%) de importancia o favorabilidad de cada temática para la presentación de movimientos en masa.

$$\text{Vector priorización (VP): } VN + VN2 + VN3 + \dots + VNn$$

El cálculo de la consistencia de las matrices se calculó mediante el método propuesto Saaty (1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)), en el cual consideran la siguiente ecuación:

$$CR: \frac{CI}{RI(n)}$$

En donde:

- n: Número de variables
- CI: Índice de consistencia, calculado mediante la ecuación:

$$CI: \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1}$$

- λ_{max} (Landa): Debe ser igual o cercano al número de variables si la matriz es consistente, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_{max} = \frac{V_{SumaPonderada}}{(VP)_{vector\ priorización}}$$

- RI (n): índice de consistencia aleatorio: los valores fueron tomados de la tabla propuesta por Saaty (1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)), donde se asignan valores para matrices de n variables (Tabla 11).

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,57	1,583	1,595

Tabla 11 RI (n): índice de consistencia aleatorio según el número de variables utilizadas.
Fuente: (Saaty, 1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)).

Una vez calculado el RC se consideraron los siguientes parámetros de referencia (Tabla 12) para verificar que la matriz se ajusta y el modelo para el cálculo de la susceptibilidad funcionaba.

RC= IC/IA	
RC=	0,027
PARAMETROS	
3	0,04
4	0,08
>5	0,10

Tabla 12 Parámetros de consistencia de la matriz de comparación de pares.
Fuente: (Saaty, 1980. Mencionado por Aguarón & Moreno Jiménez (2002)).

La metodología anterior utilizada para el tratamiento de datos se replicó dentro de cada una de las temáticas o condicionantes, proceso que permitió jerarquizar las unidades pertenecientes a cada condicionante de manera objetiva mediante varios parámetros de calificación. Por lo tanto, se establecieron en orden descendente las preferencias o favorabilidad de las diferentes unidades ante la presentación de fenómenos de inestabilidad, asignando valores de 1–9, dependiendo de la escala de importancia mostrada en la Tabla 10.

7.3.1 Parámetros de evaluación dentro de los condicionantes

Los parámetros de evaluación se consideran por la necesidad de saber que tanto puede favorecer una unidad cartográfica a la presentación de movimientos en masa. Dentro de los Elementos Geomorfológicos se tuvo en cuenta la inclinación de las laderas, para coberturas, la profundidad radicular teórica y en algunos casos el drenaje profundo, por otro lado, dentro de la temática de unidades geológicas para ingeniería se consideró la textura de los suelos y sus propiedades geomecánicas, datos que fueron tomados de los resultados de laboratorio de las muestras recolectadas durante la etapa de campo. Para las variables cuantitativas como relieve y pendiente se preponderaron tras un análisis de inclinación de las laderas con respecto a la favorabilidad de desarrollo de suelos y posterior remoción o erosión. Para finalizar, en algunos casos se tuvo en cuenta el inventario de procesos morfodinámicos y sus relaciones areales, ya que se pudieron reconocer dentro de las zonas algunas variables de los condicionantes que no respondían a las condiciones de estabilidad teórica, por el contrario, ya sea por la combinación de diferentes descriptores o por relaciones de campo particulares, se comportan de maneras más o menos susceptibles dentro de las zonas de estudio. Para estos casos se realizaron las salvedades pertinentes dentro de los análisis.

Por lo tanto, las condiciones de estabilidad teórica funcionaron como herramienta principal de jerarquización de las variables existentes dentro de todas las temáticas evaluadas: (coberturas, elementos geomorfológicos, unidades geológicas para ingeniería, pendientes y relieve relativo). Es de considerar la interacción de los anteriores elementos y la incidencia de las comunidades que interrumpen o modifican para su supervivencia y desarrollo, y que las acciones antrópicas generan o contribuyen a la aparición de diferentes procesos de deterioro de ecosistemas, cambian en el patrón de ciclos hidrológicos, la estabilidad de los suelos y las características geomorfológicas (generalmente favoreciendo la presentación de fenómenos de remoción en masa, flujos, avalanchas, o diferentes tipos de erosión como erosión laminar, reptación, sobrepastoreo, surcos).

- **Profundidad radicular**

Parámetro utilizado para jerarquizar las coberturas de tierra. Este criterio es asociado al sistema radical de la vegetación y contribuye a incrementar o “mejorar” el esfuerzo cortante de los suelos ante una probabilidad de falla de los mismos, situación que se ha comprobado en algunos estudios.

Según Fajardo (2005. Mencionado por Servicio Geológico Colombiano (2013)) se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones.

- El pasto alto (elefante, gigante o similares), evita completamente la erosión por las gotas de lluvia, retarda el flujo y evita la erosión laminar. Las raíces profundas eliminan las cárcavas y surcos.
- Las raíces actúan como refuerzo y sostén del suelo incrementando la resistencia al cortante y la resistencia a la fuerza tractiva del agua. La forma como las raíces actúan en cada caso está determinada por el tipo de planta y por las condiciones del suelo del sitio.
- Las raíces pivotantes pueden ser más útiles para la estabilidad a la erosión en masa, pero las raíces de extensión lateral y radial pueden tener mejor efecto para la protección de la erosión superficial. Una alta densidad o concentración de raíces fibrosas, de pequeño diámetro, pueden ser más efectivas para control de erosión superficial que unas pocas raíces de gran diámetro.
- La profundidad y extensión de las bifurcaciones de las raíces son importantes cuando hay que escoger plantas para estabilizar el suelo, en este caso raíces profundas son mejores. Adicionalmente, la estabilidad depende de las propiedades mecánicas de las raíces y el tipo de suelo o aparición de roca que pueden limitar el crecimiento de las mismas.

De acuerdo con las anteriores consideraciones el autor asigna calificativos de susceptibilidad en una escala de 1 a 5, siendo 1 la cobertura que menos favorece la presentación de fenómenos de inestabilidad y 5 la cobertura que más susceptible. Por lo que concluye que las coberturas que mejor protegen y son menos susceptibles a movimientos en masa son los bosques y sugiere dar una calificación entre 1 y 2 según el grado de intervención que haya tenido. La infraestructura urbana que impermeabiliza el terreno puede considerarse dentro de la misma categorización, mientras que, para el caso de cultivos y pastos el experto podrá evaluar el tipo de cobertura (la calificación puede estar alrededor 2 - 3 - 4), otras coberturas como pastos, arbustales, vegetación secundaria pueden dárseles calificación intermedia (3-4).

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

Tabla 13 Susceptibilidad de las coberturas de tierra con respecto a la profundidad radicular.

Fuente: Manual de suelos de la subdirección de Agrología – IGAC. (USDA,2007. Mencionado por (Servicio Geológico Colombiano, 2013)).

A continuación, en la Tabla 14 se presenta la categorización adaptada para las zonas de estudio del presente trabajo, dentro de la cual se jerarquizan las coberturas más comunes dentro del municipio de Marsella, categorización que fue tomada en cuenta para realizar las matrices de comparación pertenecientes a cada centro poblado. Es de anotar que pueden existir coberturas adicionales, que deben ser calificadas de acuerdo a su similitud y relación con las aquí descritas.

Coberturas por profundidad radicular	
Tipo de cobertura de tierras	Susceptibilidad
Cuerpos de agua	Muy bajo
Bosque denso, Bosque fragmentado con pastos y cultivos, Plátano y banano. Bosque denso alto de tierra firme, Bosque fragmentado con vegetación secundaria, Bosques de Galería y/o Ripario, Mosaico de cultivos con espacios naturales, Tejido urbano continuo.	Bajo
Bosque fragmentado con pastos y cultivos, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales. Bosque fragmentado con pastos y cultivos. Bosque fragmentado con vegetación secundaria, Vegetación secundaria o en transición.	Medio
Mosaico de pastos, cultivos y espacios naturales, Mosaico de Cultivos, Mosaico de pastos con espacios naturales, Mosaico de pastos y cultivos, Pastos enmalezados. Herbazal denso de tierra firme, Mosaico de pastos con espacios naturales, Pastos limpios, Vegetación secundaria o en transición. Pastos limpios, Tejido urbano discontinuo.	Alto
Pastos limpios, Tierras desnudas	Muy Alto

Tabla 14 Calificación de susceptibilidad de coberturas de tierra por el parámetro de profundidad radicular. Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2013).

- **Inclinación de las laderas (IL)**

Parámetro utilizado para la jerarquización de las pendientes y los elementos geomorfológicos. Se hace referencia a este parámetro porque generalmente está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de los movimientos en masa. En general Vargas (2001. En Servicio Geológico Colombiano (2013)). afirma que existe una relación directa y proporcional entre las variables. Aunque siendo un factor dinámico importante, esta relación no siempre fué correlacionable y dependió en algunos casos del tipo de material o relaciones de campo con zonas aledañas,

La Tabla 15 permite correlacionar los materiales a la inclinación de las laderas (Pendiente), donde se puede observar que naturalmente entre mayor sean las pendientes de las laderas mayor será sus susceptibilidad en la presentación de procesos morfodinámicos, cabe resaltar dentro de este trabajo, para algunos modelos de susceptibilidad se utilizaron los rangos de pendiente postulados por SGC (2017), dado que la zona de estudio podía presentar un relieve más homogéneo, con menos variación en los grados de pendiente. Se jerarquizaron de la misma manera, variando únicamente la extensión de los intervalos asociados.

Inclinacion (grados)	Descripcion	Caracteristicas del material	Susceptibilidad
< 5	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a mm.	Muy Bajo
5 – 10	Inclinada.	Blanda y baja mm.	Bajo
10 – 15	Muy inclinada.	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a mm.	Medio
15 – 20	Abrupta.	Moderadamente resistente y moderada susceptibilidad a mm.	Medio
20 – 30	Muy abrupta.	Resistente y alta susceptibilidad a mm.	Alto
30 - 45	Escarpada.	Muy resistente y alta susceptibilidad a mm.	Alto
> 45	Muy escarpada.	Extremadamente resistente y alta susceptibilidad a mm.	Muy Alto

Tabla 15 Calificación de susceptibilidad de los rangos de pendiente y su relación con el tipo de material. Fuente: (Vargas, 2001. Mencionado en Servicio Geológico Colombiano (2013)).

A continuación, en la Tabla 16 se presenta la categorización adaptada para las zonas de estudio del presente trabajo, dentro de la cual se jerarquizan los Elementos geomorfológicos más comunes dentro del municipio de Marsella, categorización que fue tomada en cuenta para realizar las matrices de comparación pertenecientes a cada centro poblado. Dentro de algunas variables se tuvo en cuenta la relación con los procesos morfodinámicos, características que se

discriminaron en la columna: Condiciones. Es de anotar que pueden existir algunos Elementos adicionales, que deben ser calificadas de acuerdo a su similitud y relación con las aquí descritas.

Elementos Geomorfológicos		
Elementos Geomorfológicos	Susceptibilidad	Condiciones
Laderas volcánicas denudacionales, Superficie plana o sub-horizontal, Cima, Area urbanizada, Superficies de explanación, Cauce, Terraza, Canales artificiales.	Muy bajo	
Cima, Laderas onduladas, Escarpe antrópico	Bajo	*Cimas con IPM relacionado a sobrepastoreo o erosión laminar >50%
Laderas erosivas, Laderas disectadas/muy disectadas, Escarpes de terraza, Llenos antrópicos, Cono de deslizamiento	Medio	*Laderas erosivas con IPM relacionados a sobrepastoreo, erosión laminar, zurcos. 0-50%
Laderas denudadas, laderas erosivas	Alto	Laderas erosivas con IPM relacionados a sobrepastoreo >50%, grietas o deslizamientos.
Escarpe, cuenca denudada	Muy Alto	

Tabla 16 Calificación de susceptibilidad de Elementos Geomorfológicos con respecto a la inclinación de laderas y al IPM.

Fuente: Modificado de (SGC, 2013).

- **Intervalo de altura**

Parámetro utilizado para la jerarquización de las categorías de Relieve relativo. Según Chacón, (1993. Mencionado por SGC (2013)) El índice de relieve se entiende como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área, y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno. Es de anotar que para la obtención del raster se tomaron celdas de análisis de 20 m x 20 m.

La categorización del relieve relativo con respecto a la susceptibilidad por movimientos en masa se estableció con respecto a la máxima diferencia de altura, de manera que las zonas de menor diferencia corresponden a zonas menos susceptibles a los movimientos en masa, mientras que las zonas donde hay una diferencia de altura mayor en una misma distancia tendrán más susceptibilidad a movimientos en masa, por favorecer la caída de rocas y deslizamiento de materiales (Tabla 17).

Rangos de relieve Intervalos de altura (m)	Descripción de relieve	Susceptibilidad
0 - 1,51	Muy bajo	Muy Baja
1,51 – 2,84	Bajo	Baja
2,84 - 4,36	Moderado	Media
4,36 – 7,47	Alto	Alta
7,47 - 100	Muy alto	Muy Alta

Tabla 17 Susceptibilidad por intervalos de altura asociados al relieve relativo.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- **Textura**

Parámetro utilizado para la jerarquización de las unidades geológicas para ingeniería cuando no existen procesos morfodinámicos asociados. La textura indica la distribución de las diferentes partículas de suelo de tamaño menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas). Se encuentra relacionada de manera directa con la humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos entre otras (Servicio Geológico Colombiano, 2013).

Es importante en la jerarquización de suelos tener en cuenta las siguientes consideraciones realizadas por el SGC (2013):

- En suelos arcillosos el movimiento vertical del agua es menor por cuanto los poros son más pequeños, de esta manera la conductividad hidráulica también es menor, haciendo de los suelos menos permeables, la consecuencia es que aumentan el contenido de agua, se saturan y finalmente son más susceptibles a movimientos en masa.
- Contrario a los suelos arcillosos, los de textura gruesa (arena, grava) serán menos susceptibles por cuanto el agua se desplaza a mayor velocidad en el perfil del suelo (mayor velocidad de infiltración), caracterizando los suelos más permeables y con mayor conductividad hidráulica.
- Los suelos con mayor contenido de materia orgánica se saturarán, se vuelven más fluidos, menos consistentes y entre mayor sea la pendiente donde estén ubicados mayor será la susceptibilidad a moverse.

Con base en el comportamiento de cada partícula (arena, limo y arcilla) y sus relaciones de estabilidad, las unidades geológicas para ingeniería se pueden organizar con respecto a su textura en 5 categorías de susceptibilidad donde la calificación de 5 es más susceptible a movimientos en masa.

La clasificación textural se consultó directamente de los resultados de laboratorio obtenidos para cada muestreo de suelos, Los cuales entregaron la clasificación SUCS de los suelos.

A continuación, en la Tabla 18 se presenta la categorización adaptada para las zonas de estudio del presente trabajo, dentro de la cual se jerarquizan los Unidades geológicas para ingeniería teniendo en cuenta la clasificación SUCS obtenida de laboratorio. Es de anotar que estas son las unidades más comunes dentro del municipio de Marsella, categorización que fue tomada en cuenta para realizar las matrices de comparación pertenecientes a cada centro poblado.

Unidades geológicas para ingeniería			
Unidades geológicas para ingeniería	SUCS	Descripción granulométrica	Susceptibilidad
Depositos aluviales o de cauce, Barras, Terrazas	GP-GM-GW	Grano muy grueso	Muy bajo
	SP- SW	Grano grueso	Bajo
Suelo residual de rx ígnea Volcánica (Barroso), Depósitos de caída piroclástica, Depósitos de Lahar, Suelo residual de rx sedimentaria (Quebradagrande)	SM	Grano medio, grano fino	Medio
Suelo residual de rx volcánica (Quebradagrande)	ML- CL	Grano muy fino	Alto
Depósito antrópico, Depósitos Coluviales	Materiales heterogéneos	Material heterogéneo	Muy Alto

Tabla 18 Calificación de susceptibilidad de de las unidades geológicas para ingeniería de acuerdo a su clasificación SUCS

Fuente: Modificado de los datos del departamento de agricultura de EEUU (2013) y el Instituto Nacional de Defensa Civil, Perú (2011).

- **Tratamiento estadístico con respecto al Inventario de Procesos Morfodinámicos (IPM)**

Para la jerarquización de las unidades dentro de cada temática se tuvieron en cuenta (en caso de necesitarse) las áreas asociadas a polígonos de procesos morfodinámicos, de esta manera se determinó que las unidades más susceptibles corresponden a las relacionadas a la mayor cantidad de hectáreas afectadas por fenómenos de inestabilidad.

Este tratamiento de datos es realizado para cada una de las temáticas evaluadas dentro de cada zona de estudio (unidades geológicas para ingeniería, coberturas, elementos geomorfológicos, pendientes y relieve relativo) teniendo en cuenta relaciones de campo recolectadas durante la realización del muestreo geotécnico.

7.3.2 Cálculo de la susceptibilidad

Para la escala 1:5000 se tuvieron en cuenta las siguientes variables temáticas dentro de cada zona de estudio, sin embargo, tras un análisis riguroso se asignó una jerarquización de importancia y pesos diferentes en cada caso, dado que su influencia en la presentación de movimientos en masa se estudió de manera independiente y no generalizada, para obtener así el modelo más ajustado a la realidad del área analizada. (Figura 16).



Figura 16 Variables consideradas para el cálculo de susceptibilidad en los análisis a escala 1:5000, asociados a los centros poblados y cabecera de Marsella.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

Una vez determinados mediante las matrices de comparación todos los vectores de priorización de las unidades cartográficas pertenecientes a cada variable (Figura 15) es necesario calcular el peso final de cada unidad cartográfica mediante la siguiente ecuación:

$$ISD: \sum W_j * w_{ij}$$

Dónde:

ISD: Índice de susceptibilidad por deslizamientos

W_j: Peso de la variable j

w_{ij}: Peso de la unidad i en la variable j

n: Número de variables

El cálculo final de susceptibilidad se realizó mediante herramientas SIG, ingresando los pesos finales de las unidades cartográficas, en todas las variables, para posteriormente realizar una unión y una sumatoria lineal con la calculadora de campos, proceso que dio como resultado el peso ponderado final de la superposición de variables. Una vez realizada la sumatoria ponderada se clasificó el resultado final en cinco categorías de intervalos iguales, dando como resultado la siguiente categorización (Figura 17).

