

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.
CASO DE ESTUDIO: SUBCUENCA DEL RÍO SAN FRANCISCO, DEPARTAMENTO
DE RISARALDA**

NICOLÁS ANDRÉS QUIROZ HERNÁNDEZ



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2019**

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.
CASO DE ESTUDIO: SUBCUENCA DEL RÍO SAN FRANCISCO, DEPARTAMENTO
DE RISARALDA**

NICOLÁS ANDRÉS QUIROZ HERNÁNDEZ

Proyecto presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en
Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2019**

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. ÁREA PROBLEMÁTICA.....	10
2. HIPÓTESIS	11
3. OBJETIVOS	11
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
4. JUSTIFICACIÓN	12
5. MARCO CONCEPTUAL.....	13
5.1. NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS:.....	13
5.1.1. NTC 4611: Información Geográfica. Metadatos.....	13
5.1.2. NTC 4611: Información Geográfica. Conceptos básicos de la calidad de los datos geográficos.....	13
5.1.3. NTC 5660: Información Geográfica. Evaluación de la calidad, procesos y medidas.....	14
5.2. MARCO GENERAL LEGAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN POMCA	14
5.2.1. Decreto 1729 de 2002:.....	14
5.2.2. Ley 1523 de 2012:.....	14
5.2.3. Decreto 1640 de 2012:.....	14
5.3. GUÍA TÉCNICA PARA LA FORMULACIÓN DE LOS PLANES DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS – POMCA:.....	15
5.3.1. Geología:.....	15
5.3.2. Geomorfología:.....	15
5.3.3. Gestión del Riesgo:.....	15
5.3.4. Susceptibilidad:.....	15
5.3.5. Amenaza:	15
5.3.6. Vulnerabilidad:.....	16
5.3.7. Riesgo:	16
5.4. OTROS CONCEPTOS.....	16
5.4.1. Movimientos en Masa (SGC):	16
5.4.2. Superposición Ponderada (ESRI):	16
6. MARCO REFERENCIAL.....	17
7. METODOLOGÍA.....	20
7.1. Recopilación de la información	21
7.2. Preprocesamiento y modelamiento de las variables cartográficas.....	21
7.3. Análisis de los resultados.....	22
8. RESULTADOS OBTENIDOS	24

9.	VARIABLES CARTOGRÁFICAS PRIMARIAS.....	26
9.1.	Sistema de referencia	26
9.2.	Información base vial	27
9.3.	Modelo Digital de Elevación (DEM)	29
9.4.	Mapa de pendientes.....	30
10.	CONDICIONES GEOAMBIENTALES	33
10.1.	Geología a escala 1:100.000.....	33
10.1.1.	Formación Quebradagrande – Miembro sedimentario (Kds).....	34
10.1.2.	Complejo Arquía (Pe)	35
10.1.3.	Formación Barroso (Kvb).....	35
10.1.4.	Pórfido andesítico de Pereira (Tpp).....	35
10.1.5.	Formación Armenia (Qfl).....	36
10.1.6.	Depósitos aluviales recientes (Qal)	36
10.2.	Geología estructural – Fallas y lineamientos	37
10.3.	Cobertura y uso actual del suelo	39
10.4.	Geomorfología	41
10.5.	Inventario de procesos morfodinámicos	44
10.5.1.	Catálogo de eventos.....	44
10.5.2.	Procesos definidos en la etapa de fotointerpretación.....	44
10.5.3.	Análisis de eventos	45
11.	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LADERA.....	48
11.1.	Pendiente de la ladera (slope).....	48
11.2.	Rugosidad (Rugosid1).....	49
11.3.	Curvatura del terreno (curvatura2)	50
11.4.	Curvatura con respecto al perfil (perfil2).....	51
11.5.	Curvatura con respecto al plano horizontal (plan2).	52
11.6.	Insolación (Insola).....	53
11.7.	Orientación de la ladera (orienta2)	54
11.8.	Acumulación de la cuenca (acumulation2)	55
11.9.	Longitud de cuenca acumulada (long2).....	56
11.10.	Relieve relativo. (relieverel2).....	57
11.11.	Pendiente senoidal (snoidal1).....	58
12.	VARIABLES DE PROXIMIDAD	59
12.1.	Distancia a drenajes (distdren2).....	59
12.2.	Distancia a vías (distvias2).....	61