Categoría de susceptibilidad		Descripción
I	Muy baja	La categoría muy baja se encuentra asociada a las áreas urbanizadas o tejido urbano discontinuo. Las pendientes características presentan un rango aproximado de 0-8° de inclinación y un relieve relativo predominante de 2,84 a 4,36 metros. Con respecto a las UGI, los materiales predominantes asociados a esta zonificación son suelos transportados volcánicos de cenizas.
II	Baja	La categoría baja se puede zonificar principalmente en tres partes de la zona de estudio. Inicialmente se presenta en las áreas aledeñas de las zonas urbanizadas o tejido urbano discontinuo. Se asocia con pendientes de 8-16° principalmente moderadamente abruptas y un relieve relativo predominante de 4,36-7,47 metros de desnivel entre taludes o laderas. La UGI predominante es el suelo transportado volcánico de cenizas. En segunda instancia la zona con una mayor susceptibilidad baja se encuentra asociada a laderas onduladas abruptas, inclinadas, muy inclinadas. Las coberturas asociadas son normalmente mosaico de cultivos, bosque ripario y una zona de pastos limpios de menor proporción. Las pendientes son en mayor medida de 16-35° siendo abruptas y en menor medida se presentan pendientes de 8-16° moderadamente abruptas. El relieve relativo predominante es 4,36-7,47 metros de desnivel entre laderas y la UGI predominante corresponde a suelo transportado volcánico de cenizas. Por último, se presenta en zonas dispersibilidad sobre los suelos transportados volcánicos de cenizas. Inmente. Las coberturas asociadas son mosaicos de cultivos y cultivos de plátano y banano principalmente. El rango de pendientes es de 8-16° siendo moderadamente abruptas. El relieve relativo predominante de 4,36-7,47 metros de desnivel entre taludes o laderas. La UGI predominante es suelo residual a partir de roca volcánica básica correspondiente a la Formación Barroso.
III	Media	La zonificación de susceptibilidad media esta asociada geomorfológicamente a laderas onduladas abruptas, laderas onduladas muy inclinadas y sectorizada en laderas erosivas abruptas en zonas sin procesos de erosión asociados. Las coberturas son principalmente zonas de producción agrícola, como mosaicos de cultivos, cultivos de café y plátano y zonas de bosques fragmentados en menor medida. Las pendientes se encuentran en un rango de 16-35° de inclinación abrupta y un relieve relativo definido por dos rangos, uno predominante de 4,36-7,47 metros y en menor proporción un rango de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de la susceptibilidad media se encuentra definida en mayor medida a la UGI predominante de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación Barroso y en zonas sin presencia de procesos erosivos se asocia a suelos transportados volcánicos de cenizas.
IV	Alta	La categoría alta se encuentra asociada geomorfológicamente a laderas denudadas abruptas y laderas denudadas muy inclinadas en las partes aledeñas a la presencia de procesos de remoción en masa. Adicionalmente también se presenta susceptibilidad alta en laderas erosivas muy abruptas, laderas erosivas abruptas y ladera erosiva inclinada que presentan procesos de erosión laminar. Las coberturas normalmente son pastos limpios y en menor medida zonas de cultivos como plátano y banano o mosaicos de cultivos que se encuentran ubicados en una ladera ya afectada por procesos morfodinámicos. Las pendientes asociadas se encuentran en un rango de 16-35° de inclinación abrupta principalmente y un relieve relativo predominante de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de la susceptibilidad alta se encuentra asociada en mayor medida a la UGI predominante de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación Barroso y hacia el límite NE del área de análisis se concentra la susceptibilidad sobre los suelos transportados volcánicos de ceniza.
V	Muy Alta	Geomorfológicamente se encuentra asociada directamente a laderas denudadas abruptas, laderas denudadas muy inclinadas, laderas erosivas muy abruptas, laderas erosivas abruptas y ladera erosiva inclinada que presentan procesos de erosión laminar y deslizamientos. Las coberturas normalmente son pastos limpios y en menor medida zonas de cultivos como plátano y banano o mosaicos de cultivos que se encuentran ubicados en el área de afectación de los procesos morfodinámicos. Las pendientes asociadas están en un rango de 16-35° de inclinación abrupta principalmente y un relieve relativo predominante de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de susceptibilidad muy alta se encuentra asociada con las áreas de afectación por la presencia u ocurrencia de procesos morfodinámicos que en mayor medida se encuentran asociados a la UGI de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación Barroso con presencia de grandes deslizamientos y en menor proporción zonas de erosión laminar y reptación. Hacia la parte N del área de análisis se concentra la susceptibilidad sobre los suelos transportados volcánicos de ceniza con la presencia de zonas de erosión laminar y un deslizamiento.

Figura 17 Categorización de susceptibilidad por movimientos en masa.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

La Figura 17 es un de ejemplo de las características involucradas dentro de cada categoría de susceptibilidad, es de tener en cuenta que esto puede variar dependiendo de las características de cada centro poblado.

8 LOCALIZACIÓN

El municipio de Marsella se encuentra localizado geográficamente en el flanco occidental de la Cordillera Central, al suroriente del departamento de Risaralda; cuenta con un área de 149 km², con una altura mínima de 880 msnm (en la desembocadura del Río San Francisco en el Río Cauca) y máxima de 2100 msnm en el Alto de El Chuzo en la Serranía del Nudo. Como área de interés se consideró la zona norte de este municipio, con el propósito de brindar una aproximación geológica a los sectores circundantes al centro poblado Alto Cauca a la altura de la cuenca del río San Francisco y las microcuencas de la quebrada Micaflores, la quebrada Miraflores y la quebrada Santa Rita-La Siria (Figura 18).

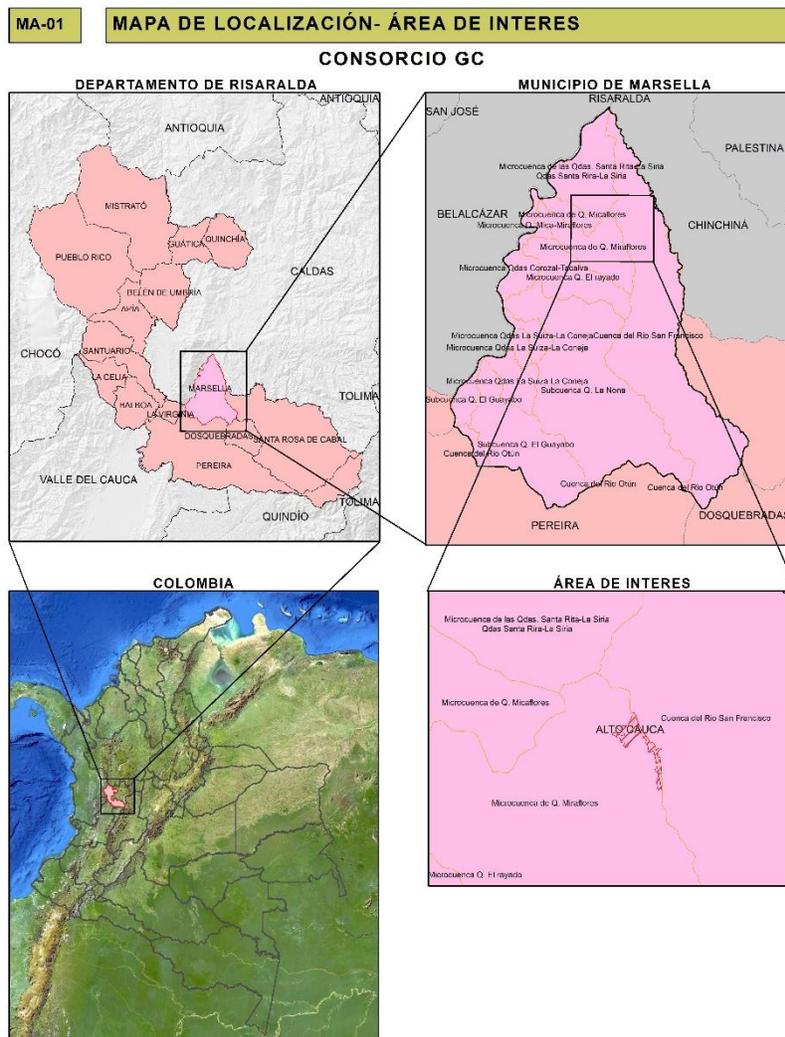


Figura 18. Mapa de localización del área de interés dentro del municipio de Marsella.
Fuente: Elaboración propia, a partir de información generada por el CONSORCIO GC.

9 GEOLOGÍA REGIONAL

A continuación, se realizará la descripción de unidades geológica y unidades geológicas superficiales (UGS) a nivel de la cuenca y las microcuencas presentes en el área de interés con el fin de generar un contexto geológico regional aledaño al área del centro poblado Alto Cauca; además se hará la descripción de la geología estructural que se considera un factor determinante en el contexto geológico regional.

9.1 Unidades Geológicas

El área de interés geológicamente está constituida por las rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso, además se describen los depósitos de caída piroclástica que, a pesar de no ser consideradas en la escala regional, serán consideradas en detalle más adelante en una escala de mayor alcance.

En la Figura 19 se presenta el mapa geológico del área de estudio donde se logra evidenciar la distribución espacial de las unidades que la constituyen y como se encuentran influenciadas estructuralmente.

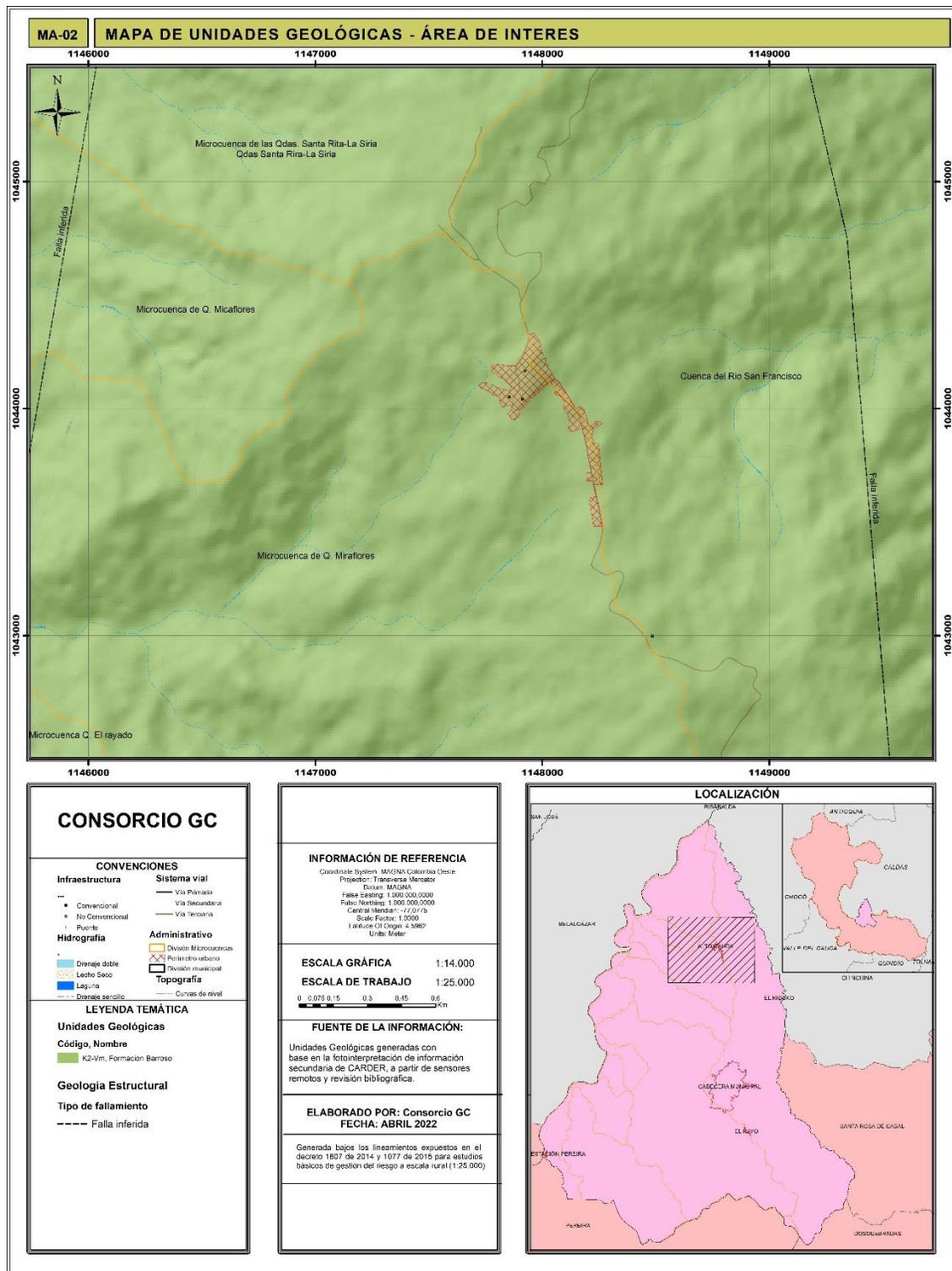


Figura 19. Mapa geológico del área de interés dentro del municipio de Marsella.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

A continuación, se describen las unidades geológicas que abarcan el área de estudio. A partir de la información bibliográfica recopilada, se estableció su

disposición espacial respecto al área de estudio, posible origen geológico y como se encuentran constituidas. Adicionalmente, se manejó una cronología descriptiva comenzando por la unidad más antigua hasta la más nueva de manera que se pueda establecer una sucesión de procesos que hoy constituyen la geología correspondiente al municipio.

9.1.1 Formación Barroso (K2-Vm)

Descripción: Son rocas volcánicas básicas que afloran como una franja alargada en tendencia N-S, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central (Álvarez & González, 1978); (Calle & González, 1982). Presenta un ancho de 5 a 15 km, dependiendo la sección de estudio (Rodríguez & Arango, 2013). Pertenece al Grupo Cañasgordas descrito por Álvarez (1971). Tectónicamente se encuentra localizado al occidente de la Falla Cauca – Almaguer (Álvarez & González, 1978); (Calle & González, 1982).

Constituye dos franjas con características litológicas diferentes, una occidental donde predominan tobas y aglomerados sobre los basaltos y diabasas, con intercalaciones de sedimentos silíceos, y una franja oriental con basaltos y diabasas donde no se encuentran rocas piroclásticas ni sedimentitas. Esta última, presenta una afinidad con un vulcanismo generado en una dorsal meso-oceánica, por otro lado, la occidental está asociado con un ambiente de arco de isla (Estrada, Viana, & González, 2001). Muestreos geoquímicos de la formación presentan una afinidad entre las clasificaciones MORB y toleíticas de arcos de islas, permitiendo una discriminación tectónica del ambiente de formación asociados con un arco de islas (Cartwright, 2019).

Los basaltos y andesitas mineralógicamente presentan textura porfídica con fenocristales de plagioclasa (An) y clinopiroxeno, en una matriz microcristalina (Rodríguez & Arango, 2013). Las tobas y aglomerados contienen fragmentos de vulcanitas con variedad en textura y tamaño, se clasifican principalmente como tobas líticas. Es común la presencia de minerales secundarios de alteración como clorita, epidota, saussurita y sericita (Rodríguez & Arango, 2013).

Cabe resaltar que la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande presentan características litológicas y geoquímicas similares, ambas unidades se encuentran constituidas por lavas basálticas y andesíticas, rocas piroclásticas y sedimentitas intercaladas (Rodríguez & Zapata, 2013). Por otro lado, geoquímicamente en diagramas de discriminación tectónica se encuentran en los mismos campos del diagrama TAS, correspondiendo a rocas de arco de afinidad subalcalina y respecto a el análisis de elementos traza y tierras raras presentan concentraciones afines a

el marco tectónico de rocas generadas por encima de una placa subducida en un ambiente de arco (Rodríguez & Zapata, 2013). Esta similitud destaca la gran complejidad geológica de la zona de estudio y desde un punto de vista más riguroso se requeriría redefinir los límites de la corteza oceánica y continental de este flanco occidental de la Cordillera Central (Rodríguez & Zapata, 2013).

Edad: Los basaltos de la franja occidental han arrojado edades $40\text{Ar} / 39\text{Ar}$ de 77 ± 2 Ma (Estrada J. , 1995) que sugieren una edad del Cretácico tardío para estas rocas; sin embargo, sedimentitas asociadas con rocas volcánicas básicas de la Formación Barroso en la región de Buriticá – Peque, al norte de la plancha 205, contienen fauna del Aptiano – Albiano hasta el Campaniano, lo cual sugiere que la edad del conjunto sea del Cretácico temprano tardío, que se extiende hasta el Cretácico tardío (Estrada, Viana, & González, 2001). Adicionalmente, se han reportado amonites del Coniaciano localizados en el Boquerón de Toyo, sobre la vía a Urabá INGEOMINAS (2005. Mencionado por (Rodríguez & Arango, 2013)). A partir de esto, se logró concluir un rango de formación Turoniano-Aptiano con edades de 88 a 115 Ma asociadas con el arco volcánico que habría dado origen a esta formación (Rodríguez & Arango, 2013).

La Figura 20 y Figura 21 presentan un afloramiento de basalto ceolítico levemente meteorizado perteneciente a la Formación Barroso (K2-Vm), en la cual se evidencia un alto grado de diaclasamiento.



Figura 20. A) Afloramiento de Basalto ceolítico perteneciente a la Formación Barroso (K2-Vm) en la vía que comunica la cabecera municipal de Marsella con la vereda el Rayado. B) En la imagen

contraste del mismo afloramiento se presentan algunas de las líneas de diaclasamiento que afectan la unidad.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.



Figura 21. A) Afloramiento de Roca de una unidad Formación Barroso, con grado moderado de meteorización, vía que comunica la cabecera municipal con la Vereda el Rayado. B) Muestra de mano del Basalto ceolítico de la Formación Barroso.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

Es importante tener en cuenta que dentro del área de interés y en general en el municipio de Marsella la formación Barroso (K2-Vm) sólo se encuentra en forma de roca fresca o levemente meteorizada en cortes profundos de vía o cerca de las quebradas, es más común visualizar dicha unidad sobre las vías y laderas con desarrollo de un espeso suelo residual, caracterizado por tener dentro de la zona coloración rojiza, producto de la oxidación de los minerales ferromagnesianos, así como plasticidad alta, humedad variable y consistencia suave.

9.1.2 Depósitos de caída piroclástica (Q-p)

Descripción: La actividad volcánica reciente en la zona termina con la emisión de productos piroclásticos por los volcanes del Complejo Ruiz - Tolima, que son los volcanes Cerro Bravo, Nevado El Ruíz, Nevado El Cisne, Nevado Santa Isabel, Nevado El Quindío, Nevado del Tolima. Estos materiales, en parte, se depositan en medio acuoso que sirve de medio de transporte tanto hacia el este como al occidente de la Provincia Tectónica Volcánica San Diego-Cerro Machín, depositándolos a lo largo del cauce y zonas de inundación, de esta forma constituyen geoformas caracterizantes y de fácil identificación en el área (González

H. , 1996). El Límite occidental del municipio de Marsella se encuentra constituido por flujos de escombros y cenizas, que se evidencian con una topografía plana como una franja N-S, moldeando la topografía en la margen derecha del río Cauca.

Es de aclarar que los depósitos pueden considerarse primarios mientras las facies indican procesos de acumulación a partir de la caída piroclástica, corrientes de densidad piroclástica y predominancia de fragmentos piroclásticos (sean juveniles, accesorios o accidentales) que tienen su origen en una erupción volcánica. Por el contrario, si las facies del depósito indican proceso de retrabajamiento, remoción, transporte o re-sedimentación por acción gravitacional o agentes como el agua, viento o hielo, permite definirlos como depósitos volcaniclásticos secundarios, que principalmente constituyen flujos de escombros y lahares (Murcia, y otros, 2013).

Edad: La edad considerada para estos depósitos corresponde al intervalo Pleistoceno tardío - Holoceno reconocidos como vestigios de la actividad volcánica cuaternaria que se extiende hasta hoy en el Complejo Volcánico Ruiz - Tolima y se manifiesta adicionalmente, en las fuentes termales que rodean a los volcanes anteriores (González H. , 1996).

En la Figura 22 se presentan varios puntos de control litológico de la unidad Depósitos de caída piroclástica (Q-p), dicha unidad está generalmente asociados a un perfil de meteorización del suelo, en el cual se evidencian en la mayoría de los casos un horizonte A, correspondiente a la capa vegetal, infrayacida por el depósito de cenizas con textura arenosa, con clastos de pómez, pómez alterada, máficos y algunos cuarzos, de tamaño fino a muy fino, con baja esfericidad, subredondeados y con buena selección, estos depósitos presentan una coloración café amarillenta, que describe diferentes niveles de eluviación y lixiviación de óxidos de hierro, producto de la meteorización de los materiales por las aguas de percolación.

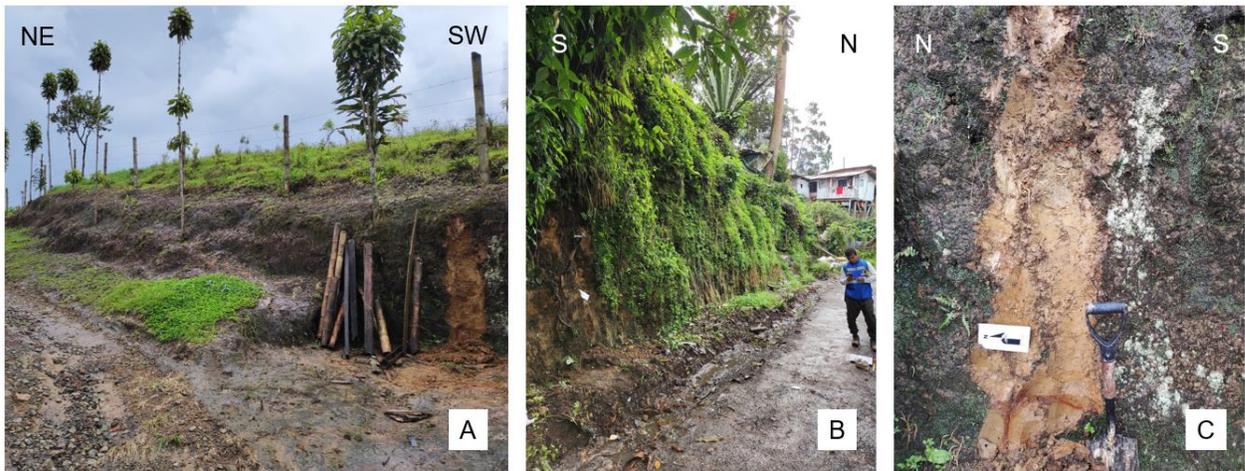


Figura 22. Afloramientos de la unidad Depósito de caída piroclástica (Q-p) en inmediaciones de la Vereda El Rayo.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

9.2 Geología Estructural

Dentro de las tendencias de fallamiento del área de interés y del municipio se presenta la NS- NNE nombrada por algunos autores como fallas satélites del Sistema de Fallas de Romeral, la cual es paralela a la cordillera de los Andes. Incluye dos fallas inferidas con esta tendencia, que fueron trazadas con ayuda de sensores remotos a partir del lineamiento de diferentes rasgos estructurales como silletas, facetas triangulares y ganchos de deflexión, ambas fallas sugieren tener un comportamiento sinistral.