12.3.	Distancia fallas y lineamientos (fallas3).....	62
13.	ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	63
13.1.	Mapa de susceptibilidad ante Movimientos en Masa	63
13.2.	Áreas críticas	67
14.	CONCLUSIONES.....	69
15.	RECOMENDACIONES.....	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización a nivel departamental de la cuenca del río Campoalegre y la subcuenca del río San Francisco.....	18
Figura 2. Distribución de los municipios en la subcuenca de San Francisco.	19
Figura 3. Izquierda: Mapa ubicación veredal según distribución municipal. Derecha: Representación porcentual del área de cada vereda dentro de la cuenca.....	19
Figura 4. Actividades generales de trabajo para la ejecución del proyecto.....	20
Figura 5. Diagrama conceptual de insumos cartográficos para la evaluación de la susceptibilidad a eventos de movimientos en masa.	22
Figura 6. Índice de planchas IGAC e información faltante del área de estudio.	27
Figura 7. Información adicional vial tomada de fuente secundaria en línea.	28
Figura 8. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la subcuenca del río San Francisco.....	30
Figura 9. Salidas cartográficas del mapa de pendiente en Porcentaje (izquierda) y de pendiente en Grados (derecha).	31
Figura 10. Compilación, validación y unificación de la información litológicas de las planchas Geológicas 205 y 224 a escala 1:100.000 de INGEOMINAS.....	34
Figura 11. Mapa geológico de la cuenca del Río San Francisco a escala 1:100.000.	37
Figura 12. Izquierda: Mapa estructural de la zona de estudio sobre el ráster de sombras. Derecha: Ráster de Distancia Euclidiana de fallas y lineamientos.	38
Figura 13. Jerarquización Geomorfológica propuesta por INGEOMINAS.....	41
Figura 14. Mapa geomorfológico de la subcuenca del río San Francisco bajo la clasificación de Subunidades de terreno modificada de Carvajal, 2011.	43
Figura 15. Mapa de ubicación de procesos morfodinámicos.....	47
Figura 16 Mapa de pendientes	48
Figura 17 Mapa de rugosidad	49
Figura 18. Mapa de curvatura del terreno.....	50
Figura 19. Mapa de curvatura en perfil.	51
Figura 20 Mapa de curvatura en planta.....	52
Figura 21. Mapa de insolación del área de estudio.	53
Figura 22 Mapa de orientación de la ladera.	54
Figura 23 Mapa de acumulación de flujo de aguas.	55
Figura 24 Mapa de la longitud de la cuenca acumulada.	56
Figura 25. Mapa de relieve relativo.....	57
Figura 26. Mapa Densidad de drenaje.....	58
Figura 27. Mapa de distancia drenajes.....	60
Figura 28. Mapa distancia vías.....	61
Figura 29. Mapa de susceptibilidad ante movimientos en masa.	64
Figura 30. Porcentaje de áreas de susceptibilidad a Movimientos en Masa (MM).....	65
Figura 31. Mapa de Áreas críticas según categorías de susceptibilidad ALTA y MEDIA ante movimientos en masa.	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de distribución de los municipios que alberga la subcuenca.....	18
Tabla 2. Factores de propensividad a la generación de inestabilidad	25
Tabla 3. Parámetros cartográficos para datos de tipo Vector y Ráster.	26
Tabla 4. Parámetros Ráster del Modelo Digital de Elevación (DEM).	29
Tabla 5. Rangos de Pendientes en porcentaje (%)	31
Tabla 6. Distribución del área de la cuenca para los rangos de pendientes en porcentaje..	32
Tabla 7. Distribución del área de la cuenca para los rangos de pendientes en grados.....	32
Tabla 8. Información cartográfica empleada.....	33
Tabla 9. Resumen de unidades geológicas en la cuenca.	36
Tabla 10. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos.	38
Tabla 10. Mapa de cobertura de la tierra y uso actual. Clasificación Corine Land Cover. ...	39
Tabla 11. Resumen de la distribución de los tipos de cobertura y uso actual del suelo para la subcuenca del río San Francisco.....	40
Tabla 12. Resumen de las subunidades geomorfológicas presentes en la cuenca.	43
Tabla 13. Catálogo de eventos morfodinámicos.....	44
Tabla 14. Procesos morfodinámicos identificados por fotointerpretación.....	45
Tabla 15. Resumen total de eventos morfodinámicos.....	45
Tabla 16. Total de eventos morfodinámicos para la cuenca del río San Francisco.....	46
Tabla 17 Calificación y categorización de curvatura del terreno	50
Tabla 18. Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al perfil.	51
Tabla 19 Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal.	52
Tabla 20. Calificación y categorización de la orientación de la ladera.....	54
Tabla 21. Calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua.....	60
Tabla 22 Calificación y categorización de la distancia a vías.	62
Tabla 23. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos.	62
Tabla 24. Análisis de susceptibilidad frente a fenómenos de MM.	65
Tabla 25. Distribución por veredas de las áreas susceptibles a MM.....	66
Tabla 26. Distribución de áreas de susceptibilidad ante Movimientos en Masa por municipio.	67

RESUMEN

En las últimas décadas, los efectos por la ocurrencia de movimientos en masa en la región cafetera se han visto incrementados, siendo los recientes periodos invernales los de mayor afectación en todos los sectores productivos. Esta sucesión de eventos ha causado en los sectores de vivienda, infraestructura de transporte y agricultura las mayores pérdidas, debidas principalmente a la ocurrencia de movimientos en masa en las zonas de ladera.

Diferentes autores han publicado versiones dirigidas a determinar los factores o combinación de factores y su incidencia en la generación de movimientos en masa (Varnes, 1984; Dikau et al., 1996; Turner & Schuster, 1996; Popescu, 2002; van Westen et al., 2008). Sin embargo, se debe tener presente que el tipo e importancia de cada factor considerado para explicar la susceptibilidad a un fenómeno de remoción en masa depende del marco geoambiental (relieve, geología, geomorfología y procesos morfodinámicos) y puede diferir sustancialmente de un área a otra debido a diferentes condiciones del terreno (Corominas et al., 2013).

Por tanto, el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa se realizó a partir de una evaluación de factores de propensividad dentro de un análisis multivariante discriminante para la asignación de coeficientes o pesos con el método de Superposición Ponderada, dentro de una función discriminante ajustada por una variable de agrupación definida como sitios estables e inestables.

A partir de los análisis efectuados, se elabora el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa para la zona de interés, en donde se han identificado los sectores con baja, media y alta susceptibilidad para este tipo de eventos.

La mayor parte de las zonas de alta susceptibilidad se pueden encontrar en la parte central de la cuenca y sobre todo el flanco oriental montañoso, en donde se ubica el municipio de Marsella. Existen áreas de laderas con pendientes menos pronunciadas con categoría de susceptibilidad media distribuidas en mayor medida sobre la parte más alta de la cuenca al sur y sobre sus zonas más bajas al norte en inmediaciones a la central hidroeléctrica de la CHEC. Las zonas de susceptibilidad baja se distribuyen aleatoriamente sobre parte de la cuenca y se concentran sobre pequeñas áreas en la parte alta y baja de la cuenca.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas tres décadas, a raíz de la ocurrencia de desastres de origen natural, se han expedido en Colombia reglamentaciones relacionadas con la administración y desarrollo físico del territorio, la utilización del suelo y la gestión del riesgo de desastres, cuya adopción ha requerido de la elaboración de estudios técnicos que permitan tomar decisiones efectivas de planificación y al mismo tiempo incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios¹.

Existen diferentes propuestas metodológicas y herramientas para el estudio de susceptibilidad por movimientos en masa, cuyo nivel de complejidad y necesidad de información varía dependiendo del alcance propuesto en el estudio y esto a su vez también depende de las características geológicas y ambientales del territorio, la escala de trabajo, la disponibilidad de información o incluso las capacidades técnicas y económicas de que se dispongan.

Sin embargo, independientemente del método a aplicar y dentro de los insumos geoambientales, el inventario de procesos morfodinámicos representa una de las variables más importantes en el análisis de susceptibilidad como sustento para establecer la relación entre un factor o combinación de factores condicionantes y la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa en una determinada zona. Por tanto, el análisis del inventario de procesos morfodinámicos debe permitir plantear las hipótesis sobre las zonas más o menos propensas a la inestabilidad (susceptibles), las cuales serán comprobadas y validadas a partir de estadística y criterio experto, ya que estas están basadas en el número y en la densidad de deslizamientos por área, así como en la probabilidad espacial relativa de la zona de estudio

Como ya se ha mencionado anteriormente, para la ejecución de este tipo de estudios es indispensable y obligatorio el levantamiento o recolección de información temática de geología, geomorfología, cobertura de la tierra y uso del suelo a la escala de trabajo deseada o requerida, a partir de la cual serán elaborados los respectivos productos cartográficos (mapas). Cabe aclarar que no es objetivo del presente estudio describir cada uno de los conceptos, técnicas y método para la elaboración de esta cartografía temática, ya que este documento se enfoca más que todo en la utilidad que tiene los SIG y la aplicabilidad que tienen en la resolución de problemáticas relacionadas a la ocurrencia de movimientos en masa; de igual forma, se resalta los tipos de datos o insumos que se pueden tomar y generar a partir de cartografías base mediante el uso de herramientas geográficas, bien sea de uso libre o licenciadas, y que son requeridas en los respectivos procesamientos digitales para la posterior zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa.

¹ Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. SGC. 2017.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

Durante las últimas décadas la frecuencia y severidad de desastres naturales como terremotos, derrumbes, inundaciones, etc. han aumentado significativamente en las zonas occidentales de la cordillera central de Colombia, en especial en la zona del eje cafetero. La combinación de estos peligros, la concentración de la población a menudo en zonas peligrosas, la falta de infraestructura adecuada y la política de gestión de riesgo causan un impacto devastador en la vida humana, la economía y el medio ambiente.

El área del presente estudio corresponde a la subcuenca del río San Francisco, la cual se encuentra ubicada en el centro-occidente de Colombia, entre los departamentos de Risaralda y Caldas. Hace parte de la jurisdicción de las Corporaciones Autónomas Regionales de Risaralda y Caldas – CARDER- CORPOCALDAS.

Las aguas del Río San Francisco nacen a 2200 m en el cerro el chuzo del departamento de Risaralda y recibe aportes de las quebradas que nacen en los cerros el Nudo, el Rayo y el Chaquiro para posteriormente desembocar sus aguas en el río Cauca a los 870 m. Este río aporta a la producción agropecuaria y principalmente a la generación de energía eléctrica por la Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC. Es hogar de especies de fauna y flora tales como armadillos, guatines, ranas, serpientes, aves, peces y monos nocturnos.

La funcionalidad territorial e importancia que se presenta entre esta cuenca hidrográfica y el área circunvecina, permiten garantizar una conectividad estratégica para el territorio, que puede entenderse como un área “bisagra” que enlaza el occidente del país al desarrollo del Área Metropolitana y las regiones rurales, de ahí la importancia de mirar las diferentes alianzas territoriales en el marco del proceso del Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas - POMCA.

Sin embargo, a pesar del tremendo progreso en ciencia y tecnología, los fenómenos naturales han afectado considerablemente a las condiciones socioeconómicas no solo de la subcuenca del río San Francisco sino a todas las regiones del globo. Es muy difícil recuperar completamente el daño causado por desastres naturales, pero es posible minimizar la vulnerabilidad y reducir el riesgo. El seguimiento de los fenómenos naturales, la evaluación de su impacto y la compleja evaluación del riesgo son pasos decisivos hacia la selección y dimensionamiento de medidas de protección adecuadas [2], [3].

Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la susceptibilidad ante Movimientos en Masa para la subcuenca del río San Francisco aplicando un modelo cartográfico conocido como Superposición Ponderada, a partir de información disponible y el conocimiento técnico. La susceptibilidad de las laderas en la zona de estudio se evaluará en base a información geoambiental suministrada en el POMCA del río Campoalegre del año 2009.

² J. Pollner, J. Kryspin-Watson, and S. Nieuwejaar. *Disaster Risk Management and Climate Change Adaptation in Europe and Central Asia*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery: The World Bank, 2010.

³ Ch. S. Melching and P. J. Pilon (Eds.) *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards*, WMO/TD No. 955, 2006.

2. HIPÓTESIS

El método cartográfico de superposición ponderada representa un procedimiento muy eficaz y acertado en el análisis y la estimación de la susceptibilidad a fenómenos naturales por remoción en masa y para la posterior toma de decisiones.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la susceptibilidad a fenómenos naturales de movimientos en masa mediante el método de superposición ponderada. Caso de estudio subcuenca del río San Francisco en los departamentos de Caldas y Risaralda.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros y las variables geoambientales de la zona de estudio como insumo cartográfico base para el análisis de las funciones condicionantes del terreno.
- Determinar las variables ráster derivadas del Modelo Digital del Terreno.
- Evaluar la susceptibilidad a fenómenos naturales por movimientos en masa a partir de las ponderaciones de las variables detonantes y condicionantes del terreno.
- Delimitar las zonas de susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca como producto para las futuras tomas de decisiones.

4. JUSTIFICACIÓN

La valoración de susceptibilidad es un tema importante para la gestión responsable del riesgo y la sostenibilidad del desarrollo regional del territorio colombiano. Este proyecto presenta un modelo de Superposición Ponderada para la estimación de la susceptibilidad a fenómenos naturales de movimientos en masa en la región occidental de la cordillera central, como primer paso para las futuras priorizaciones y caracterizaciones de los escenarios de riesgo. El cuerpo de este estudio se construyó sobre la base de fuentes de información secundarias disponibles.

La subcuenca del río San Francisco se localiza sobre la vertiente occidental de la cordillera central y hace parte de la zona hidrográfica del río Cauca. Nace en las microcuencas La Albania y La Grecia, en la porción correspondiente al municipio de Dosquebradas, mientras que la porción media de la subcuenca corresponde en su mayor parte a los municipios de Marsella al occidente y Santa Rosa de Cabal al oriente, así como su parte baja sobre territorio del municipio de Chinchiná, Santa Rosa de Cabal y Marsella⁴.

La sección longitudinal del río San Francisco hace parte de una subcuenca compartida municipalmente, de importancia local y regional ya que es fuente generadora de energía para la Central Hidroeléctrica de Caldas – CHEC y abastecedora de varios acueductos veredales, además de estar relacionada con procesos productivos que favorecen la sustentabilidad social y económica de las comunidades asentadas en su territorio.

Esta subcuenca presenta diversidades de unidades geológicas y ambientes geomorfológicos, que hacen posible encontrar condiciones geotectónicas particulares para hacer de esta subcuenca una zona diversa y con multiplicidad de factores que condicionen el aprovechamiento de sus recursos y que eventualmente tipifiquen la naturaleza a la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa.

Por lo anterior, existe la necesidad de realizar un minucioso análisis de la susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa. Con las actuales condiciones de crisis económica mundial y los limitados recursos para la prevención y la mitigación de riesgos, se requieren procesos de toma de decisiones basados en confiables investigaciones y en actividades de gestión del riesgo lo más precisas posible.

Hay muchos métodos cualitativos y cuantitativos para la evaluación de la susceptibilidad, sin embargo, hay que señalar que la evaluación y la zonificación de la susceptibilidad generada por peligros naturales se realiza en muchas ocasiones bajo condiciones subjetivas e inciertas.

⁴ Informe final Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Campoalegre, sector San Francisco. CARDER – CORPOCALDAS, 2014.

5. MARCO CONCEPTUAL

Este trabajo trata los conceptos claves del objeto teórico (gestión del riesgo) y del objeto práctico (el análisis de la susceptibilidad por MM), los antecedentes relativos y el estado del arte de los mismos como modelo estadístico – cartográfico de la gestión del riesgo.