A continuación, en la Figura 23 se presenta el mapa estructural resultante para el área de interés. Es de anotar que las estructuras involucradas dentro de la configuración tectónica del área han sido trazadas y corroboradas mediante interpretación fotogeológica de insumos SIG, como el DEM, las imágenes satelitales y el relieve sombreado, además de algunos rasgos identificados en las estaciones de campo, durante reconocimiento geológico, geomorfológico y estructural de la zona. También se usó como base para el trazo de estas fallas, información bibliográfica oficial como la GDB del POMCA del río Campoalegre (CARDER, 2017), la GBD del mapa geológico de Colombia (Servicio Geológico Colombiano, 2020) y algunos estudios locales que han ahondado en la geología y tectónica local (Bohórquez, 2005), (Mejía, Velandia, Zuluaga, López, & Cramer, 2012), (Toro & Osorio, 2005), entre otros.

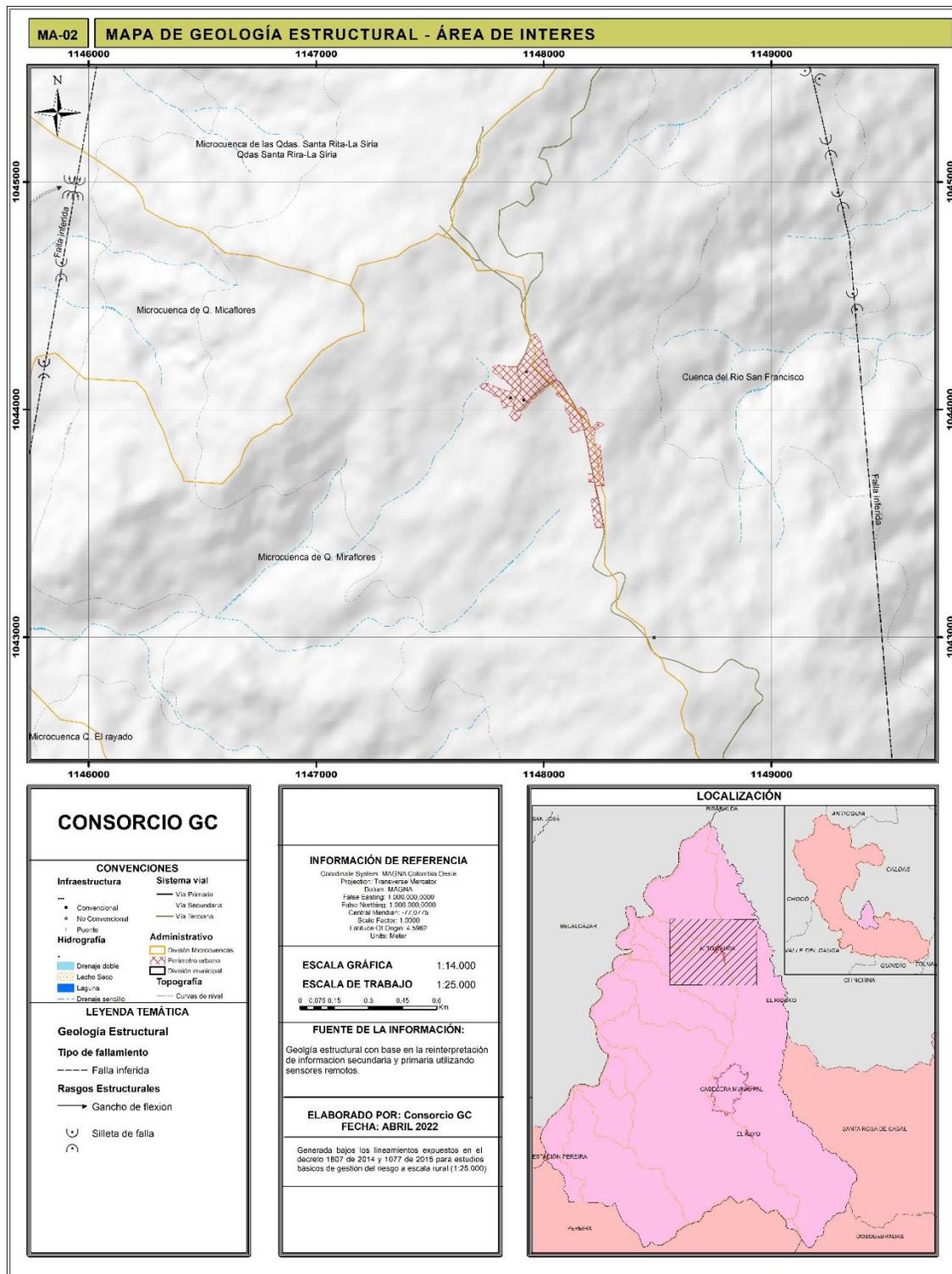


Figura 23. Mapa estructural del área de interés dentro del municipio de Marsella
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

A Continuación, se presenta la descripción de la Falla Cauca Almaguer y las fallas inferidas dentro del área de interés:

9.2.1 Falla Cauca Almaguer

Hace parte de las Fallas con tendencia NS, NNE, se encuentra en el sector E del municipio de Marsella, no cruza directamente el perímetro del área de interés, pero representa el límite tectónico de la Formación Barroso (K2-Vm), unidad que cubre el 100% del área de interés y más del 70% del área del municipio de Marsella, por lo tanto, debe tenerse en cuenta para el entendimiento del origen de las unidades geológicas y la configuración estructura de la zona.

Como se dijo anteriormente define el límite entre la Formación Barroso al W y el Complejo Arquía al E. La falla no presenta expresiones geomorfológicas claras en campo, sin embargo, en ciertas áreas se logran evidenciar rasgos de metamorfismo dinámico y valles rectilíneos (Estrada, Viana, & González, 2001) (CARDER, 2020A). Según la interpretación fotogeológica se puede determinar que dentro del área de Marsella esta falla presenta control sobre la quebrada La honda, la cual fluye como un trazo rectilíneo hacia el NNE.

9.2.2 Fallas inferidas

Se localizan dentro del municipio de Marsella varios lineamientos que siguen de manera coherente las tendencias del fallamiento regional, NS-NNE y NE. CARDER (2020A) en el POMCA del río Campoalegre propone algunos lineamientos fotogeológicos que son retomados en este informe, además explica que dichos trazos son resultado de un análisis fotogeológico de imágenes de satélites y el DEM de la zona de estudio, la información fue contrastada con lo aportado por diversos estudios adelantados en periodos anteriores como las Planchas 206 y 225 de Gonzáles en el año (2001), el Mapa geológico de Colombia, por Gómez et al., (2020), entre otros. Dentro del área de interés en este estudio, dichos lineamientos fueron considerados como fallas inferidas con posible comportamiento sinextral, basándose en a la información recolectada a partir de sensores remotos y los recorridos de campo.

9.2.2.1 Fallas inferidas en sentido NNW-NNE

Dentro del análisis fotogeológico y tras la interpretación de los datos tomados en campo se determinan dentro del municipio de Marsella dos lineamientos que pueden llegar a considerarse como fallas probables, teniendo en cuenta su influencia sobre el relieve. Tienen tendencia predominante NNW y NNE, su génesis podría estar relacionada con configuraciones transpresivas asociadas con el sistema de Falla Romeral, esto debido a su continuidad y las expresiones

fisiográficas marcadas por relieves montañosos alineados, cambios altimétricos, ganchos de flexión y aparentes facetas triangulares sobre el flanco occidental de la Cordillera Central que limita con el río Cauca (CARDER, 2020). Este sistema presenta un estado de esfuerzos con componente transpresional generando fallamiento inverso (Cediell, y otros, 2019). Su tectónica activa presenta relaciones estructurales complejas en las unidades que afecta o atraviesa en el recorrido (González H. , 2001). Tienen unas geoformas evidentes desde el modelo de elevación digital DEM y las fotografías aéreas, además en algunas visitas de campo se han visto asociadas a ganchos de flexión de las laderas, drenajes deflectados, drenajes rectos y quiebres de pendientes como silletas y hombreras de falla. Estos lineamientos podrían incidir en la inestabilidad de las laderas y podrían mostrar grados de fracturamiento o deformación en las unidades que atraviesan (CARDER, 2020).

9.3 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Se denomina Formación Superficial al conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno, hasta profundidades del orden de decenas de metros; éstas incluyen rocas con diferentes grados de meteorización, suelos y depósitos inconsolidados. Se consideran como formaciones correlativas de los procesos morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre, Hermelín (1987. Citado en CARDER (2020A)).

La compilación de toda la información bibliográfica permitió consolidar un mapa de UGS para el área de interés dentro del municipio de Marsella, siendo un insumo representativo sobre cómo se encuentran distribuidas las unidades, sus características e indicios de susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción en masa. Este mapa fue ajustado a partir de la información obtenida en campo durante el control y muestreo geotécnico realizado para los centros poblados del municipio y el proceso de fotointerpretación de modelos de elevación digital del terreno y fotografías satelitales que permitieron un mayor grado de precisión y concordancia de estas unidades respecto a la zona de estudio (Figura 24).

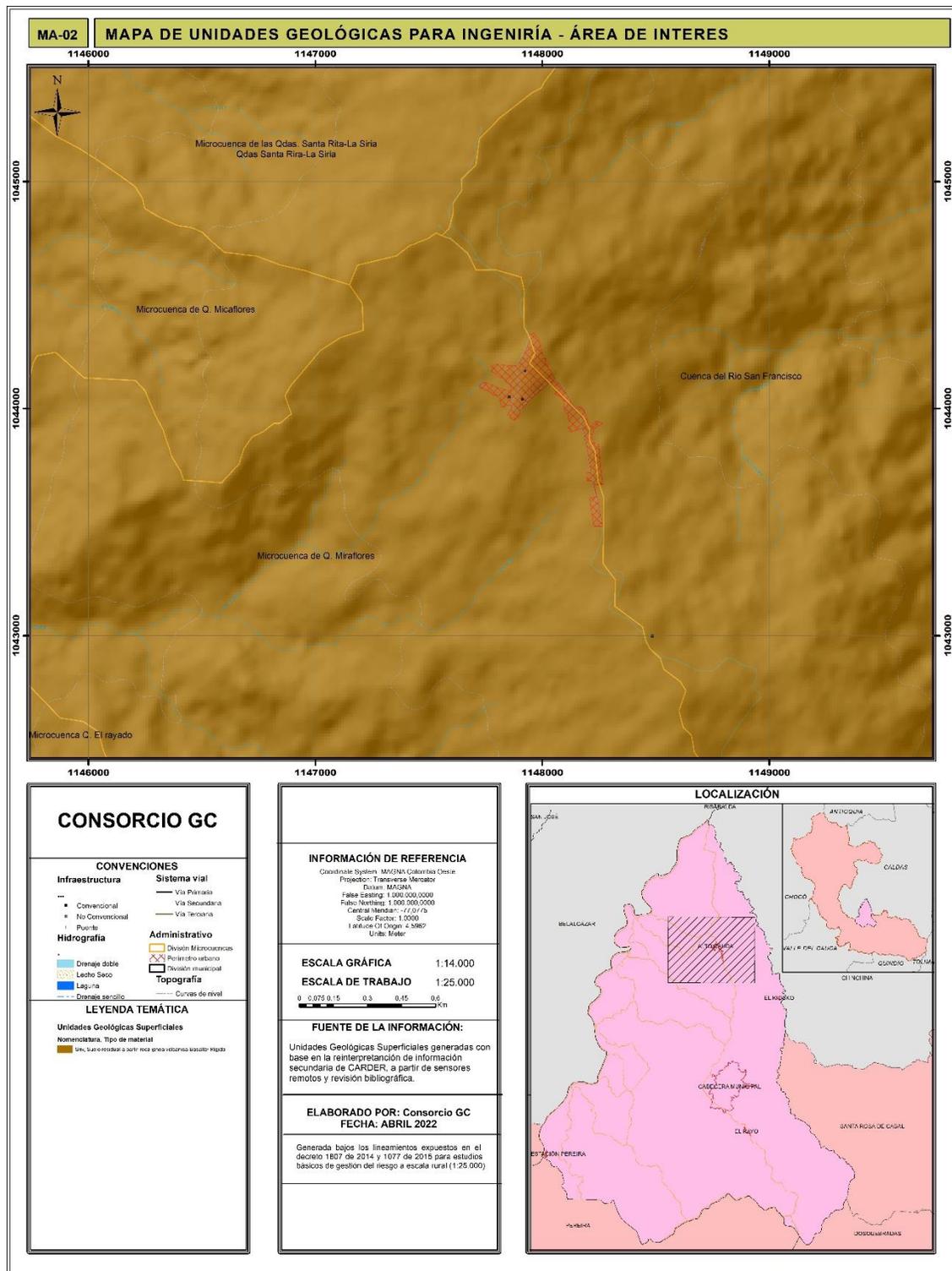


Figura 24. Unidades geológicas superficiales del área de interés dentro del municipio de Marsella.
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

A continuación, se describen las Unidades Geológicas superficiales aflorantes dentro del área de interés.

9.3.1 Suelo residual a partir de roca ígnea volcánica Basalto /Rígido (Formación Barroso) (Sriv)

Denominada por CARDER (2020A) como Suelo residual volcánico de la Formación Barroso (Srii2), ocupa el 100% de la zona de estudio y se asocia con diabasas, basaltos, espilitas, lavas almohadilladas, tobas, brechas y aglomerados, que ocasionalmente presenta lentes irregulares de chert y sedimentitas silíceas (González , 1993).

Dentro del área de interés y en general en el municipio de Marsella predominan los afloramientos de suelo residual de los basaltos zeolíticos, generalmente son de color rojizo y textura arcillosa, en relación respectivamente con minerales ferromagnesianos y alto porcentaje de plagioclasa cálcica, dando lugar a perfiles de meteorización profundos, variable según el sector pero que puede alcanzar máximos entre 15 y 25 metros (CARDER, 2020B).

Por otra parte, se infiere una gran variabilidad físico-mecánica ya que hay evidencias de diferentes grados de alteración, presentando tonalidades amarillas, cafés y rojizas, así como remanentes de roca (CARDER, 2020A).

Según los resultados de laboratorio y la clasificación SUCS de este material, dispuestos en el informe realizado por CARDER (2020A) corresponden con arenas limosas de alta compresibilidad (SM) y (MH); La densidad húmeda registra promedios de 1,35 gr/cm³; el índice de plasticidad es de 35,88% y la humedad natural presenta un valor de 74,15%.

En la Figura 25 se presenta un afloramiento característico del suelo residual derivado de la Formación Barroso, localizado sobre la vía, en la entrada de la cabecera municipal de Marsella, Risaralda.



Figura 25. Afloramiento de la unidad geológica superficial: Suelo residual a partir de la Formación Barroso (Sriv)

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

9.3.2 Suelo transportado volcánico de ceniza (Stv/c)

Denominados por CARDER (2020A) como Depósitos de ceniza volcánica (Stv1), se asocian a la cubierta del basamento volcánico de la zona. Estadísticamente corresponden a la unidad más extensa dentro de la distribución de unidades del municipio, se encuentra moldeando la topografía sin presentar espesores considerables. En los drenajes debido a su fácil erodabilidad no hay un contraste muy marcado respecto a las unidades de carácter fluvial, normalmente la unidad se presenta en relieves colinados tomando un papel importante sobre la morfología del terreno.

Mejía, H. (2009. Citado en CARDER (2020A)), indica que los espesores varían hasta un máximo de 10 metros, su coloración depende del grado de alteración entre amarillo, crema, naranja y gris. Su depositación sigue de forma paralela los rasgos geomorfológicos preexistentes. Estos materiales presentan un comportamiento en seco sueltas a ligeramente duras, su adherencia en mojado es plástica y con cristales visibles en la fracción arena de plagioclasas, ferromagnesianos y algo de cuarzo en proporción <15% con respecto a la matriz.

Normalmente estos depósitos tienden a presentar una estructura masiva, estado húmedo, color pardo amarillento a pardo oscuro, textura arenosa, granulometría fina, forma de los granos sub-redondeados, meteorización baja, bien seleccionado, ligeramente plástico y consistencia media a alta. Compuesto mineralógicamente por minerales máficos, cuarzo y pómez (Figura 26).

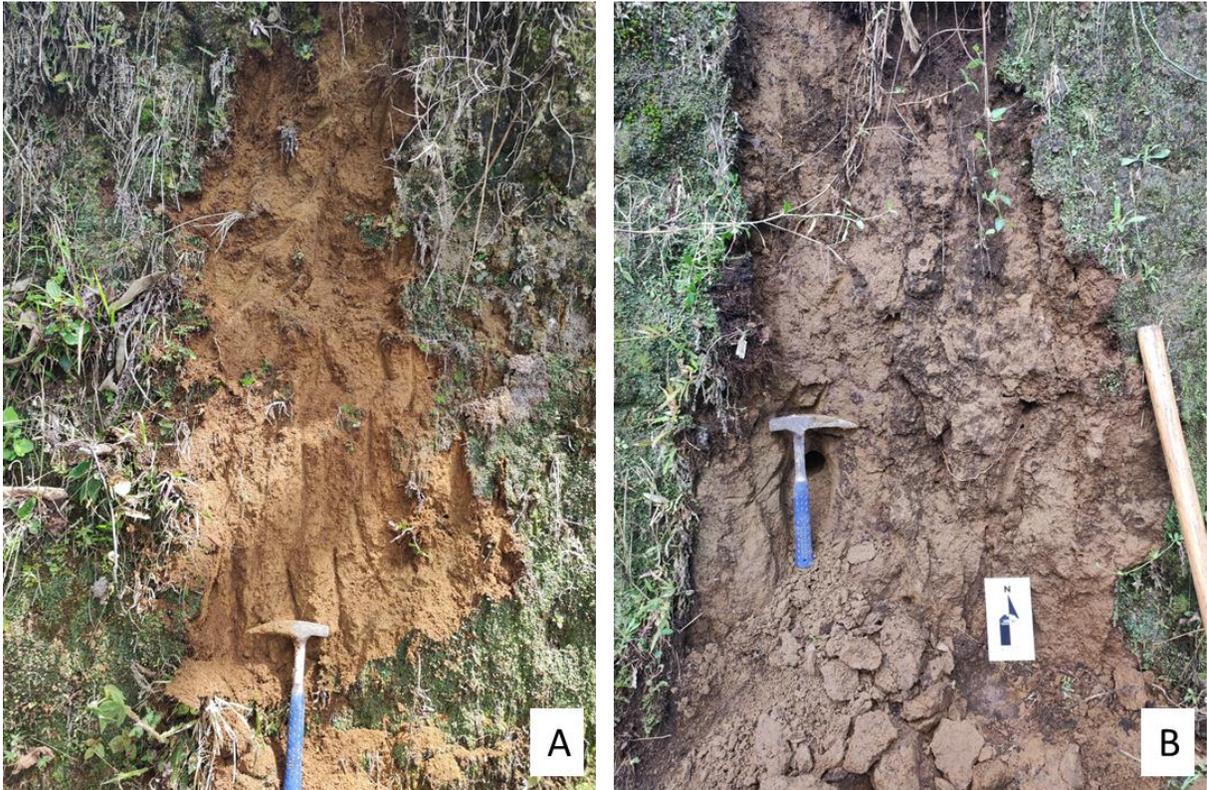


Figura 26. A) Depósito de ceniza pardo amarillento, Centro poblado Alto Cauca B) Depósito de cenizas pardo oscuro, Centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10 CENTRO POBLADO ALTO CAUCA

El centro poblado de Alto Cauca jurisdicción de municipio de Marsella está ubicado a cerca de 6 kilómetros en línea recta desde la cabecera municipal, justo en la divisoria de aguas que separa la cuenca del río San Francisco y la microcuenca de la quebrada Mica-Miraflores, cuenta con un área aproximada de 86,6 Hectáreas y se encuentra ubicado a 1488 metros sobre el nivel del mar (CARDER, 2020) (Figura 27).