La información conceptual siguiente corresponde primeramente a las Normas Técnicas Colombianas, la cual hace referencia a la forma con la que debe recolectarse, procesarse y entregarse cualquier tipo de dato o información geográfica asociada. Seguidamente se mencionan las consideraciones pertinentes y relativas al marco general legal de la gestión del riesgo y de su respectivo protocolo metodológico para su implementación. Por último, se discriminan algunos conceptos generales obtenidos de la guía metodológica para POMCAs como instrumento práctico para la implementación de la gestión del riesgo en cuencas hidrográficas.

5.1. NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS:

5.1.1. NTC 4611: Información Geográfica. Metadatos.

Esta norma define el esquema requerido para describir la información geográfica análoga y digital. Proporciona información acerca de identificación, extensión, calidad, esquema espacial y temporal, referencia espacial y distribución, para un conjunto cualquiera de datos geográficos.

Esta norma es aplicable a todas las formas de datos geográficos, sean ellos conjuntos de datos geográficos, series de datos, objetos o atributos geográficos individuales.

5.1.2. NTC 4611: Información Geográfica. Conceptos básicos de la calidad de los datos geográficos.

Esta norma proporciona los conceptos básicos para describir la calidad de los datos geográficos disponibles en formato digital y análogo; presenta un modelo conceptual que facilita el manejo de la información sobre la calidad de dichos datos geográficos.

Esta norma establece los elementos, subelementos y descriptores de la calidad utilizados por los productores para determinar si un conjunto de datos cumple la función de representar un universo abstracto de conformidad con las especificaciones del producto. Igualmente, los usuarios pueden usar los requisitos de esta norma para establecer si un conjunto de datos cumple o no con la calidad para una aplicación específica.

5.1.3. NTC 5660: Información Geográfica. Evaluación de la calidad, procesos y medidas.

Esta norma establece los parámetros y procesos necesarios para evaluar la calidad de la información geográfica, con el fin de determinar el grado en que los datos cumplen con los requisitos establecidos en la especificación técnica del producto y que sirvan de base para su perfeccionamiento y esta armonizada con la NTC 5043.

5.2. MARCO GENERAL LEGAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN POMCA

5.2.1. Decreto 1729 de 2002:

Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Entiéndese por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

El uso de los recursos naturales y demás elementos ambientales de la cuenca, se realizará con sujeción a los principios generales establecidos por el Decreto-ley 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, sus normas reglamentarias y lo dispuesto en el presente Decreto.

5.2.2. Ley 1523 de 2012:

El gobierno nacional actualizó su legislación en materia de gestión del riesgo de desastres mediante la expedición en abril de 2012 de la Ley 1523, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres; Esta ley genera un marco conceptual e institucional enfocado al riesgo y su construcción, así como en su reducción y la rendición de cuentas de los municipios entorno al mismo.

5.2.3. Decreto 1640 de 2012:

De acuerdo con lo establecido en el Decreto 1640 de 2012, el cual incluye la gestión del riesgo en la planificación territorial y define las directrices para la ordenación de cuencas (artículo 19): “(...) la prevención y control de la degradación de los recursos hídricos y demás recursos naturales de la cuenca (...)” y “(...) el riesgo que pueda afectar las condiciones físico-bióticas y socioeconómicas en la cuenca, incluyendo condiciones de variabilidad climática y eventos hidrometeorológicos extremos (...)”, se desarrolló la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA- (expedida mediante la Resolución 1907 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

5.3. GUÍA TÉCNICA PARA LA FORMULACIÓN DE LOS PLANES DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS – POMCA:

5.3.1. Geología:

La información geológica a recolectar tiene como objetivo identificar y localizar los diferentes tipos de rocas y depósitos geológicos, su distribución lito estratigráfica y sus características estructurales existentes en la cuenca a escala 1:25.000 (preferiblemente) para ordenación de cuencas hidrográficas. Labor que debe fundamentarse en la definición de atributos tales como: litología de las rocas y depósitos (génesis, composición, textura, empaquetamiento, porosidad y permeabilidad), considerados entre otros como los parámetros mínimos requeridos.

5.3.2. Geomorfología:

El levantamiento geomorfológico está dirigido a proporcionar información concisa, sistemática y debidamente jerarquizada de las geoformas de la cuenca, la definición y caracterización de los procesos morfodinámicos y los fenómenos naturales conexos. Para su caracterización se consideran las metodologías de trabajo que desarrollan las entidades del Estado cuya misión es el avance del conocimiento de los suelos (IGAC-Metodología Zinck, 2012), y la evaluación de las amenazas naturales (SGC-metodología Carvajal-2011), cuyo marco de jerarquía difiere ligeramente en los niveles de categorización y conceptualización genérica.

5.3.3. Gestión del Riesgo:

Los alcances de la gestión del riesgo en los POMCAs buscan definir acciones y medidas para el manejo, administración y conservación de los recursos naturales renovables; una ocupación del territorio de forma segura; así como crear conocimiento para la reducción y manejo del riesgo en la cuenca.

5.3.4. Susceptibilidad:

Corresponde a la probabilidad de que un evento ocurra en un área, en base a las condiciones locales del terreno. La susceptibilidad no considera la probabilidad temporal del evento (por ejemplo, cuando o cuan frecuentemente ocurre) ni la magnitud esperada (cuán grande o destructivo). Se realiza a partir de un análisis heurístico e histórico, basándose en una visión retrospectiva de los eventos sucedidos, de ciertas características geomorfológicas, hidrológicas o edafológicas, en donde se califica su mayor o menor predisposición ante los movimientos en masa.

5.3.5. Amenaza:

La Guía Técnica para POMCAs lo define como la probabilidad que un evento de una magnitud dada ocurra en un periodo dado de tiempo en una determinada área. Tomando

en consideración las zonas establecidas como de susceptibilidad alta y media y los levantamientos de geología para ingeniería a escala 1:25.000 en áreas críticas, se establecerá la evaluación de la amenaza por MM en la cuenca, siendo como mínimo requerido el uso de métodos determinísticos para dicho análisis con base en el Factor de seguridad.

5.3.6. Vulnerabilidad:

Se define para los POMCAS como el grado de fragilidad de los diferentes elementos y sectores (económico, social y ambiental) para soportar el embate de los eventos amenazantes involucrados dentro del estudio de cuencas hidrográficas, establecido a través del análisis de índices e indicadores particulares que los caracteriza; se mide como un índice de fragilidad y varía de acuerdo a esta propuesta entre cero y tres.

5.3.7. Riesgo:

Para aplicación en POMCAS y dado los niveles de información existente y los desarrollos propuestos, plantea que el riesgo se calcule como la operación de la probabilidad de ocurrencia del evento amenazante por el Índice de Vulnerabilidad.

5.4. OTROS CONCEPTOS

5.4.1. Movimientos en Masa (SGC):

El término movimiento en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de masas de roca, detritos o tierras por efecto de la gravedad⁵. Las clasificaciones de movimientos en masa son numerosas, según sus autores, escuelas, países de origen o el perfil profesional de quienes tratan el tema. La mayoría de los autores adoptan como criterios de clasificación los mecanismos de falla de los movimientos, los tipos de materiales involucrados, la actividad de los movimientos y su velocidad. Otros consideran factores tales como la edad, las formas de relieve (pendiente), su ubicación geográfica, el clima y la afectación de laderas, cauces o taludes construidos por el hombre.

5.4.2. Superposición Ponderada (ESRI):

Método cartográfico que permite la realización de un análisis de criterios múltiples entre varios rásteres en donde se superpone estos a una escala de medición común y se pondera cada uno según su importancia. El peso es un porcentaje relativo, y la suma de las ponderaciones de influencia de porcentaje debe ser igual a 100. Las influencias se especifican por medio de valores enteros únicamente. Los valores decimales se redondean a la baja hasta el entero más cercano.

⁵ Cruden 1991 en PMA-GCA 2007.

6. MARCO REFERENCIAL

El presente informe da cuenta de las actividades, insumos y productos a tener en cuenta para el análisis de la susceptibilidad a Movimientos en Masa para la subcuenca del río San Francisco. Actividades que fueron basadas en los procedimientos y la metodología propuesta en la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA- (expedida mediante la Resolución 1907 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1640 de 2012, el cual incluye la gestión del riesgo en la planificación territorial y define las directrices para la ordenación de cuencas (artículo 19): “(...) la prevención y control de la degradación de los recursos hídricos y demás recursos naturales de la cuenca (...)” y “(...) el riesgo que pueda afectar las condiciones físico-bióticas y socioeconómicas en la cuenca.

El desarrollo de la temática de gestión del riesgo se considera un apartado novedoso desde un punto de vista integral con las demás temáticas de la Guía Técnica del POMCA. Por tanto, se aporta dicho protocolo como una herramienta de apoyo respecto de los métodos y las técnicas a aplicar para la obtención de los productos contemplados en los alcances técnicos del Ajuste o Elaboración de POMCAs para los “Proyectos de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas afectados por el fenómeno de La Niña 2010-2011, en los cuales se incorporará el componente de gestión del riesgo como determinante ambiental del ordenamiento territorial”.

Gran parte de la información aquí presentada fue suministrada por la Corporación Regional de Risaralda (CARDER) a partir del informe con Contrato No. 284 de 2013 celebrado entre Corpocaldas y Gestión, Ambiente y Territorio S.A.S, la cual tenía como objetivo *Aportar Insumos con Énfasis en la Temática de Gestión del Riesgo para la Revisión y Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo del Nivel Subsiguiente del Río Campoalegre y Otros Directos al Cauca*, en particular el sector de la Subcuenca San Francisco, donde se analizan las amenazas por fenómenos de remoción en masa e incendios forestales, así como la vulnerabilidad ante desabastecimiento por dichos fenómenos, para acueductos rurales involucrados en la Subcuenca en mención.

La Subcuenca del río San Francisco, pertenece a la hoya hidrográfica del río Cauca, y aunque corresponde geográficamente a la vertiente occidental de la cordillera central, geológicamente se traslapa con unidades del basamento que se correlacionan con el socalo de Cordillera Occidental, mientras en la porción distal, presenta una zona de piedemonte intercordillerana ⁶.

Limita por toda su zona nororiental con la cuenca del río Campoalegre, en particular con las microcuencas La Estrella y del río Campoalegre, mientras en su sector oriental con las microcuencas Santa Rita – La Siria, La Mica – Miraflores, El Rayado y la cuenca La Nona, y al sur con varias microcuencas de la cuenca Otún (Ver figura 1).

⁶ Informe final Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Campoalegre, sector San Francisco. CARDER – CORPOCALDAS, 2014.

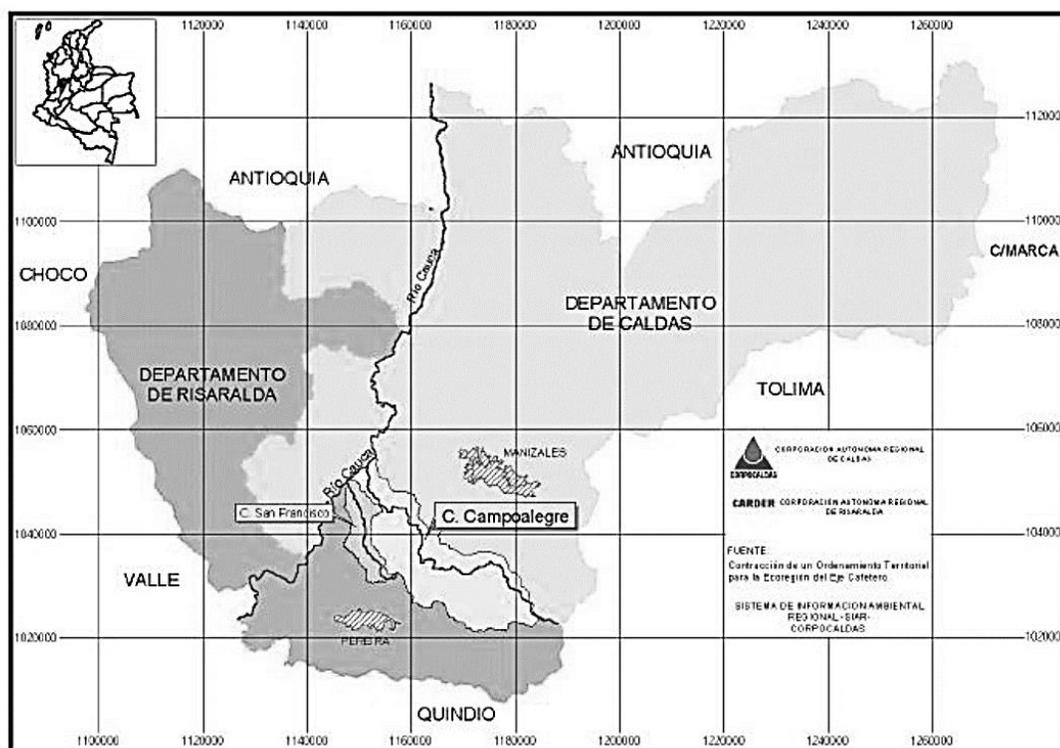


Figura 1. Localización a nivel departamental de la cuenca del río Campoalegre y la subcuenca del río San Francisco.
Fuente: CORPOCALDAS.

A partir del polígono de la delimitación de la subcuenca del río San Francisco entregado por la Corporación de Risaralda – CARDER (en tipo de formato Shape), fue posible la obtención de datos geográficos y político administrativos de la participación y distribución de cada uno de los municipios y veredas que hacen parte de dicha cuenca (Ver Tabla 1). Este proceso se realizó mediante el procesamiento cartográfico con el software ArcGis, del cual se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 1. Porcentaje de distribución de los municipios que alberga la subcuenca.