La Figura 28 muestra el ortomosaico generado a partir de fotografías aéreas tomadas con dron del centro poblado Alto Cauca, este insumo fue de vital importancia para la obtención de información SIG como el mapa de pendientes y de relieve relativo.

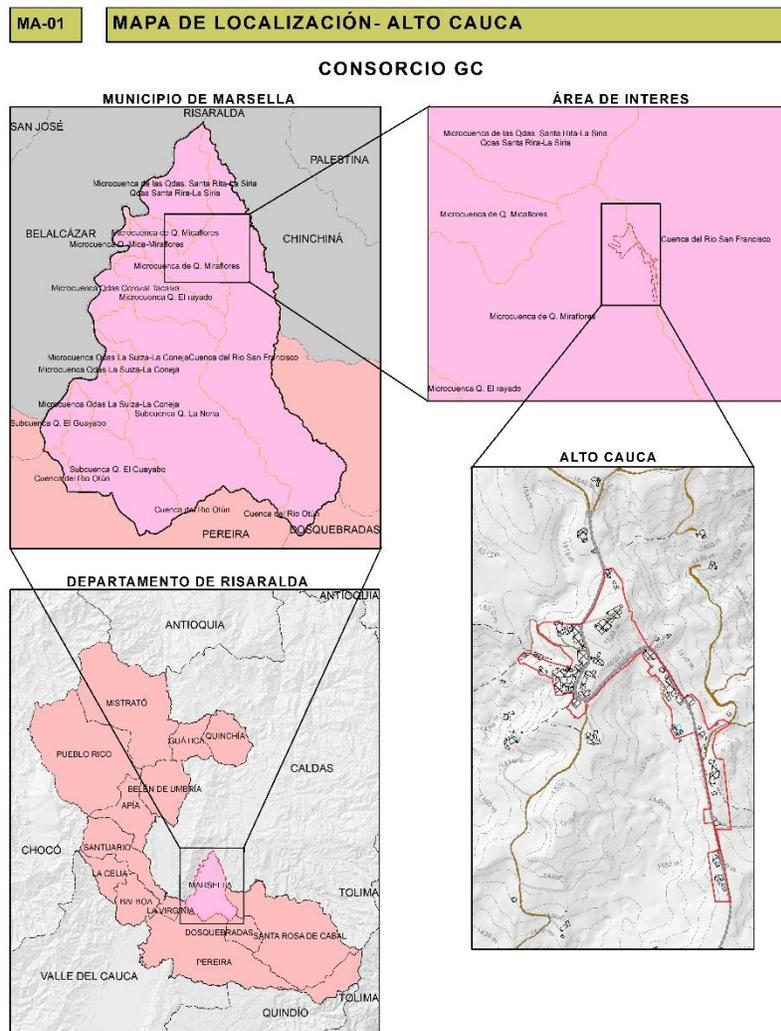


Figura 27 Localización del centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

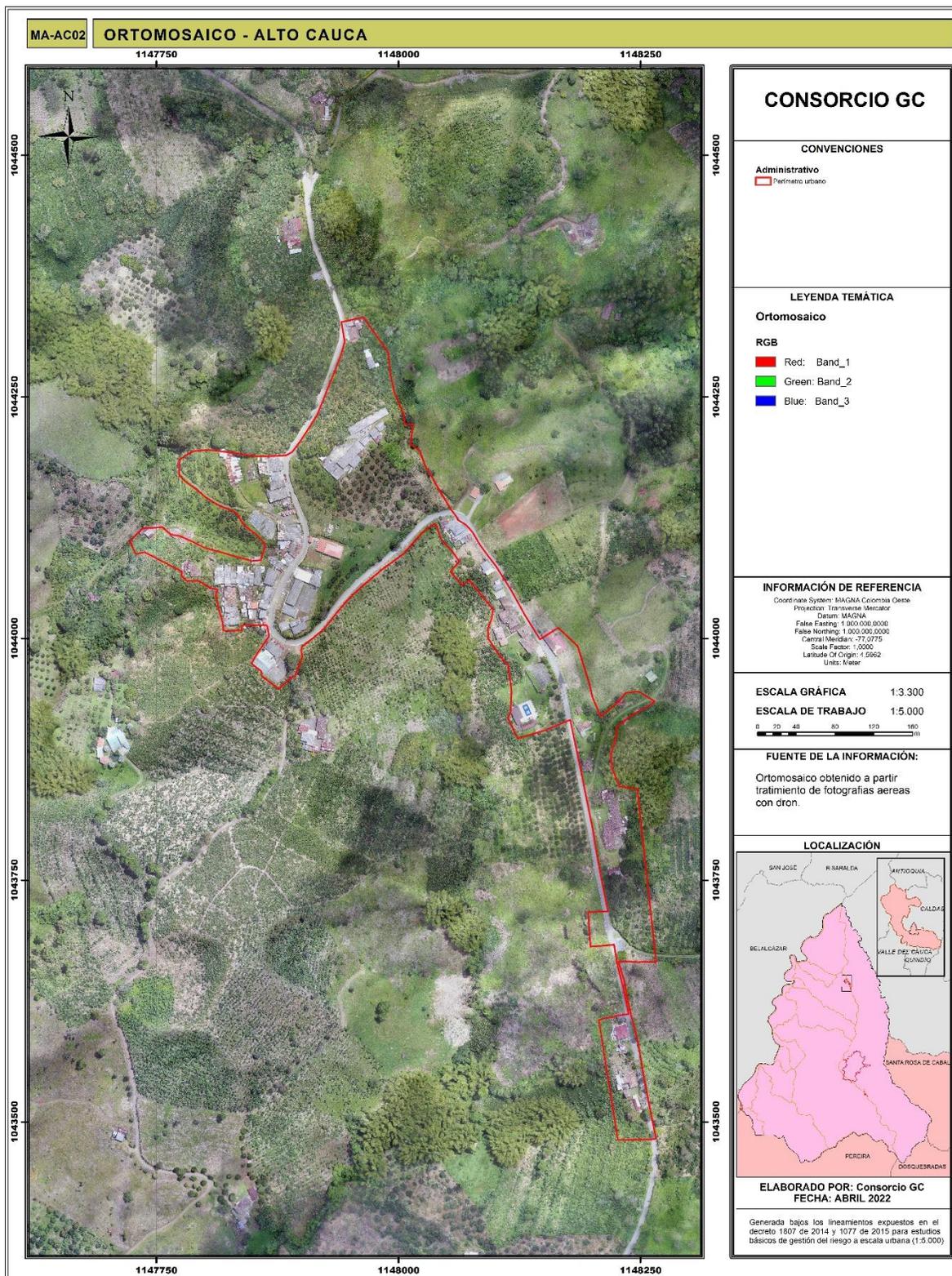


Figura 28. Ortomosaico del centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.1 Inventario de Procesos Morfodinámicos

Este inventario abarca los movimientos en masa que han sido identificados mediante la interpretación y procesamiento de sensores remotos, de fuente propia y que posteriormente han sido verificados mediante criterios geomorfológicos observados durante el levantamiento de campo, se elaboró considerando imágenes satelitales y algunas aerofotografías de fuente propia, lo que permitió verificar parte del catálogo e inventario de información secundaria del área de estudio.

Para el centro poblado Alto Cauca, se presenta un total de 12 procesos morfodinámicos de tipo Denudacional, siendo los deslizamientos los de mayor cantidad con 9 procesos, equivalente al 5%, seguido de los procesos erosivos como es la erosión laminar con 2 procesos (Tabla 19), en la Figura 29 se presenta el mapa de procesos morfodinámicos para este centro poblado.

Procesos morfodinámicos	# IPM	% de IPM	Área
Procesos Denudativos			
Deslizamiento	9	75	6,61
Subsidencia	1	8,3	1,88
Caída	1	8,3	0,01
Reptación	1	8,3	0,08
Total	12	100	8,59
Procesos Erosivos			
Erosión 1 (laminar)	2	67	0,22
Erosión 2 (sobrepastoreo)	1	33	0,05
Total	3	100	0,275

Tabla 19. IPM para el centro poblado Alto Cauca

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

El centro poblado Alto Cauca tiene un área total de 86,6 hectáreas, de la cual los procesos morfodinámicos ocupan solo un 10,2% del área con aproximadamente 8,86 hectáreas, estos procesos tienen un área no superior a las 3 hectáreas y el promedio en tamaño en su mayoría está entre 0,02 hasta 0,09 hectáreas. Los procesos morfodinámicos más grandes tienen un área de 2,8 y 1,88 hectáreas correspondientes a deslizamientos.

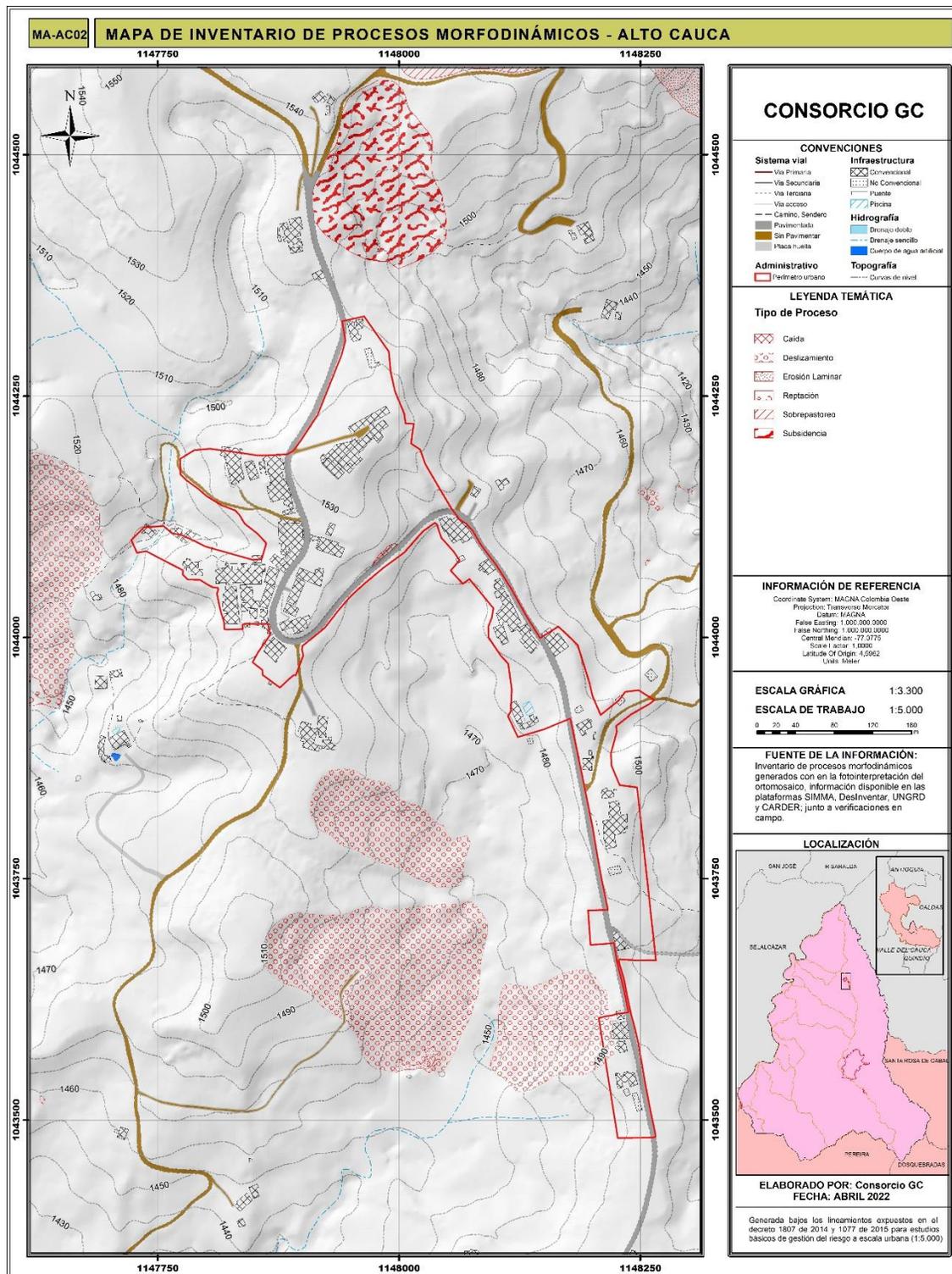


Figura 29. Mapa de Inventario de procesos morfodinámicos para el Centro Poblado Alto Cauca
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2 Geología Local

El centro poblado Alto Cauca está compuesto litológicamente por dos unidades que son la Formación Barroso y depósitos de ceniza que yacen sobre la formación Barroso, de estas dos unidades geológicas se derivan las dos Unidades Superficiales para Ingeniería (UGI) representativas de la zona, estructuralmente hablando no se presentan patrones de deformación o afectación de fallas a nivel del centro poblado en cuestión.

10.2.1 Unidades Cartográficas

A continuación en la Figura 30 se presenta el mapa de geología para el centro poblado, posteriormente se hace la descripción de cada una de las unidades litológicas encontradas en la zona de estudio, según los datos recopilados de la información secundaria perteneciente a estudios anteriores como (Mejía, M, 1986)), (Bohórquez, 2005) y (CARDER, 2020A) y lo observado en las visitas de campo, en donde fueron recolectadas las muestras de acuerdo con los puntos de control que se listan y describen en la Tabla 20.

10.2.1.1 Formación Barroso (K2-Vm)

Rocas máficas y ultramáficas del complejo volcánico lávico y vulcano-clástico de composición básica, compuesto esencialmente por diabasas, basaltos, y en menor proporción espilitas con intercalaciones de lavas almohadilladas, tobas, brechas y aglomerados ocasionalmente con lentes irregulares de chert y sedimentitas silíceas González (1990. Citado por (CARDER, 2020A)), cuyo suelo residual de carácter laterítico, presenta variación textural, entre limo-arcilloso hasta limo-arenoso.

La Formación Barroso puede encontrarse casi que en su totalidad en el municipio de Marsella sobre el área de la Subcuenca del río San Francisco, aflorando generalmente como el basamento de las demás unidades presentes, salvo donde se emplazaron rocas intrusivas, consistente de pórfidos andesíticos. En general, se encuentran suprayacidos por cenizas volcánicas con espesores entre 5 y 10 metros (CARDER, 2020A). En el centro poblado cubre un área de 46,23 Ha que estadísticamente representan el 53,4% del total del área de estudio.

En campo se observó el perfil totalmente meteorizado de la formación en cuestión, se clasificó como grado 5 según Dearman (1974), se observaron estructuras heredadas (zonas de diaclasamiento), la composición del suelo constaba únicamente de arcillas con tonalidades rojizas (Figura 31).



Figura 31. Perfil meteorizado de la Formación Barroso.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

10.2.1.2 Depósitos de ceniza (Q-p)

Bajo esta denominación se agrupan los materiales acumulados como resultado de la actividad volcánica explosiva y constituidos por cenizas y lapilli (CARDER, 2020A). INGEOMINAS (1996) en su estudio: Zonificación de amenazas geológicas para los municipios del eje cafetero afectados por el sismo del 25 de enero de 1999, indica una granulometría de las cenizas volcánicas meteorizadas como arenas limo arcillosas, limos areno arcillosos y arcillas limo arenosas, de consistencia blanda a muy firmes, húmedas a totalmente saturadas, que se presentan en capas y estratos de 5,0 a 1,5 m de espesor.

Con predominio en el área, se encuentran cubriendo las rocas volcánicas meteorizadas pertenecientes a las lavas e ignimbritas andesíticas y el Complejo Arquía. (CARDER, 2020A).

En campo se observaron depósitos de ceniza con textura arenosa, con clastos de pómez, pómez alterada, máficos y algunos cuarzos, de tamaño fino a muy fino, con baja esfericidad, subredondeados y con buena selección, presentaban una coloración café amarillenta (Figura 32). En el centro poblado cubren un área de 35,2 Ha que estadísticamente representan el 40,6% del total del área de estudio.



Figura 32. Depósitos de ceniza aflorantes en el centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2.1.3 Depósitos Coluviales (Q-ca)

Se asocian a los depósitos generados por los movimientos en masa presentes en el centro poblado. Cubren cerca de 5,17 Ha que estadísticamente representan el 6% del total del área estudiada.

10.2.2 Columna cronoestratigráfica

En inmediaciones de la estación M-AC-Geot04 se observaron los depósitos de ceniza dispuestos sobre el suelo residual de la formación Barroso, La Figura 33 muestra la columna representativa para el centro poblado Alto Cauca.

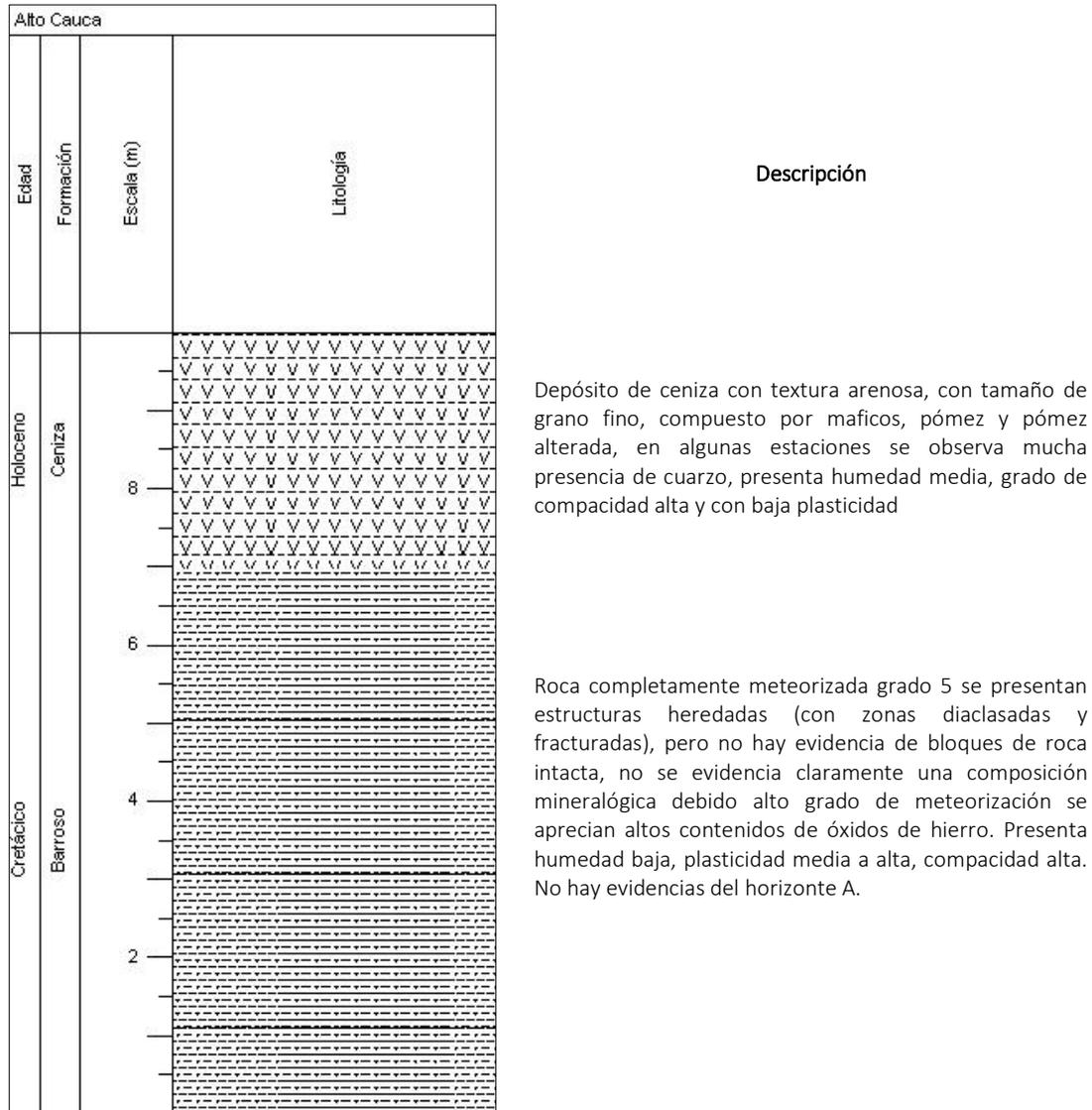


Figura 33. Columna representativa del centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

10.2.3 Geología Estructural Local

Estructuralmente basándose en la información recolectada en campo y el análisis tanto de fotografías aéreas como DEM de una muy buena resolución, no se lograron establecer patrones deformativos en el área de influencia perteneciente al centro poblado Alto Cauca.