DEPARTAMENTO	COD_MUNICIPIO	NOMBRE	AREA_MUNICIPIO_Ha	AREA_CUENCA_Ha	% PARTICIPACIÓN	% MUN_CUENCA
Risaralda	66440	Marsella	14958.520	4373.221	29.24%	45.56%
Caldas	17174	Chinchiná	10911.837	3349.238	30.69%	34.89%
Risaralda	66170	Dosquebradas	7020.401	491.895	7.01%	5.12%
Risaralda	66682	Santa Rosa de Cabal	54368.210	1384.083	2.55%	14.42%
Total general				9598.438		100.00%

Fuente: este estudio

En la tabla anterior se resumen los nombres de los municipios que hacen parte de la zona de estudio, así como el área total de estos y su correspondiente área dentro de la subcuenca, que a su vez sirvieron para obtener el porcentaje de la distribución dentro de la misma. En la subcuenca del río San Francisco tienen jurisdicción los municipios de Santa Rosa de Cabal, Marsella y Dosquebradas del departamento de Risaralda, mientras que, para el departamento de Caldas, incluye el sector occidental del municipio de Chinchiná. La cuenca abarca en total una extensión de 9598.438 ha, de las cuales el 65% corresponde a Risaralda y el 35% restante a Caldas (Ver Figura 2).

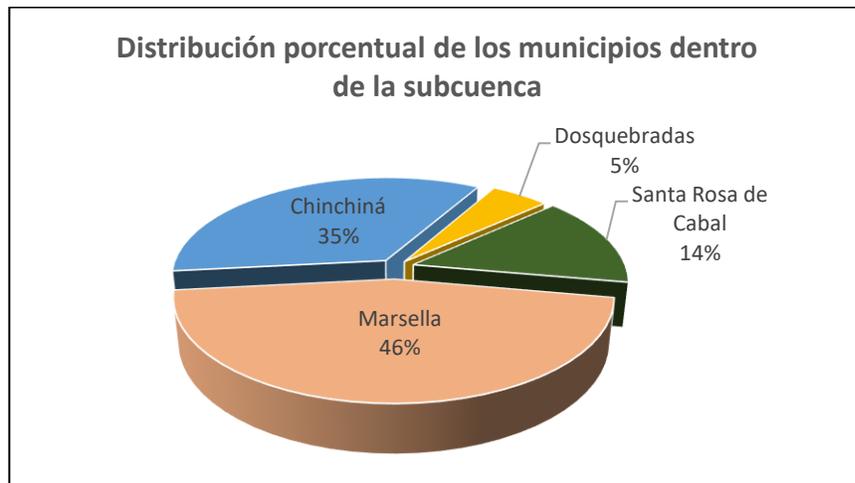


Figura 2. Distribución de los municipios en la subcuenca de San Francisco.
Fuente: este estudio

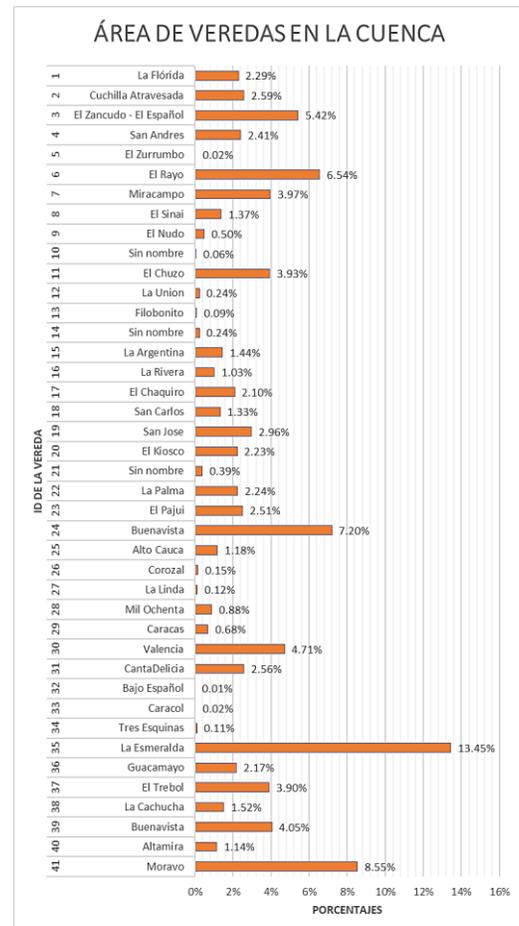
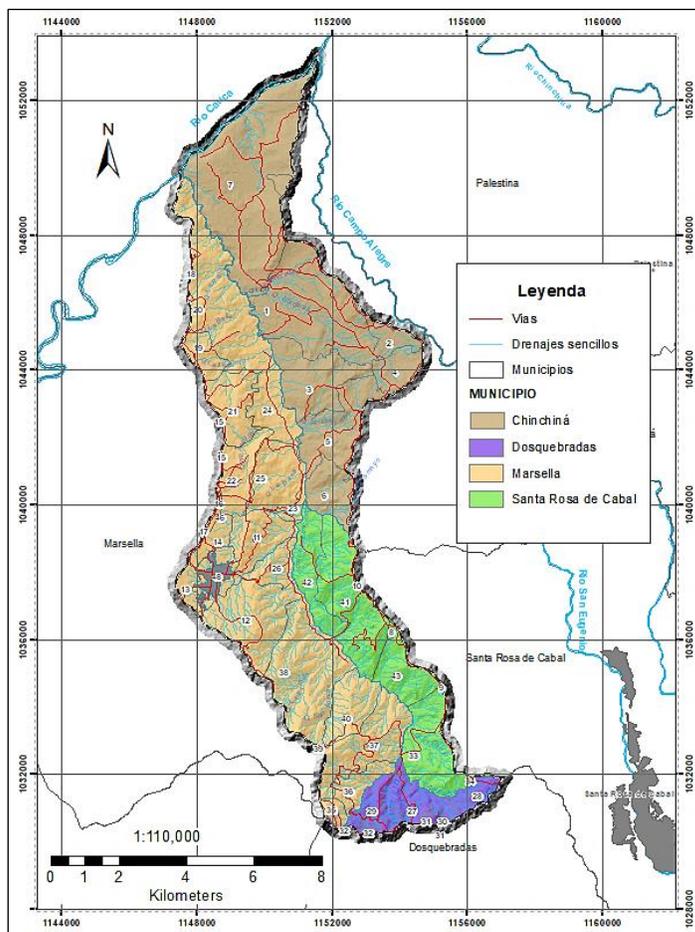


Figura 3. Izquierda: Mapa ubicación veredal según distribución municipal. Derecha: Representación porcentual del área de cada vereda dentro de la cuenca.
Fuente: este estudio.