10.2.4 Unidades Geológicas Superficiales para Ingeniería (UGI)

Para el levantamiento de las UGI se realizaron visitas de campo con el fin de realizar controles de las unidades de suelo aflorante en el centro poblado, además de efectuar las respectivas tomas de muestras para posteriormente enviarlas al laboratorio con el propósito de obtener las propiedades geomecánicas de cada unidad de suelo.

10.2.4.1 Muestreo Geotécnico

La Tabla 20 contiene la localización de las estaciones de muestreo para el centro poblado, mientras que desde la Tabla 21 hasta la Tabla 30 muestran la descripción de cada una de ellas junto a sus resultados de laboratorio.

Localización de estaciones					
Nomenclatura	Coordenada X	Coordenada Y	Altura (msnm)	Descripción	Registro Fotográfico
M-AC.Geot 01	1044442	1147910	1516	Muestra de suelo alterado, perteneciente a cenizas volcánicas, ubicada a las afueras del centro poblado exactamente hacia el norte del mismo.	
M-AC.Geot 02	1044465	1148164	1488	Muestra de suelo alterado, perteneciente a cenizas volcánicas, ubicada a las afueras del centro poblado exactamente hacia el norte del mismo.	

Localización de estaciones					
Nomenclatura	Coordenada X	Coordenada Y	Altura (msnm)	Descripción	Registro Fotográfico
M-AC.Geot 03	1044263	1147931	1519	Muestra de suelo alterado e inalterado (Shelby), perteneciente a cenizas volcánicas, ubicada dentro del centro poblado exactamente en la parte norte del mismo.	
M-AC.Geot 04	1044104	1148097	1490	Muestra de suelo alterado e inalterado (Shelby), perteneciente al suelo residual a partir de la formación Barroso, ubicada dentro del centro poblado exactamente en el flanco este del mismo.	
M-AC.Geot 05	1043539	1148248	1487	Muestra de suelo alterado, perteneciente a cenizas volcánicas, ubicada dentro del centro poblado exactamente en la parte sur del mismo.	

Tabla 20. Localización de las estaciones del centro poblado Alto Cauca – Marsella.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- Estación M-AC-Geot-01

En la Tabla 21 y Tabla 22 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para este punto de muestreo.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO			ESTACIÓN M-AC-GEOT-01		
Proyecto:	FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA	Elevación:	1517 msnm		
Centro poblado:	Alto Cauca	Tipo de afloramiento:	Corte superficial de vía		
Norte:	1044442	Dimensiones:	2,20 m x 1 m		
Este:	1147910	Fecha:	12	Mayo	2022
Registro fotográfico			Resultados de laboratorio		
			Granulometría		
			Gravas %	0,4	
			Arenas %	74,6	
			Finos %	26	
			Límites de Atterberg		
			Límite Líquido LL %	65	
			Límite Plástico LP %	56,8	
			Índice de Plasticidad IP %	8,3	
			Clasificación SUCS	SM	
			Propiedades físicas del suelo		
Humedad (%w)	65,3				
Cohesión C	NA				
Fricción (Grados)	NA				

Tabla 21. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-01.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO				ESTACIÓN M-AC-GEOT-01													
Columna representativa	Descripción litológica	Muestra															
		Número	Tipo	Recuperación	Nivel freático												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Columna Representativa</th> </tr> <tr> <th>Edad</th> <th>Formación</th> <th>Escala (m)</th> <th>Litología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Holoceno</td> <td>Cenizas</td> <td>1</td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Columna Representativa				Edad	Formación	Escala (m)	Litología	Holoceno	Cenizas	1		<p>Depósitos de ceniza con textura arenosa, con tamaño de grano fino, compuesto por maficos, pómez y pómez alterada, en esta estación no se observa mucha presencia de cuarzo, presenta humedad media, grado de compacidad alta y con baja plasticidad; La muestra alterada fue tomada a 1,90 metros de profundidad. No hay evidencias del horizonte A.</p>	1	Suelo Alterado	100%	No
Columna Representativa																	
Edad	Formación	Escala (m)	Litología														
Holoceno	Cenizas	1															

Tabla 22. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-01.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- Estación M-AC-Geot-02

En la Tabla 23 y Tabla 24 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para este punto de muestreo.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO			ESTACIÓN M-AC-GEOT-02				
Proyecto:	FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA	Elevación:	1488 msnm				
Centro poblado:	Alto Cauca	Tipo de afloramiento:	Cultivo				
Norte:	1044465	Dimensiones :	2,30 m x 1,5 m				
Este:	1148164	Fecha:	15	Mayo	2022		
Registro fotográfico			Resultados de laboratorio				
			Granulometría				
			Gravas %	1,8			
			Arenas %	78,1			
			Finos %	19,9			
			Límites de Atterberg				
			Límite Líquido LL %	NA			
			Límite Plástico LP %	NA			
			Índice de Plasticidad IP %	NA			
			Clasificación SUCS	SM			
			Propiedades físicas del suelo				
			Humedad (%w)	105,4			
			Cohesión C	NA			
Fricción (Grados)	NA						

Tabla 23.. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-02.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO		ESTACIÓN M-AC-GEOT-02															
columna representativa	Descripción litológica	Muestra															
		Número	Tipo	Recuperación	Nivel freático												
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Columna Representativa</th> </tr> <tr> <th>Edad</th> <th>Formación</th> <th>Escala (m)</th> <th>Litología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Holoceno</td> <td>Cenizas</td> <td>1</td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Columna Representativa				Edad	Formación	Escala (m)	Litología	Holoceno	Cenizas	1		<p>Depósitos de ceniza con textura arenosa, con tamaño de grano fino, compuesto por maficos, pómez y pómez alterada, en esta estación no se observa mucha presencia de cuarzo, presenta humedad media, grado de compactación alta y con baja plasticidad; La muestra alterada fue tomada a 1,50 metros de profundidad. No hay evidencias del horizonte A.</p>	2	Suelo Alterado	100%	No
Columna Representativa																	
Edad	Formación	Escala (m)	Litología														
Holoceno	Cenizas	1															

Tabla 24. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-02.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- Estación M-AC-Geot-03

En la Tabla 25 y Tabla 26 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para este punto de muestreo.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO			ESTACIÓN M-AC-GEOT-03		
Proyecto:	FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA	Elevación:	1520 msnm		
Centro poblado:	Alto Cauca	Tipo de afloramiento:	Corte vial		
Norte:	1044263	Dimensiones:	1,90 m x 1,50 m		
Este:	1147931	Fecha:	15	Mayo	2022
Registro fotográfico			Resultados de laboratorio		
			Granulometría		
			Gravas %	0	
			Arenas %	79	
			Finos %	21	
			Límites de Atterberg		
			Límite Líquido LL %	NA	
			Límite Plástico LP %	NA	
			Índice de Plasticidad IP %	NA	
			Clasificación SUCS	SM	
			Propiedades físicas del suelo		
Humedad (%w)	79,5				
Cohesión C	0,34 (Kg/cm ²)				
Fricción (Grados)	32,58				

Tabla 25. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-03.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO		ESTACIÓN M-AC-GEOT-03															
columna representativa	Descripción litológica	Muestra															
		Número	Tipo	Recuperación	Nivel freático												
<table border="1"> <caption>Columna Representativa</caption> <thead> <tr> <th>Edad</th> <th>Formación</th> <th>Escala (m)</th> <th>Litología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cuaternario</td> <td>Horizonte A</td> <td></td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Holoceno</td> <td>Cenizas</td> <td>1</td> <td style="background-image: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px);"></td> </tr> </tbody> </table>	Edad	Formación	Escala (m)	Litología	Cuaternario	Horizonte A			Holoceno	Cenizas	1		<p>Depósitos de ceniza de 1,40 metros de espesor con textura arenosa, con tamaño de grano fino, compuesto por maficos, pómez y pómez alterada, en esta estación se observa presencia considerable de cuarzo, presenta humedad media, grado de compactad media-alta y con baja plasticidad; La muestra alterada fue tomada a 1,50 metros de profundidad, al igual que la muestra inalterada tipo Shelby. Se apreció el horizonte A con un espesor de 0,5 metros.</p>	3	Suelo Alterado y Tipo Shelby	100%	No
Edad	Formación	Escala (m)	Litología														
Cuaternario	Horizonte A																
Holoceno	Cenizas	1															

Tabla 26. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-03.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- Estación M-AC-Geot-04

En la Tabla 27 y Tabla 28 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para este punto de muestreo.

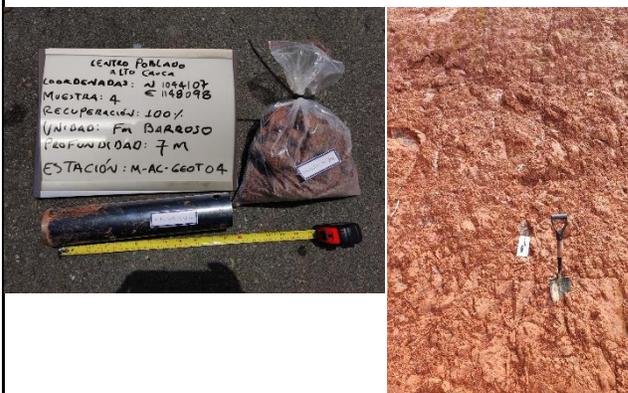
REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO			ESTACIÓN M-AC-GEOT-04		
Proyecto:	FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA	Elevación:	1490 msnm		
Centro poblado:	Alto Cauca	Tipo de afloramiento:	Zona de extracción de material		
Norte:	1044104	Dimensiones :	10 m x 6 m		
Este:	1148097	Fecha:	15	Mayo	2022
Registro fotográfico			Resultados de laboratorio		
			Granulometría		
			Gravas %	4,3	
			Arenas %	51,5	
			Finos %	44,2	
			Límites de Atterberg		
			Límite Líquido LL %	65,8	
			Límite Plástico LP %	57,7	
			Índice de Plasticidad IP %	8,2	
			Clasificación SUCS	SM	
			Propiedades físicas del suelo		
Humedad (%w)	60,7				
Cohesión C	0,56 (Kg/cm ²)				
Fricción (Grados)	23,94				

Tabla 27. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-04.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

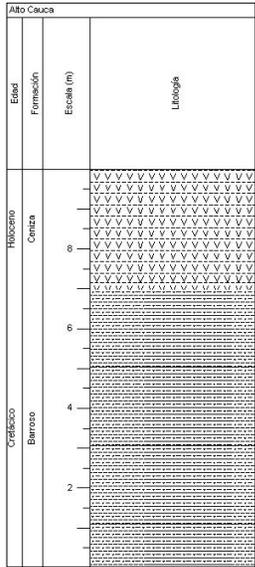
REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO		ESTACIÓN M-AC-GEOT-04			
columna representativa	Descripción litológica	Muestra			
		Número	Tipo	Recuperación	Nivel freático
	<p>Roca completamente meteorizada grado 5, con textura arcillosa, se presentan estructuras heredadas (con zonas diaclasadas y fracturadas), pero no hay evidencia de bloques de roca intacta, no se evidencia claramente una composición mineralógica debido alto grado de meteorización, se aprecian altos contenidos de óxidos de hierro. Presenta humedad baja, plasticidad media a alta, compacidad alta. La muestra de suelo alterado y la de suelo inalterado tipo Shelby se tomaron una profundidad de 7 metros. No hay evidencias del horizonte A. En esta zona aflora la columna representativa para el centro poblado.</p>	4	Suelo alterado y tipo Shelby	100%	No

Tabla 28. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-04.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- Estación M-AC-Geot-05

En la Tabla 29 y Tabla 30 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para este punto de muestreo.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO			ESTACIÓN M-AC-GEOT-05		
Proyecto:	FORTALECIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN PARA EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LOS MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE RISARALDA	Elevación:	1491 msnm		
Centro poblado:	Alto Cauca	Tipo de afloramiento:	Corte vial		
Norte:	1043539	Dimensiones:	1,70 m x 1 m		
Este:	1148248	Fecha:	15	Mayo	2022
Registro fotográfico			Resultados de laboratorio		
			Granulometría		
			Gravas %	0	
			Arenas %	73,8	
			Finos %	26,3	
			Límites de Atterberg		
			Límite Líquido LL %	NA	
			Límite Plástico LP %	NA	
			Índice de Plasticidad IP %	NA	
			Clasificación SUCS	SM	
			Propiedades físicas del suelo		
Humedad (%w)	93,5				
Cohesión C	NA				
Fricción (Grados)	NA				

Tabla 29. Registro litológico y muestreo geotécnico estación M-AC-Geot-05.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

REGISTRO LITOLÓGICO Y MUESTREO GEOTÉCNICO				ESTACIÓN M-AC-GEOT-05																	
columna representativa	Descripción litológica	Muestra																			
		Número	Tipo	Recuperación	Nivel freático																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Columna Representativa</th> </tr> <tr> <th>Edad</th> <th>Formación</th> <th>Escala (m)</th> <th>Litología</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cuaternario</td> <td>Horizonte A</td> <td>1</td> <td style="background-color: black;"></td> </tr> <tr> <td>Holoceno</td> <td>Cenizas</td> <td></td> <td style="background-image: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px);"></td> </tr> </tbody> </table>	Columna Representativa				Edad	Formación	Escala (m)	Litología	Cuaternario	Horizonte A	1		Holoceno	Cenizas			<p>Depósitos de ceniza de 0,9 metros de espesor con textura arenosa, con tamaño de grano fino, compuesto por maficos, pómez y pómez alterada, en esta estación no se observa presencia considerable de cuarzo, presenta humedad media, grado de compactación media-alta y con baja plasticidad; La muestra alterada fue tomada a 1,50 metros de profundidad. Se apreció el horizonte A con un espesor de 0,80 metros.</p>	5	Suelo Alterado	100%	No
Columna Representativa																					
Edad	Formación	Escala (m)	Litología																		
Cuaternario	Horizonte A	1																			
Holoceno	Cenizas																				

Tabla 30. Caracterización del perfil de meteorización M-AC-Geot-05.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2.4.2 Unidades de suelo

A continuación, se presenta la descripción de las Unidades Geológicas para Ingeniería cartografiadas para el centro poblado Alto Cauca y sus inmediaciones, además, se entregan las evidencias fotográficas de los puntos de control litológico.

La Figura 34 presenta el mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería correspondiente al centro poblado Alto Cauca.

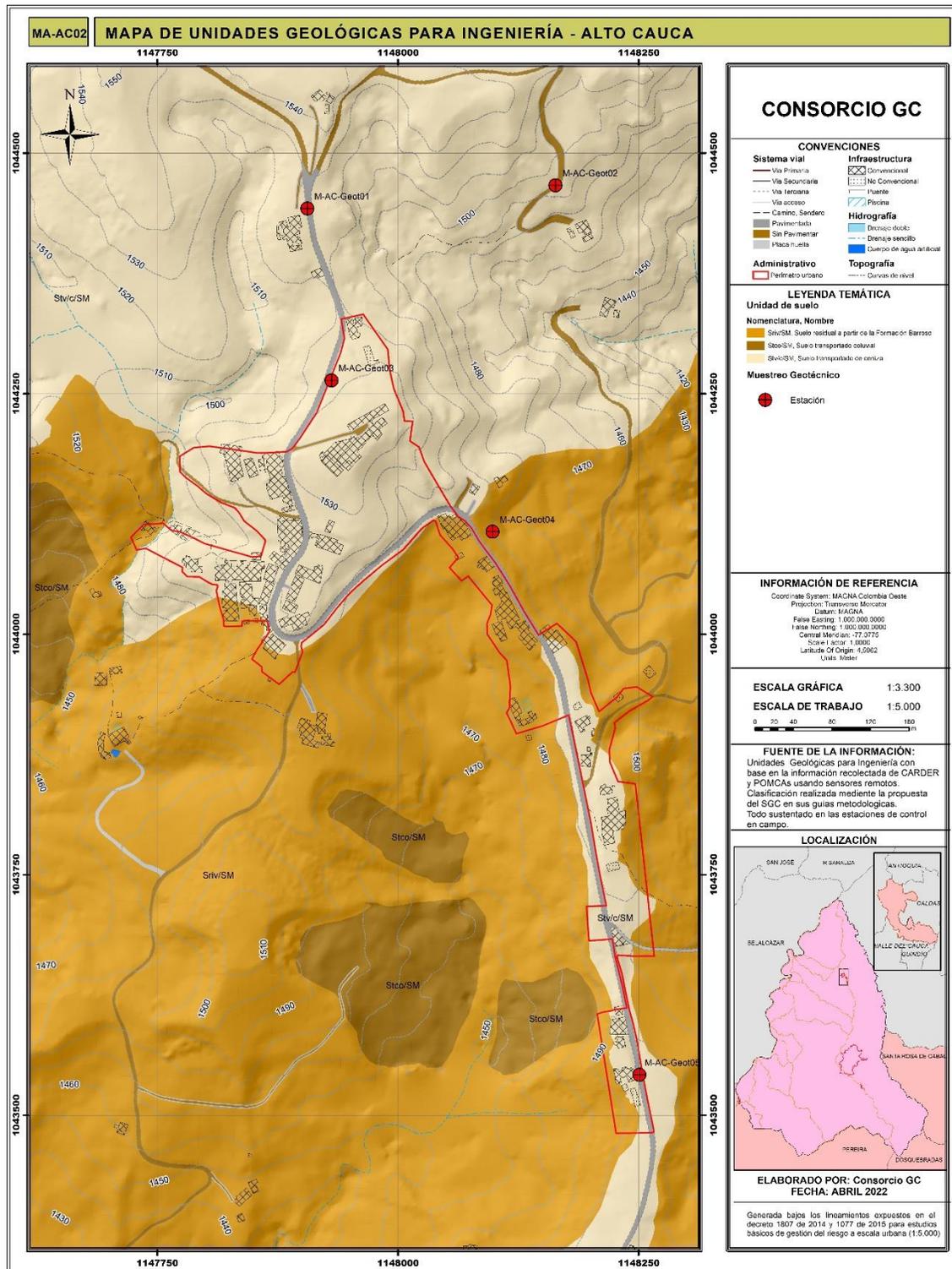


Figura 34. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería del centro poblado Alto Cauca. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2.4.2.1 Suelo transportado de ceniza (Stv/c/SM)

Denominados por CARDER (2020A) como Depósitos de ceniza volcánica (Stv1), se asocian a la cubierta del basamento volcánico y los flujos de lodo de la zona. No se encuentran espesores considerables en los drenajes debido a su fácil erodabilidad, en contraste se encuentran en su mayor expresión en los relieves colinados, que permiten su conservación y acumulación continua en el tiempo, tomando un papel importante la morfología del terreno.

Mejía, H. (2009. Citado en CARDER (2020A)), indica que los espesores varían hasta un máximo de 10 metros, su coloración depende del grado de alteración entre amarillo, crema, naranja y gris. Su depositación sigue de forma paralela los rasgos geomorfológicos preexistentes. Estos materiales presentan un comportamiento en seco sueltos a ligeramente duros, su adherencia en mojado es plástica y con cristales visibles en la fracción arena de plagioclasas, ferromagnesianos y algo de cuarzo en proporción <15% con respecto a la matriz.

Están dispuestos sobre la parte norte y un poco al sur del área del centro poblado, fueron observados en afloramientos en cortes viales, presentando tonalidad cafés y amarillentas (*Figura 35*), por lo general están compuestos por pómez, pómez alterada, minerales máficos y las cantidades de cuarzo varían dependiendo del sector, presenta textura arenosa, su plasticidad varía de moderada a baja su grado de compacidad es alta, su humedad varía entre moderada y alta, para este suelo se obtuvo un resultado granulométrico (SM) según la clasificación de SUCS.