7. METODOLOGÍA

En la presente investigación se utilizarán las técnicas de superposición ponderada para el manejo, procesamiento, análisis y modelamiento de la información espacial geológica, geomorfológica, de cobertura de suelo, actividad sísmica y aspectos sociales para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa para una zona con alta incidencia y propensividad a diferentes fenómenos naturales y, con esto, lograr un conocimiento más acertado de las condiciones locales en la que se encuentra la cuenca hidrográfica a la hora de una toma de decisión social.

La metodología que se utiliza aquí es un análisis de toma de decisiones de criterios múltiples que ayuda a examinar los factores de propensividad de una manera flexible y fácilmente comprensible [7]. Para lograr el desarrollo del trabajo se empleará información secundaria que estará sometida a un exhaustivo procesamiento y análisis con el propósito de lograr resultados confiables que puedan generar confianza en el análisis de riesgo por fenómenos naturales de movimientos en masa.

La siguiente figura ilustra el esquema metodológico que será utilizado para llevar a cabo la realización de la propuesta del presente proyecto:

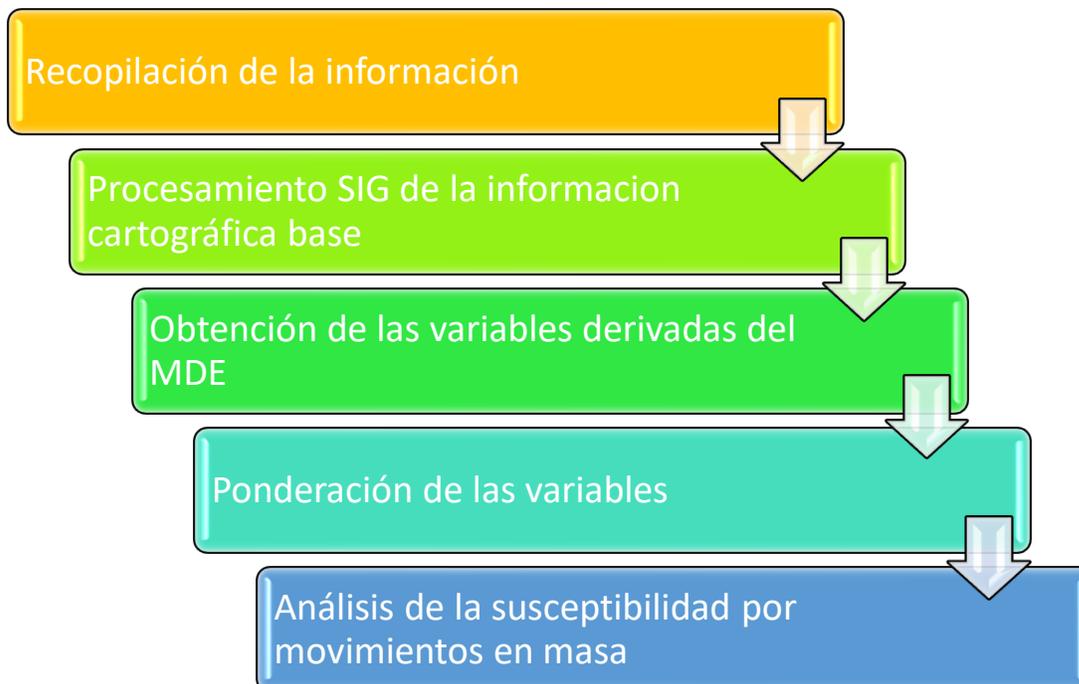


Figura 4. Actividades generales de trabajo para la ejecución del proyecto.

Fuente: este estudio

⁷ Dragan Pamucar¹, Darko Bozanic¹, Nenad Komazec¹, Risk Assessment of Natural Disasters Using Fuzzy Logic System of Type 2, University of Defense in Belgrade, Military Academy, Serbia.

A continuación, se describen de forma general las etapas o actividades del proyecto:

7.1. Recopilación de la información

Dentro de la primera etapa de desarrollo, se recopiló y analizó la información que permitía construir la base de apoyo documental existente sobre la subcuenca del río San Francisco. Esta información incluyó tanto cartografía como informes relacionados con los aspectos físico-bióticos, sociales y de gestión del riesgo. Respecto a este último aspecto, se revisó no solo la información relacionada con las condiciones intrínsecas del suelo y el subsuelo o variables primarias, sino que también aquellas asociadas con las características del terreno y derivadas del Modelo Digital de Superficie o variables secundarias, esto con el fin de lograr una mirada más amplia y holística de aquellos factores que influyen directamente en la generación de movimientos en masa.

Gran parte de esta importante información fue tomada del informe final “APORTE DE INSUMOS CON ÉNFASIS EN LA TEMÁTICA DE GESTIÓN DEL RIESGO PARA LA REVISIÓN Y AJUSTE DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DEL NIVEL SUBSIGUIENTE DEL RÍO CAMPOALEGRE Y OTROS DIRECTOS AL CAUCA - SECTOR SAN FRANCISCO” realizado el 2014 por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER) en convenio con la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS).

7.2. Preprocesamiento y modelamiento de las variables cartográficas.

En esta etapa se seleccionó la información que se iba a ingresar al sistema, luego, se modeló, estructuró y escogió el software a utilizar teniendo en cuenta las características de procesamiento y modelamiento espacial. Una vez se tuvo la información disponible se pasa a un proceso de edición de la información mediante ajustes espaciales (Información vectorial y Modelo Digital del Terreno), digitación y estructuración de todas las capas de información en el cual se han manejado información en diferentes formatos, tales como gdb, shp, jpg, tif, dbf, entre otros.

El primer paso en este proceso es la determinación de variables de acuerdo al evento y a las características de las zonas de estudio; para lo cual se estableció que las variables condicionantes son: pendiente de ladera, pendiente senoidal, rugosidad, curvatura, curvatura longitudinal, curvatura transversal, orientación de la ladera, relieve relativo, insolación, distancia a drenajes, distancia a vías, distancia a fallas y lineamientos, acumulación de cuenca, longitud de cuenca acumulada, pendiente media de cuenca vertiente, geología, dirección de flujo, geomorfología y cobertura del suelo.

Con base en un modelo simple de ladera propuesto en este estudio y teniendo en cuenta el mapa conceptual presentado a continuación, se describen en forma secuencial los principales elementos a tener en cuenta para la aplicación del método. La Figura 5

muestra el mapa conceptual para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa (MM).