Este suelo transportado de cenizas ocupa 35,2 Ha que representa el 40,6% del área total de estudio. De estos depósitos se tomaron muestras de suelo alterado en todas las estaciones aflorantes (M-AC.Geot 01, M-AC.Geot 02, M-AC.Geot 03, M-AC.Geot 05) y una muestra de suelo inalterado tipo Shelby en la estación M-AC.Geot 03 (*Figura 35*).



Figura 35. Fotografía izquierda Muestra de suelo alterada y muestra inalterada tipo Shelby. Fotografía Derecha Afloramientos de los depósitos de ceniza en el centro poblado Alto Cauca. Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2.4.2.2 Suelo Residual a partir de la Formación Barroso (Sriv/SM)

Denominada por CARDER (2020A) como Suelo residual volcánico de la Formación Barroso (Srii2), se asocian diabasas, basaltos, espilitas, lavas almohadilladas, tobas, brechas y aglomerados, que ocasionalmente presenta lentes irregulares de chert y sedimentitas silíceas (González , 1993).

Esta unidad se encuentra asociada a gran número de eventos de remoción en masa, que se detonan por sus diversos grados de meteorización, facilitando la formación de arcillas y lateritas que aumentan la susceptibilidad a erosión; principalmente cuando son intervenidos para cortes viales, o por entregas de agua sin un control predefinido (CARDER, 2020A).

Según los resultados de laboratorio y la clasificación SUCS de este material, dispuestos en el informe realizado por CARDER (2020A) corresponden a arenas limosas de alta compresibilidad (SM) y (MH); La densidad húmeda registra

promedios de 1,35 gr/cc; el índice de plasticidad es de 35,88% y la humedad natural presenta un valor de 74,15%.

Se ubican hacia la parte sur del centro poblado, se presenta como roca completamente alterada grado 5 según Dearman se logran apreciar algunas estructuras heredadas (Zonas de diaclasas), pero no existe evidencia de bloques de roca intacta. Presentan una coloración rojiza debido a los altos contenidos de óxidos de hierro ocasionados por la lixiviación presente, con textura arcillosa, debido a esto y al alto grado de meteorización no es posible establecer la composición mineralógica de la misma, su humedad es baja, su plasticidad varia de entre media a alta y su grado de compacidad es alta. Para este suelo se obtuvo un resultado granulométrico (SM) según la clasificación de SUCS.

Este suelo residual ocupa 46,23 Ha que representa el 53,4% del área total de estudio, fue apreciado en la estación M-AC-Geot04 (Figura 36) de donde se sacaron muestras tanto de suelo alterado, como de suelo inalterado tipo Shelby (Figura 37).



*Figura 36. Afloramiento de suelo residual de la Formación Barroso, estación M-AC-Geot04.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.*



Figura 37. Toma de muestra tipo Shelby.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.2.4.2.3 Suelo transportado coluvial (Stco/SM)

Este suelo pertenece a los depósitos generados por los movimientos en masa presentes en el centro poblado, es de esperar que presenten mezclas de los suelos aledaños observados puesto que este tipo de suelo no presenta orden en el mismo; vale la pena recalcar que esta unidad de suelo fue delimitada a partir de la interpretación del relieve sombreado y a pesar de no tener un resultado de laboratorio para este suelo es de esperar que presente la misma granulometría de las unidades que pueden conformarlo, en este caso, los suelos contiguos. Cubren cerca de 5,17 Ha que estadísticamente representan el 6% del total del área estudiada.

10.2.4.3 Modelo Geológico-Geotécnico

La construcción de un modelo geológico-geotécnico tiene como finalidad principal identificar las zonas susceptibles ante fenómenos de remoción en masa y otros procesos erosivos menores, los cuales responden a una mezcla de factores como inclinación, tipo de material, las propiedades geomecánicas del suelo y amenaza sísmica, lo cual permitirá tomar mejores decisiones en el manejo del territorio con respecto al plan de ordenamiento territorial del municipio de Marsella. Para su elaboración se utilizan insumos como el modelo de elevación digital (DEM), utilizado para la generación de curvas de nivel y la clasificación de pendientes, además, se utilizó la información recopilada en reconocimientos de campo mediante el muestreo geotécnico y la descripción de perfiles de meteorización, lo que permitió obtener la cartografía plasmada en el mapa de unidades geológicas superficiales.

A continuación, se describen dos secciones tipo representativas para el centro poblado Alto Cauca.

- **Sección 0+200**

Ubicado hacia la parte norte del centro poblado orientado en sentido SW-NE y con una longitud de 700 metros y una altura máxima aproximada de 1535 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Figura 39).

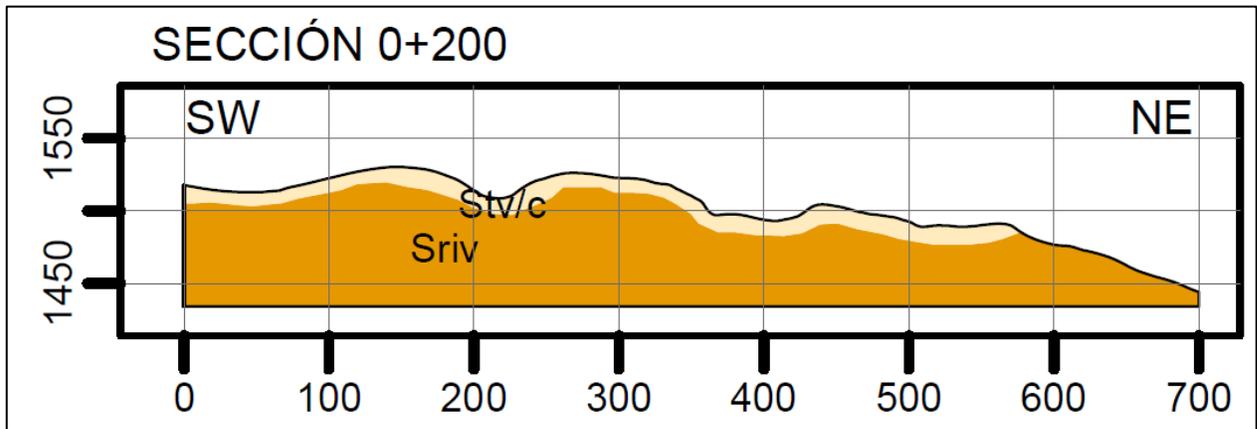


Figura 39. Sección 0+000, ubicada en la zona Norte del centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración propia

Se encuentra relacionado a pendientes moderadamente abruptas en la parte más SW de la sección pasando a pendientes abruptas en parte NE de la misma, justamente marcando el cambio litológico de la misma, los depósitos de ceniza cubren la parte más superficial de la misma hasta el punto del cambio de pendiente donde inicia a aflorar el suelo residual generado a partir de la formación Barroso del cual para este punto no se tiene conocimiento de la certeza de su espesor.

Para esta sección se tienen datos de muestro de las estaciones M-AC-Geot01 y M-AC-Geot02, ubicadas a aproximadamente 40 metros y 12 metros respectivamente, donde se describen espesores de suelo transportado de cenizas de 1,50 metros para ambas estaciones.

- **Sección 0+500**

Ubicada hacia la parte central del centro poblado, en inmediaciones de las construcciones pertenecientes al mismo y orientado en sentido SW-NE y con una longitud de 840 metros y una altura máxima aproximada de 1530 (msnm) (Figura 40).

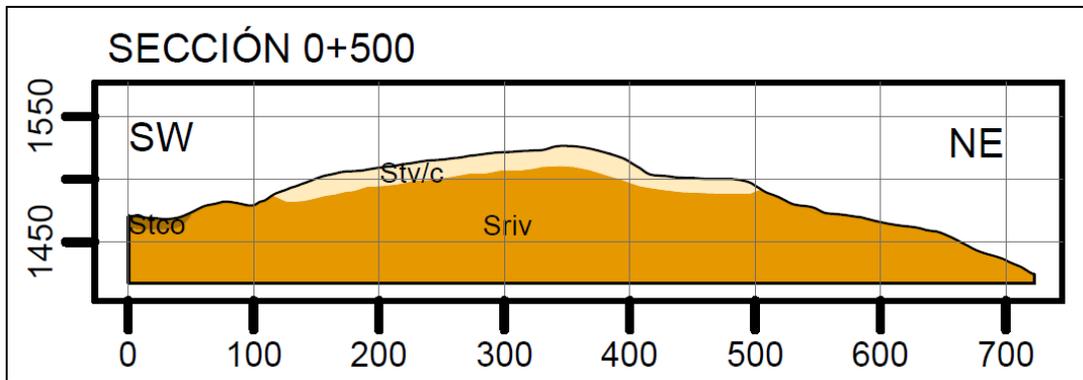


Figura 40. Sección 0+500, ubicada en la zona central del centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia

Se encuentra relacionado a pendientes abruptas en la mayoría de la sección, se asocia a pendientes levemente inclinadas dentro de las construcciones pertenecientes al centro poblado, al SW de la sección en la parte alta se aprecia suelo transportado de cenizas y justo hacia al valle cuando nos movemos hacia el NE observamos el suelo transportado coluvial generado por movimientos en masa, siguiendo hacia la parte final existe un quiebre de pendiente que deja de ser abrupta para ser muy abrupta y esto demarca el cambio litológico representativo en la zona, los depósitos de ceniza cubren la parte más superficial de la misma hasta el punto del cambio de pendiente donde inicia a aflorar el suelo residual generado a partir de la Formación Barroso del cual para este punto se tiene información de la estación M-AC-Geot04, ubicada a aproximadamente 27 metros, donde se describen espesores de suelo transportado de cenizas de 3 y espesores de suelo residual de 7 metros, sin embargo, no se logró observar la transición suelo-roca.

10.2.4.3.1 Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad del centro poblado Alto Cauca tiene como objetivo representar y evaluar los factores de seguridad de los materiales que modelan la zona, el relieve al que están asociados y como su comportamiento puede condicionar el grado de susceptibilidad ante la ocurrencia de procesos morfodinámicos o erosivos. Para la elaboración del análisis se consideró inicialmente la información secundaria y la información obtenida en campo mediante la delimitación de las Unidades Geológicas para Ingeniería, el análisis de los puntos de muestreo geotécnico e incorporación de los resultados de laboratorio que permitieron establecer las propiedades físicas y geomecánicas de los materiales. Información especificada en componentes previos. Adicionalmente se elaboró un análisis morfométrico de la zona a partir del modelo digital del terreno obtenido mediante fuentes propias con equipos especializados, fotografías aéreas y fotografías de terreno tomadas durante la fase de campo.

Posteriormente se elaboraron 15 secciones en sentido SW-NE transversales al centro poblado, separadas de manera equidistante por 100 metros y con una amplitud restringida al área cartográfica establecida. Continuo a esto, se elaboraron mediante metodología SIG los perfiles de cada sección con la disposición de las unidades geológicas presentes y su respectiva relación a profundidad en términos de espesor y contactos asociados.

El centro poblado morfológicamente se encuentra influenciado en general por un relieve abrupto (16° - 35°) exceptuando las áreas cerca de las construcciones de viviendas presentes, donde el relieve es plano (0° - 2°) a levemente inclinado (2° - 4°).

Para el procesamiento y obtención del factor de seguridad de las posibles zonas de falla de cada sección se procesaron en el software Slide v6.0 los métodos: Bishop simplified, Janbu simplified, Janbú Corrected y Gle/Morgenstern Price, tomando el método que arroje menor factor de seguridad como base para el análisis de estabilidad, además se realizaron modelamientos de izquierda a derecha y de derecha a izquierda, lo que permitió evaluar para cada sección la totalidad de las laderas. Para contemplar diferentes escenarios en la interpretación de estabilidad se realizaron para cada sección dos tipos de análisis:

- **Análisis estático:**

En el cual se tomaron en cuenta las propiedades geomecánicas de los suelos como el ángulo de fricción, cohesión y peso unitario de los materiales, además de las cargas sobre el terreno asociadas a las casas, con una fuerza vertical propuesta de 20 KN-m².

- **Análisis pseudoestático o crítico:**

Involucró también las propiedades geomecánicas de los suelos como el ángulo de fricción, cohesión, peso unitario de los materiales y las cargas sobre el terreno asociadas a las casas, con una fuerza vertical propuesta de 20 KN-m². Sumado a lo anterior se tuvieron en cuenta los inventarios de fuentes sísmicas de Colombia, especialmente con el contenido de la NSR-10 capítulo A.2 denominado zonas de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño, donde fue posible establecer que el área del proyecto se encuentra en la región 5 con parámetro de aceleración pico horizontal efectiva A_a de 0,25, tomando para las modelaciones verticales un valor correspondiente a $\frac{1}{2}$ de A_a que equivale a 0,125. En este análisis también se tuvo en cuenta el nivel freático o tabla de agua, que para todos los modelos estudiados en este informe se localiza en el límite estratigráfico entre la Unidad suelo transportado de ceniza y el suelo residual del basamento.

Para la clasificación de los factores de Seguridad en la estabilidad de taludes se toman en cuenta los siguientes rangos:

Nivel de amenaza	Factor de seguridad	Condición de estabilidad
Alta	<1,1	Inestable
Media	1,1 – 1,5	Estable Latente
Baja	>1,5	Estable

Tabla 31 Clasificación de amenaza y condición de estabilidad de un talud ante deslizamiento.

Fuente: Modificado de (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

A continuación, se muestran en la Tabla 32 las propiedades físicas y geomecánicas establecidas para cada una de las unidades presentes en el centro poblado y con las cuales se hizo el modelamiento de estabilidad de cada sección.

Propiedades físicas y geomecánicas			
Unidad	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	c (kN/m ²)	f(°)
Suelo transportado volcánico de cenizas	11,28	33,354	32,58
Suelo residual a partir de la Formación Barroso	16,18	54,93	23,94
Suelo transportado coluvial	13,73	24,52	25

Tabla 32. Propiedades físicas y geomecánicas consideradas para las Unidades Geológicas presentes en el centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las imágenes de los análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas para las dos secciones tipo seleccionadas.

- **Sección 0+200**

La Figura 41.0 muestra el análisis de estabilidad en condiciones estáticas, mientras que la Figura 41 en condiciones de estabilidad pseudoestáticas.

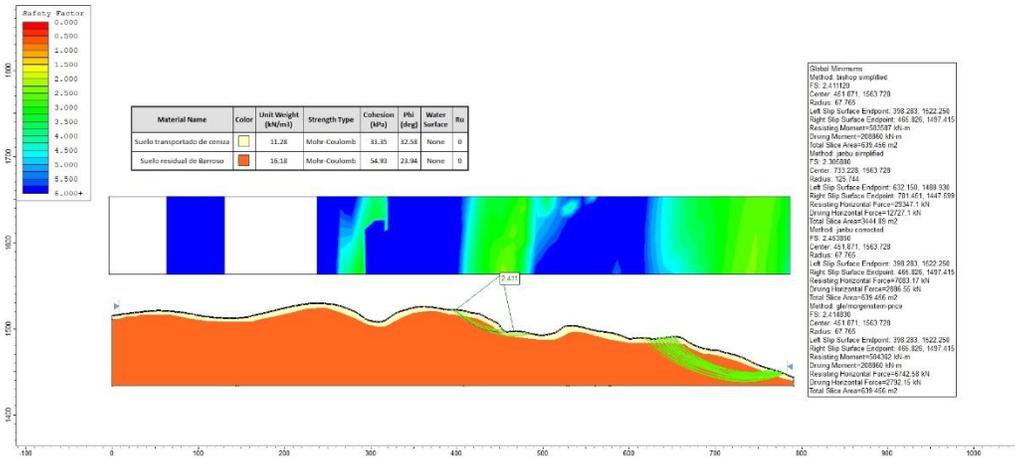


Figura 41. Análisis de estabilidad en condiciones estáticas para la sección 0+200.
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

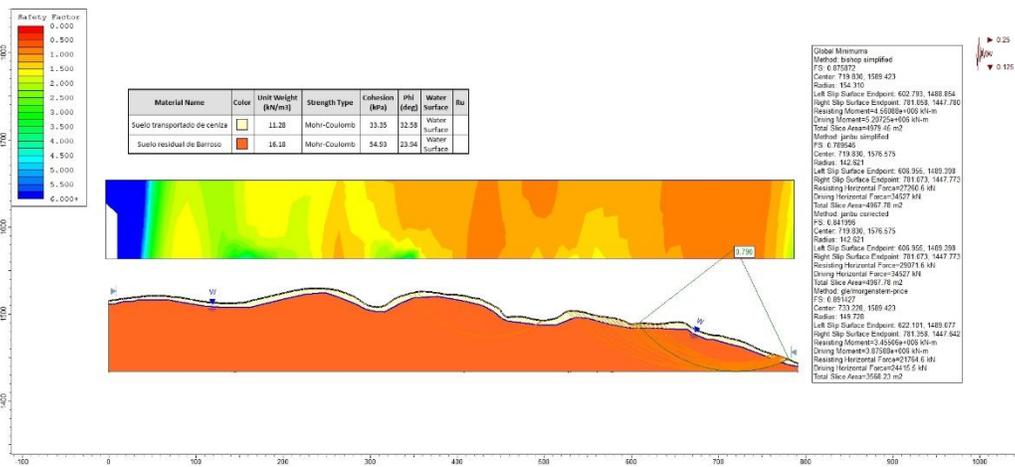


Figura 42. Análisis de estabilidad en condiciones pseudoestáticas para la sección 0+200.
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

- **Sección 0+500**

La Figura 41.2 muestra el análisis de estabilidad en condiciones estáticas, mientras que la Figura 43 en condiciones de estabilidad pseudoestáticas.

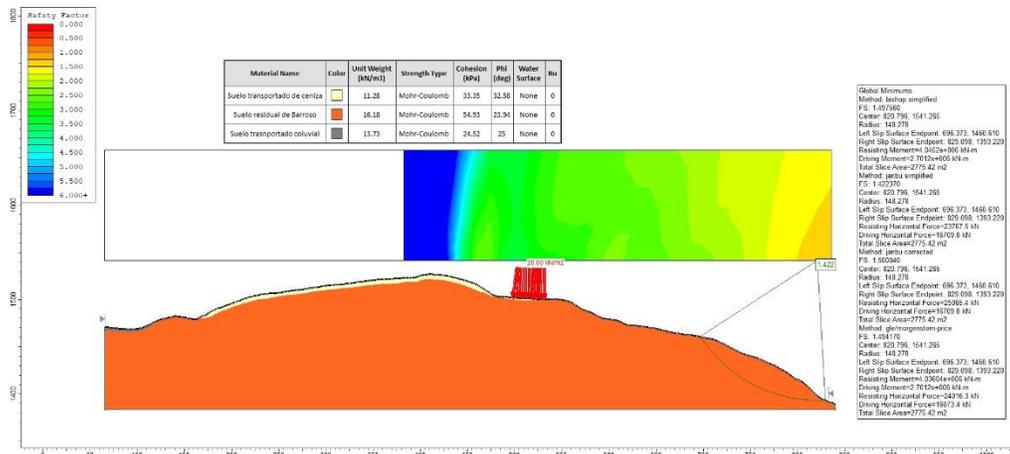


Figura 43. Análisis de estabilidad en condiciones estáticas para la sección 0+500.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

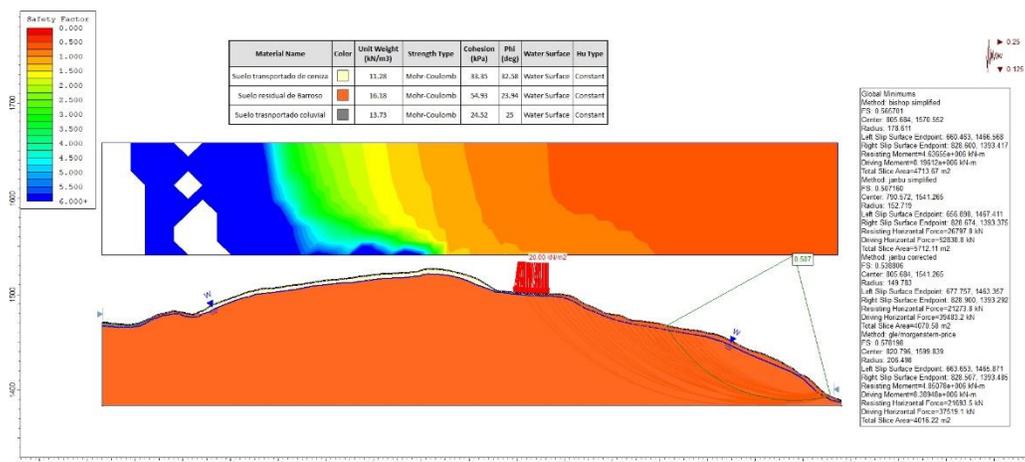


Figura 44. Análisis de estabilidad en condiciones pseudoestáticas para la sección 0+500.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.3 Elementos Geomorfológicos

El área de estudio se halla modelada por geofomas de ambiente denudacional, (Laderas Erosivas, Denudacionales y Onduladas), siendo las primeras las de mayor porcentaje de área ocupada; estas laderas fueron discriminadas por su pendiente, en Inclinas, Muy Inclinas, Abruptas, Muy Abruptas y Escarpadas; también se evidencia la presencia de conos de deslizamiento indiferenciado hacia diferentes zonas del centro poblado demostrando así la presencia del fenómeno de movimientos en masa en el mismo, finalmente se encuentran geofomas de origen antrópico como superficies de explanación y el área urbanizada del centro poblado. (Figura 45)

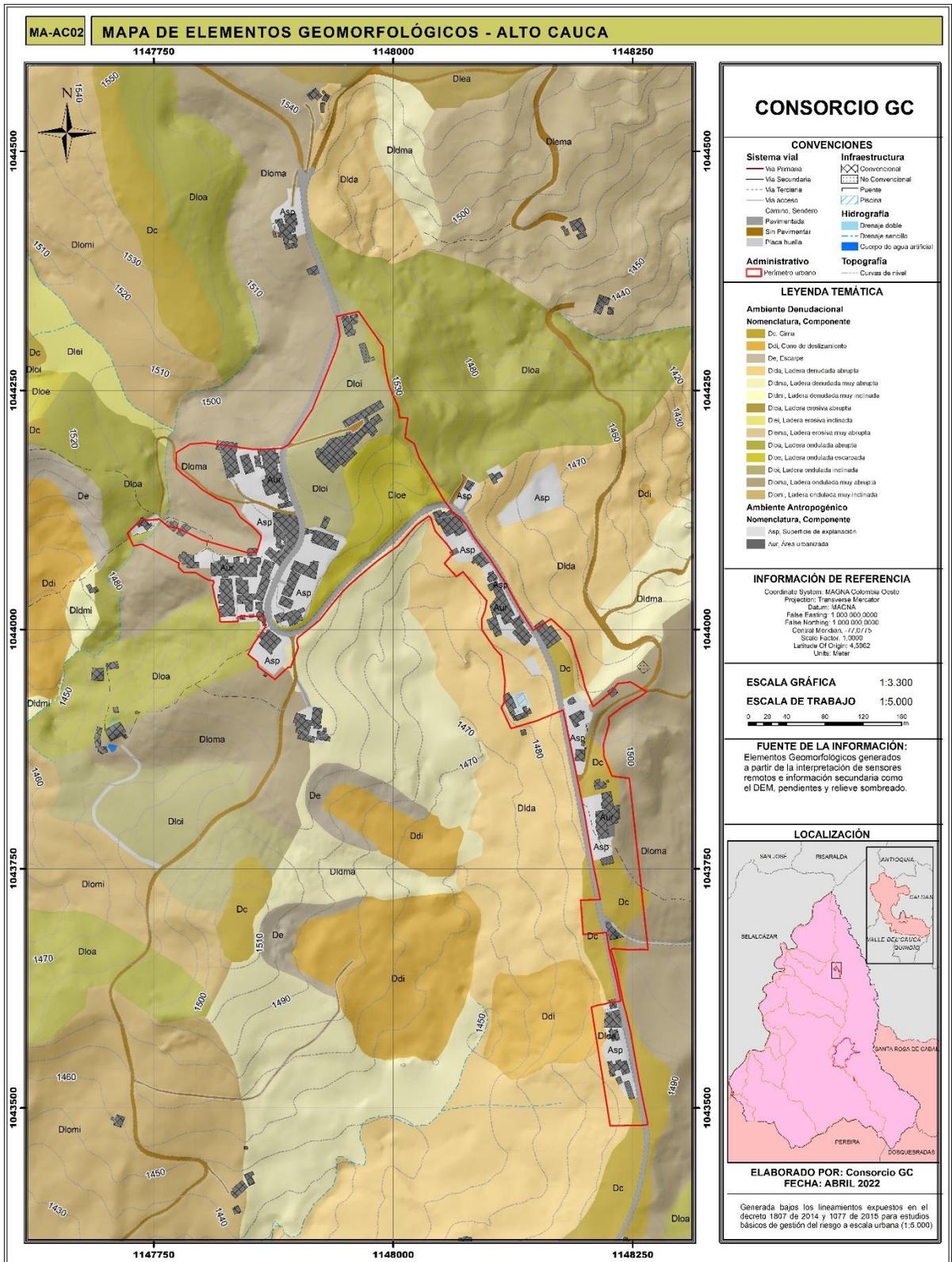


Figura 45. Mapa de Elementos Geomorfológicos del centro poblado Alto Cauca
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

10.4 Mapa de Pendientes

La Figura 46 muestra el mapa de pendientes del centro poblado Alto Cauca siguiendo la clasificación de acuerdo a los diferentes rangos de pendiente (Tabla 33) a partir de la propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia por Carvajal (2011).

Índices de inclinación	
Inclinación	Descripción
< 5°	Plana o suavemente inclinada
6°-10°	Inclinada
11°-15°	Muy Inclinada
16°-20°	Abrupta
20°-30°	Muy abrupta
31°-45°	Escarpada
> 45°	Muy Escarpada

*Tabla 33. Rangos utilizados con propósitos de análisis edafológicos y de ingeniería.
Fuente Carvajal (2011)*

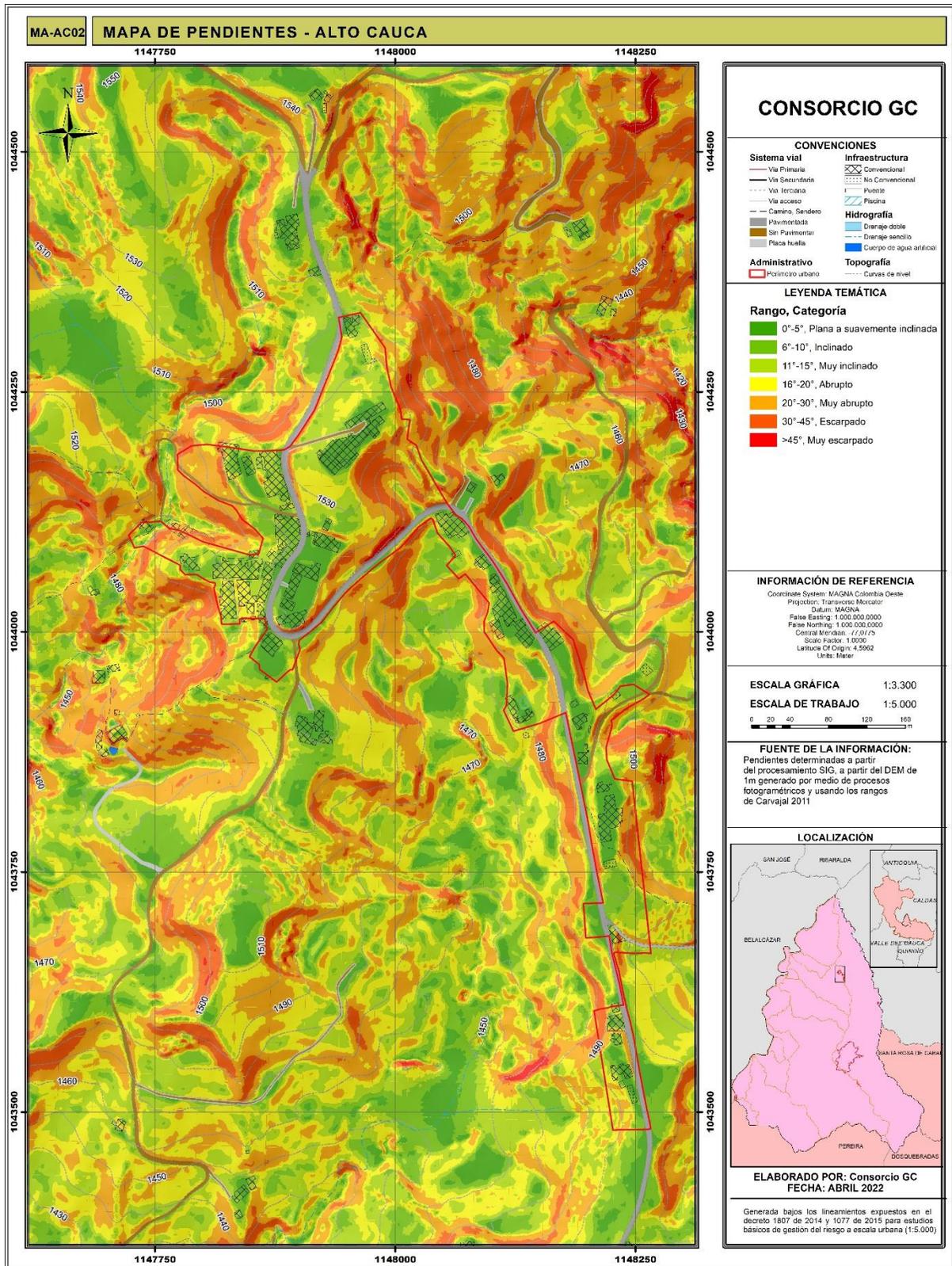
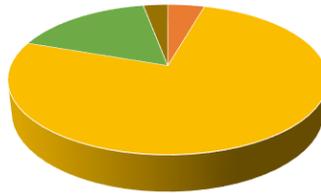


Figura 46. Mapa de pendientes del centro poblado Alto Cauca.
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

Coberturas Centro Poblado Alto Cauca



- Territorios artificializados
- Territorios agrícolas
- Bosques y áreas seminaturales
- Superficies de agua
- Otras coberturas

Nivel	Cobertura	Área (Ha)	%
Territorios artificializados	Escombreras	0,02	0,02%
	Áreas deportivas	0,14	0,2%
	Tejido urbano discontinuo	0,34	0,4%
	Tejido urbano continuo	1,39	1,6%
	Otras zonas verdes urbanas	1,96	2,3%
Territorios agrícolas	Hortalizas	0,02	0,02%
	Otros cultivos permanentes arbustivos	0,03	0,03%
	Cultivos confinados	0,10	0,1%
	Pastos arbolados	0,90	1,0%
	Mosaico de pastos y cultivos	1,41	1,6%
	Otros cultivos permanentes arboreos	2,18	2,5%
	Pastos enmalezados	6,4	7,4%
	Café	6,30	7,3%
	Plátano y banano	10,88	12,6%
	Pastos limpios	13,28	15,3%
	Mosaico de cultivos	24,24	28,0%
Bosques y áreas seminaturales	Tierras desnudas	0,51	0,6%
	Bosque fragmentado	4,10	4,7%
	Vegetación secundaria baja	4,91	5,7%
	Bosque de galería y ripario	4,94	5,7%
Superficies de agua	Estanques para acuicultura continental	0,01	0,01%
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,01	0,01%
	Cuerpos de agua artificiales	0,001	0,001%
Otras coberturas	Parqueaderos en gravilla	0,05	0,1%
	Parqueaderos en concreto	0,12	0,1%
	Áreas abiertas construidas	0,17	0,2%
	Red vial pavimentada	0,95	1,1%
	Red vial sin pavimentar	1,26	1,5%
TOTAL		86,6	100%

Tabla 34. Estadísticas coberturas de la tierra Alto Cauca

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

11 RESULTADOS

A partir de la aplicación metodológica del análisis estadístico multivariado explicado de manera detallada en un apartado anterior se realizó el análisis de susceptibilidad para el centro poblado Alto Cauca, este análisis fue desarrollado a partir de la evaluación de factores condicionantes como, coberturas, Elementos Geomorfológicos, pendientes, Unidades Geológicas para Ingeniería y Relieve relativo, los cuales definen todas las propiedades que constituyen el centro poblado y su coexistencia puede o no favorecer la ocurrencia de procesos morfodinámicos de diferente tipo. Para el análisis se evaluó la Condición de estabilidad teórica explicada para cada condicionante en el ítem metodológico, la cual permite definir la implicación o grado de importancia de cada una de las variables respecto a la posibilidad y susceptibilidad a la generación de procesos de remoción en masa o erosivos. Adicionalmente, se tuvieron en consideración las apreciaciones en campo sobre cómo se encuentra constituido el centro poblado ya que, si bien hay variables que en términos teóricos pueden favorecer la ocurrencia de procesos morfodinámicos aumentando el grado de susceptibilidad de una zona, la disposición y las condiciones espaciales en las que se encuentra en la zona pueden condicionar una menor relevancia dentro de la evaluación.

A partir de esta consideración se estableció una primera jerarquización de los factores que condicionan el grado de susceptibilidad dentro de la zona de estudio ante la presentación de procesos morfodinámicos (Tabla 35).

Análisis Susceptibilidad
<i>Factores condicionantes</i>
ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS
COBERTURAS
UGI
PENDIENTES
RELIEVE RELATIVO

Tabla 35. Jerarquización factores condicionantes para el centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

La jerarquización se encuentra fundamentada de la siguiente manera. Teniendo en cuenta que los Elementos Geomorfológicos representan un análisis detallado de los rasgos del relieve, caracterización del ambiente asociado y la morfométrica del terreno, este factor condicionante es el más preponderante en la jerarquización que permite zonificar en primera instancia las geoformas con mayor grado de susceptibilidad con respecto a la ocurrencia de diferentes tipos de procesos en remoción en masa. Seguido de esto y asociado estrictamente con las características del centro poblado el siguiente factor condicionante corresponde a las coberturas y

uso del suelo, este factor se asocia principalmente con la extensión y caracterización de la vegetación o unidades urbanísticas que constituyen la zona de estudio y pueden favorecer la generación o directamente estar asociadas a un proceso morfodinámico ya existente. Por otro lado, las UGI para este centro poblado son unidades relativamente homogéneas que tienen unas propiedades mecánicas de relevancia y principalmente se encuentran influenciadas por los factores condicionante mencionados anteriormente. Las pendientes son un factor que condiciona directamente un terreno, ya que el grado de inclinación de la ladera puede favorecer las tasas de erosión. El relieve relativo corresponde a una relación de alturas entre laderas que puede o no aumentar el grado de susceptibilidad. De esta manera se ha establecido la jerarquización de análisis para este centro poblado.

A partir de este análisis se integró la jerarquización en el modelamiento estadístico del método multivariado mediante una evaluación de factores condicionantes y variables en una matriz simétrica de comparación de pares. Cada factor se evaluó uno respecto al otro siguiendo las condiciones de importancia con el fin de obtener los pesos de modelamiento (Tabla 36).

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho más importante o preferido que el segundo.
5	Más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
1	Igual	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que	Al comparar un elemento con el otro, el primero se considera absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Tabla 36. Evaluación de importancia entre factores y variables condicionantes.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

En la Figura 49 se muestra la matriz resultante del análisis realizado para el centro poblado Alto Cauca.

MATRIZ DE COMPARACION DE PARES														
FACTORES CONDICIONANTES	ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	COBERTURAS	UGI	PENDIENTES	RELIEVE RELATIVO	MATRIZ DE NORMALIZACION					VECTOR DE PRIORIZACION	%	VECTOR SUMA PONDERADA %	LANDA (A)
ELEMENTOS GEOMORFOLÓGICOS	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	0,45	0,62	0,40	0,29	0,29	0,41	41	2,29	5,60
COBERTURAS	0,33	1,00	3,00	3,00	5,00	0,15	0,21	0,40	0,29	0,29	0,27	27	1,48	5,57
UGI	0,33	0,33	1,00	3,00	4,00	0,15	0,07	0,13	0,29	0,24	0,17	17	0,90	5,17
PENDIENTES	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00	0,15	0,07	0,04	0,10	0,12	0,10	10	0,49	5,11
RELIEVE RELATIVO	0,20	0,20	0,25	0,50	1,00	0,09	0,04	0,03	0,05	0,06	0,05	5	0,28	5,17
SUMA	2,20	4,87	7,58	10,50	17,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,00		5,22
1/SUMA	0,45	0,21	0,13	0,30	0,08									

Figura 49 Matriz de comparación de pares factores condicionantes del centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

Posterior a esto se realizó una jerarquización de las variables que conforman cada uno de los factores detonantes mediante las condiciones iniciales propuestas en el apartado de la metodología, además de eso, en algunos casos se tuvo en cuenta la relación estadística respecto a los diferentes procesos morfodinámicos presentes en el centro poblado analizado.

A continuación, se describe cada factor condicionante respecto a todas las variables y su jerarquización mediante la implementación de los criterios de evaluación.

- **Elementos Geomorfológicos**

De manera general con relación a las geoformas del terreno, el centro poblado Alto Cauca se encuentra influenciado por Elementos Geomorfológicos de ambiente denudacional y antropogénico, las laderas denudadas al igual que los escarpes son las áreas más susceptibles puesto que están directamente relacionado a movimientos en masa, seguidos de estos se encuentran las laderas erosivas las cuales al contener procesos erosivos pueden llegar a generar futuros movimientos en masa, finalmente tanto las laderas onduladas como lo perteneciente al ambiente antropogénicos son las de menor susceptibilidad (Tabla 37).

Jerarquización EGMF	Elementos Geomorfológicos
Escarpe	Cono de deslizamiento
Ladera denudada muy abrupta	Escarpe
Ladera denudada abrupta	Ladera denudada muy abrupta
Ladera denudada muy inclinada	Ladera erosiva abrupta
Ladera erosiva muy abrupta	Ladera erosiva muy abrupta
Ladera erosiva abrupta	Ladera erosiva inclinada
Ladera erosiva inclinada	Ladera denudada abrupta
Cono de deslizamiento	Cima
Ladera ondulada escarpada	Ladera ondulada escarpada
Ladera ondulada muy abrupta	Ladera denudada muy inclinada
Ladera ondulada abrupta	Ladera ondulada muy inclinada
Ladera ondulada muy inclinada	Área urbanizada
Ladera ondulada inclinada	Superficie de explanación
Cima	Ladera ondulada abrupta
Superficie de explanación	Ladera ondulada inclinada
Área urbanizada	Ladera ondulada muy abrupta

Tabla 37. Jerarquización de los Elementos Geomorfológicos para el centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

Los elementos más susceptibles son tanto los escarpes como los distintos tipos de ladera denudadas, los conos de deslizamiento a pesar de estar asociados directamente a un movimiento en masa se consideran de importancia media, puesto que, son generados por las laderas denudadas.

- **Coberturas**

Las coberturas son el resultado de una dinámica natural asociada con diferentes tipos de vegetación nativa y la incorporación de usos de suelo a partir de actividades antrópicas como cultivos para el desarrollo agrícola, zonas de ganadería y áreas de urbanización. Esta intervención del suelo dependiendo las propiedades geológicas, geomorfológicas, hídricas y climáticas pueden favorecer u obstruir la evolución de especies endémicas, deterioro del ecosistema, cambios de relieve y deterioro de los materiales que constituyen la zona, de esta manera se propician las condiciones para aumentar o disminuir el grado de susceptibilidad de una zona. La preponderancia para este factor condicionante se obtuvo a partir de la relación de la profundidad radicular de cada una de ellas, siendo así las zonas descubiertas (Tierras desnudas) las áreas más susceptibles y aquellas coberturas con mayor

profundidad radicular como los bosques las zonas menos susceptibles. Considerando la jerarquización obtenida se realizó el análisis de matriz de pares siguiendo este orden. Para este centro poblado se integraron las coberturas por grupos que abarcaran características similares o fueran de alguna manera correlacionables (Tabla 38).

Jerarquización Coberturas	Grupo de coberturas	Coberturas
Tierras desnudas	Bosque	Bosque fragmentado
Escombreras		Bosque de galería y ripario
Pastos	Café	Café
Mosaico de cultivos	Cuerpo Agua	Cuerpos de agua artificiales
Vegetación secundaria baja		Estanques para acuicultura continental
Mosaico de pastos y cultivos		Lagunas, lagos y ciénagas naturales
Plátano y banano	Cultivos confinados	Cultivos confinados
Café	Escombreras	Escombreras
Hortalizas	Hortalizas	Hortalizas
Otros Cultivos Permanentes	Mosaico de cultivos	Mosaico de cultivos
Red vial sin pavimentar	Mosaico de pastos y cultivos	Mosaico de pastos y cultivos
Red vial Pavimentada	Otros Cultivos Permanentes	Otros cultivos permanentes arbóreos
Cultivos confinados		Otros cultivos permanentes arbustivos
Tejido urbano discontinuo	Pastos	Pastos limpios
Bosque		Pastos enmalezados
Tejido urbano continuo		Pastos arbolados
Cuerpo Agua	Plátano y banano	Plátano y banano
	Red vial sin pavimentar	Red vial sin pavimentar
	Tejido urbano continuo	Otras zonas verdes urbanas
		Áreas abiertas construidas
		Red vial pavimentada
		Áreas deportivas
		Parqueaderos en concreto
		Parqueaderos en gravilla
		Piscinas recreativas
	Tejido urbano continuo	Tejido urbano continuo
	Tejido urbano discontinuo	Tejido urbano discontinuo
	Tierras desnudas	Tierras desnudas
	Vegetación secundaria baja	Vegetación secundaria baja

Tabla 38. Análisis de coberturas respecto a la profundidad radicular en el centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

Las coberturas más susceptibles son las correspondientes a las tierras desnudas junto con las escombreras y las diferentes variedades pastos presentes en el centro poblado, es de recalcar que los movimientos en masa están relacionados en una gran proporción a estos tipos de coberturas.

- **Unidades Geológicas para Ingeniería**

Las UGI son los materiales superficiales que moldean y constituyen el centro poblado de estudio, su extensión, relación composicional, relaciones texturales, estado de saturación niveles de permeabilidad y propiedades geomecánicas actuales condicionan notoriamente el grado de susceptibilidad de una zona respecto a procesos erosivos y de remoción en masa. Cabe resaltar que cada una de las unidades presentes se encuentra de igual manera asociada a una serie de procesos o relacionada directamente con la influencia que tiene cada factor condicionante sobre estas unidades presentes. El análisis de cada UGI se llevó a cabo por sus propiedades geomecánicas como se estableció en el apartado de la metodología y se realizó el análisis de matriz de pares siguiendo este orden (Tabla 39).

Jerarquización UGI	UGI
Suelo transportado coluvial	Suelo transportado coluvial
Suelo residual a partir de la Formación Barroso	Suelo residual a partir de la Formación Barroso
Suelo transportado de ceniza	Suelo transportado de ceniza

Tabla 39. Jerarquización del factor UGI para el centro poblado Alto Cauca.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

Los depósitos coluviales corresponden directamente a depósitos asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa afectado por la acción de la gravedad y agua normalmente, si bien es una unidad que jerárquicamente se encuentra por encima de las demás unidades por ser parte de un proceso morfodinámico, la unidad que en realidad falla de alguna manera y en relación a este análisis es más susceptible en nuestra zona de estudio corresponde a los suelos residuales de roca ígnea volcánica básica de la formación barroso, puesto que sobre esta unidad se encuentran relacionados los procesos de movimientos en masa.

- **Pendientes**

Los diferentes rangos de pendientes que pueden definir una ladera o el grado de inclinación sectorizado del relieve de una zona de estudio pueden favorecer en gran medida la ocurrencia, desarrollo o presencia de procesos erosivos o de remoción en masa. Este factor se encuentra directamente ligado con la interpretación de los

Elementos Geomorfológicos. Cabe resaltar que los rangos de pendientes incorporados para este modelamiento son tomados de Carvajal (2011) y fueron jerarquizadas de mayor a menor grado inclinación, puesto que en este sentido disminuye la susceptibilidad (Tabla 40).

Jerarquización Pendientes	Pendientes	Clasificación
>45°	< 5°	Plana o suavemente inclinada
31°-45°	6°-10°	Inclinada
21°-30°	11°-15°	Muy Inclinada
16°-20°	16°-20°	Abrupta
11°-15°	20°-30°	Muy abrupta
5°-10°	31°-45°	Escarpada
0°-5°	> 45°	Muy Escarpada

Tabla 40. Jerarquización del factor pendientes para el centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC..

- **Relieve relativo**

El relieve relativo corresponde a una relación de alturas entre laderas que puede o no aumentar el grado de susceptibilidad. Se estableció la jerarquización de importancia siguiendo un orden de mayor a menor rango de este factor y se realizó el análisis de matriz de pares siguiendo este orden (Tabla 41).

Jerarquización Relieve Relativo	Relieve Relativo (m)
7,47-100	7,47-100
4,36-7,47	4,36-7,47
2,84-4,36	2,84-4,36
1,51-2,84	1,51-2,84
0-1,51	0-1,51

Tabla 41. Jerarquización del relieve relativo para el centro poblado Alto Cauca.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

Teniendo en consideración todos estos parámetros de evaluación y aplicación de relaciones estadísticas, cada una de las variables jerarquizadas de los factores condicionantes fueron evaluadas mediante el método multivariado de la matriz de pares de comparación. A partir del resultado de los vectores de priorización se calcularon los pesos ponderados asociados con cada una de las variables para poder realizar la modelación correspondiente mediante rutina SIG y obtener el siguiente mapa de susceptibilidad para el centro poblado Alto Cauca (Figura 50).

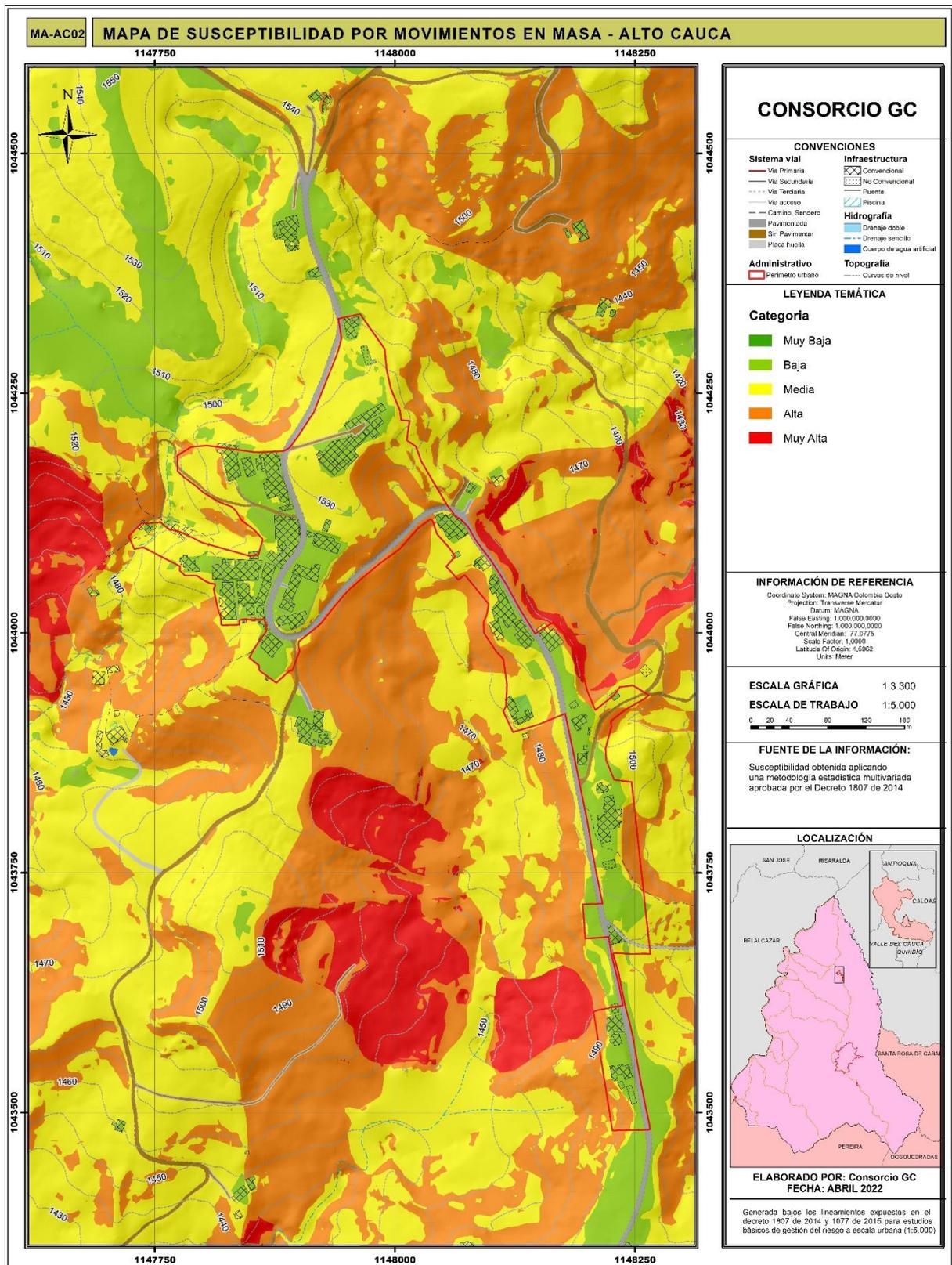


Figura 50 Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para el centro poblado Alto Cauca.
 Fuente: Elaboración Propia, a partir de información suministrada por el CONSORCIO GC.

A partir del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa, se describen las categorías de análisis de susceptibilidad incorporadas y como se encuentran asociadas a las diferentes variables de los factores condicionantes.

- **Susceptibilidad Muy Baja**

La categoría muy baja no se encuentra en este centro poblado debido a que no se unen los factores condicionantes necesarios para su obtención.

- **Susceptibilidad Baja**

La categoría baja se encuentra asociada a un área de 10,4 hectáreas que corresponde al 12% del área de estudio. Esta zonificación se encuentra un poco dispersa dentro del centro poblado, sin embargo, se puede zonificar principalmente en dos zonas dentro del área de estudio; La primera se presenta en las áreas aledañas de las zonas urbanizadas o tejido urbano discontinuo, pendientes inferiores a los 10° a relieves relativos en un rango de 0 - 7,47 metros, y elementos geomorfológicos como las cimas, superficies planas o subhorizontales, superficies de explanación y el área urbanizada. La segunda área se encuentra ubicada hacia el margen NW del centro poblado donde se encuentra relacionado a pendientes de que no superan los 15° de inclinación, a coberturas de tipo principalmente bosque y en algunas zonas a cultivos de tipo café, a elementos geomorfológicos de laderas onduladas de diferentes inclinaciones y a algunas laderas erosivas, el relieve relativo se asocia a todos los rangos propuesto indicándonos que este factor es el menos preponderante para esta categoría. Finalmente se observa que estas dos zonas están directamente relacionadas con la UGI del suelo transportado de cenizas.

- **Susceptibilidad Media**

El centro poblado se encuentra altamente influenciado por la zonificación de susceptibilidad media asociada con un área de 38,5 hectáreas que corresponde al 44,9% del área analizada. Geomorfológicamente se encuentra asociada a laderas onduladas de diferentes inclinaciones y sectorizada en laderas erosivas abruptas en zonas sin procesos de erosión asociados. Las coberturas son principalmente zonas de producción agrícola, como mosaicos de cultivos, cultivos de café y plátano y zonas de bosques fragmentados en menor medida. Las pendientes asociadas se encuentran en un rango de 15-30° de inclinación y un relieve relativo definido por dos rangos, uno predominante de 4,36-7,47 metros y en menor proporción un rango de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de la susceptibilidad media se encuentra asociada en mayor medida a la UGI predominante de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación

Barroso y en zonas sin presencia de procesos erosivos se asocia a suelos transportados volcánicos de cenizas.

- **Susceptibilidad Alta**

La categoría alta se encuentra en un área de 31,3 hectáreas que corresponde al 36,1% del área analizada. Geomorfológicamente se encuentra asociada a laderas denudadas, erosivas (con procesos de erosión laminar) y algunas laderas onduladas de alta pendiente (escarpada y muy abrupta) en las partes aledañas a la presencia de procesos de remoción en masa en inmediaciones del centro poblado. Las coberturas son pastos limpios y en menor medida zonas de cultivos como plátano y banano o mosaicos de cultivos que se encuentran ubicados en una ladera ya afectada por procesos morfodinámicos. Las pendientes asociadas se encuentran en un rango de 15-45° de inclinación abrupta principalmente y un relieve relativo predominante de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de la susceptibilidad alta se encuentra asociada en mayor medida a la UGI predominante de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación Barroso y hacia el límite NE del área de análisis se concentra la susceptibilidad sobre los suelos transportados volcánicos de ceniza.

- **Susceptibilidad Muy Alta**

La categoría muy alta se encuentra en un área de 6,12 hectáreas que corresponde al 7% del área analizada. Geomorfológicamente se encuentra asociada directamente a los conos de deslizamiento y a las laderas denudadas que los contienen. Las coberturas son pastos limpios y en menor medida zonas de cultivos como plátano y banano o mosaicos de cultivos que se encuentran ubicados en el área de afectación de los procesos morfodinámicos. Las pendientes asociadas están en un rango de 20-45° de inclinación abrupta principalmente, junto con pendientes mayores a 45° asociados geomorfológicamente a zonas de escarpes y un relieve relativo predominante de 7,47-100 metros de desnivel entre laderas o taludes. La zonificación de la susceptibilidad muy alta se encuentra asociada con las áreas de afectación por la presencia u ocurrencia de procesos morfodinámicos que en mayor medida se encuentran asociados a la UGI de suelo transportado coluvial y de suelo residual a partir de roca volcánica básica de la Formación Barroso con presencia de grandes deslizamientos y en menor proporción zonas de erosión laminar y reptación.

12 CONCLUSIONES

- La exploración geotécnica es de vital importancia para la obtención de las propiedades geomecánicas de los materiales que componen un terreno estudiado; dicha exploración se realiza con el fin de entender y prever el comportamiento de los materiales respecto a condiciones detonantes de movimientos en masa.
- Los mapas de Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) cumplen la valiosa función de agrupar los materiales respecto a condiciones geomecánicas similares, generando un mapa del comportamiento geomecánico tanto actual como futuro de los materiales que componen un área de estudio, además provee un croquis de las posibles áreas con mayor grado de susceptibilidad a movimientos en masa, para este caso en particular, el mayor grado de susceptibilidad está relacionado principalmente a los suelos transportados no consolidados de tipo coluvial.
- Los modelos geológicos-geotécnicos son un gran insumo para analizar la estabilidad del terreno, sin embargo, para poder obtener un mapa de susceptibilidad confiable aplicando una metodología determinística, es necesario contar con un número suficiente de puntos de exploración geotécnica con el fin de cumplir con un denso cubrimiento de toda el área estudiada.
- Los mapas de susceptibilidad son un gran insumo para dar un contexto de la estabilidad del terreno que habitamos las personas, de tal forma que, este insumo debe ser usado como el pilar para consolidar las posibles medidas de contingencia frente a la ocurrencia del fenómeno de movimientos en masa.
- La práctica realizada en el CONSORCIO GC brindó herramientas para el entendimiento de diferentes ramas de la geología como lo son la geotecnia, la geomorfología, la hidrogeología y los diferentes componentes Sistemas de Información Geográfica, además de la relación que existe entre estas para la obtención de mapas de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa.

13 RECOMENDACIONES

- Se recalca la importancia de estos estudios básicos con el fin de incluirlos en planes de ordenamiento territorial y así procurar salvaguardar las vidas de las personas además las pérdidas materiales en todos los sentidos (social, cultural, económico, etc) que estos fenómenos ocasionan en el país.
- Se recomienda la integración en el menor tiempo posible de estos estudios básicos al Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Marsella puesto que muchas de las condiciones iniciales tenidas en cuenta para este estudio pueden cambiar con el pasar del tiempo, de tal forma que, algunas zonas pueden presentar variaciones en sus condiciones de susceptibilidad y amenaza.
- Se recomienda la realización de campañas de socialización y concientización de estos estudios básicos con la comunidad municipal, así como con los entes reguladores tanto a nivel local como regional, con el fin de que las personas entiendan, con un lenguaje de preferencia no técnico, la importancia y el estado actual del territorio que habitan hoy en día.

14 BIBLIOGRAFÍA

- Aguarón, J., & Moreno Jiménez, J. M. (2002). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *ELSEVIER*, 140.
- Álvarez, E., & González, H. (1978). *Geología y geoquímica del cuadrángulo I-7 (Urao)*.
- Álvarez, J. (1971). *Informe preliminar sobre geoquímica de la Cordillera Occidental*. INGEOMINAS. Medellín.
- Ayala Carcedo, F., & Olcina, J. (2002). *Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España*. Barcelona: Ariel S.A.
- Bohórquez, O. P. (2005). Marco tectónico de la cadena volcánica más septentrional de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Geología Vol. 27 No. 1*.
- Calle, B., & González. (1982). *Geología y geoquímica de la Plancha 186, Riosucio*.
- CARDER. (2017). *Ajuste Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Otún, fase de diagnóstico, III. Caracterización del medio físico - biótico*. Pereira.
- CARDER. (2020). *Diagnóstico de riesgos ambientales del municipio de Marsella*. Pereira.
- CARDER. (2020A). *Ajuste Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Campoalegre y otros directos al Cauca, fase de diagnóstico, III. Caracterización del medio física*.
- CARDER. (2020B). *POMCA Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Campoalegre y otros directos al Cauca*. Pereira.
- Cartwright, D. (2019). *Geoquímica y petrografía de rocas de la Formación Barroso, en una mirada a su relación con los complejos máficos de la Cordillera Occidental y Central*. Bogotá.
- Carvajal, J. H. (2011). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Cediel, F., Shaw, R., Kroonenberg, S., Zuluaga, C., Lopez, J., & Leal, H. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern South America The Pacific-Caribbean-Andean Junction*.
- 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*.
- Estrada, J. (1995). *Paleomagnetism and accretion events in the northern Andes*.
- Estrada, J. J., Viana, R., & González, H. (2001). GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 205 CHINCHINÁ. *PUBLICACIÓN DIGITAL INGEOMINAS, 2001*, 38-50.
- Estrada, J. J., Viana, R., & González, H. (2001). La Geología de la plancha 205 Chinchiná. *Publicación digital INGEOMINAS, 38-50*.

- Gómez, J. &. (2020). *Mapa Geológico de Colombia en Relieve 2020. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá.*
- González , H. (1993). *Mapa geológico del departamento de Caldas. Bogotá: Ingeominas.*
- Gonzales, H. (1996). *Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado deL Ruiz. Bogotá: Ingeominas, Informe 2196.*
- González, H. (1996). *Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado deL Ruiz. Bogotá: Ingeominas, Informe 2196.*
- González, H. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Memorias explicativas de los mapas. Escala, 1(100.000).*
- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis estructural al noreste del Volcán Nevado del Ruíz, Colombia. Aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología.*
- Mejía, M. (1986). *Riesgos Geológicos en Marsella-Risaralda.* Medellín.
- Murcia, H., Borrero, C., Pardo, N., Alvarado, G., Arnoso, M., & Scolamacchia, T. (2013). Depósitos volcanoclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español. *Revista Geológica de América Central, 48, 15-39.*
- 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.*
- Presidencia de la Reública. (2014, 19 de septiembre). *Decreto 1807 de 2014.* Departamento Administrativo de la Función Pública. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Rodríguez, G., & Arango, I. (2013). Formación Barroso: Arco Volcánico Toleítico y diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-MORB en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín Ciencias de la Tierra, Nro 33, 17-38.*
- Rodríguez, G., & Zapata, G. (2013). *Análisis comparativo entre la Formación Barroso y el Complejo Quebradagrande: un arco volcánico toleítico-calcoalcalino, segmentado por el Sistema de Fallas Romeral en los Andes del norte .*
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.*
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica Para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa.*
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1: 25.000.*
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Mapa Geologico de Colombia. Escala 1:1.000.000. Bogotá.*

- SGC. (2016AA). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá D. C., Colombia.
- Toro, R., & Osorio, J. (2005). determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de los Andes calculados a partir de mecanismos focales de sismos mayores. *Boletín de Geología Vol. 27 No. 1*.