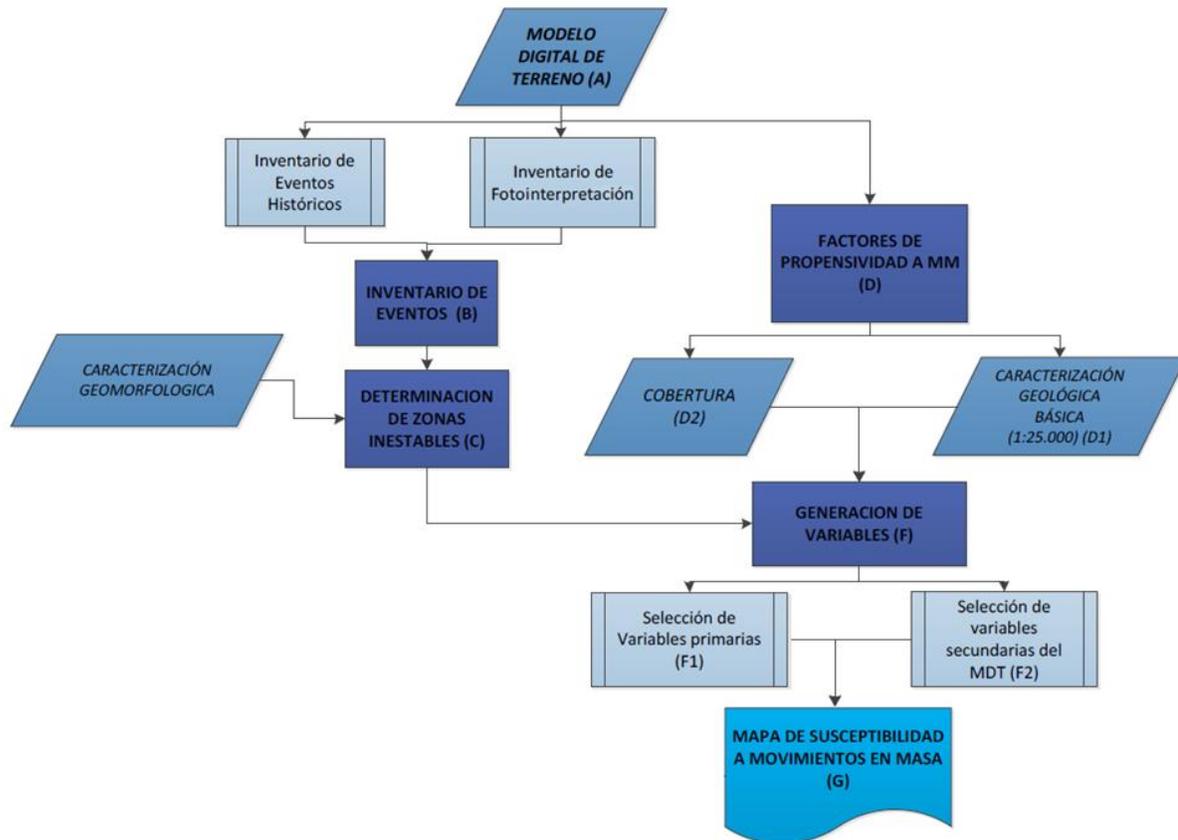


Figura 5. Diagrama conceptual de insumos cartográficos para la evaluación de la susceptibilidad a eventos de movimientos en masa.

Fuente: Modificado del Protocolo de gestión del riesgo para POMCAs, 2014.

7.3. Análisis de los resultados.

En esta etapa se generó los resultados obtenidos durante la aplicación del proceso superposición ponderada por medio de la relación de los diversos aspectos físico – bióticos, estandarizados en la primera etapa de esta metodología.

Como el procesamiento de los datos de nuestro modelo se llevó a cabo principalmente con la utilización de herramientas de la tecnología de la información geográfica y con múltiples salidas cartográficas y mapas temáticos, se propuso finalmente hacer un análisis de los resultados que se puedan obtener del método matemático de Superposición Ponderada a partir del procesamiento GIS y la posterior priorización de zonas críticas. Esta herramienta permitió analizar las variables y características espaciales que hacen parte de los ambientes morfométricos y que condicionan la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa. A partir de la información conseguida,

se elaboró tablas, gráficas y mapas que facilitarán al lector la interpretación de los resultados y de las condiciones reinantes del área de estudio.

8. RESULTADOS OBTENIDOS

Este estudio se presenta como un aporte a los procesos de ordenamiento territorial y gestión del riesgo para eventos de movimientos en masa, elaborado a partir de revisión bibliográfica, discusión con expertos y la experiencia del desarrollador en este tipo de trabajos, sin pretender constituir una norma, tratado o compendio exhaustivo de una técnica de uso obligatorio para el análisis de la susceptibilidad. Comprende una metodología práctica basada en el protocolo de desarrollo para POMCAs que permite adelantar estudios con una rigurosidad técnica en la obtención de resultados de calidad.

Los parámetros geológicos, geomorfológicos, de cobertura y uso del suelo y geométricos propios del área en estudio generan un conjunto de variables las cuales permiten explicar la potencial aparición de zonas de inestabilidad en el área. A cada una de las variables se le atribuye de forma general un significado en relación a su papel de favorecer o reducir la posibilidad de inestabilidad en el área. El método trata en lo posible de obtener en forma automática o semiautomática el mayor número de variables que influyen en la estabilidad de las laderas, razón por la cual la mayor parte de las variables utilizadas se derivan del modelo digital de elevación (MDE).

Para clasificar las variables se requirió analizar el tipo de información que estas proporcionan, convirtiéndose así en factores o variables de propensividad a la ocurrencia y generación de MM.

Con base en la cartografía base (variables cuantitativas):

- Modelo digital de elevación (MDE)
- Pendiente
- Orientación de las laderas
- Insolación: es una variable derivada del MDE genera mediante el SIG
- Distancia a vías y carreteras
- Distancia a cauces
- Densidad de drenaje
- Tamaño de la cuenca

Con base en la cartografía temática:

- Geología básica a escala 1:100.000
- Densidad de fracturamiento obtenido a partir de la cartografía geológica básica.
- Cobertura y uso: salida cartográfica reclasificada producto del mapa de cobertura de la tierra.

En la tabla a continuación se presenta el resumen de los factores de propensividad a los Movimientos en Masa y las respectivas variables asociadas, como resultado cartográfico del presente estudio.

Tabla 2. Factores de propensividad a la generación de inestabilidad

VARIABLES PRIMARIAS		
GRUPO	VARIABLE	DEFINICIÓN
1. Geología	1.1 LITOL	Litología o clasificación del material por su origen
	1.2 DENSIFRAC	Densidad de fracturamiento
2. Cobertura del suelo	2.1 VEG	Tipo de cobertura
3. Geomorfología	3.1 GEOMORF	Geomorfología según clasificación de Carvajal (2011)
4. Localización de zonas inestables	4.1 ZON INES	Centroide de la zona de falla
VARIABLES DERIVADAS DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN		
GRUPO	VARIABLE	DEFINICIÓN
5. Elevación	5.1 MDT	Altura sobre el nivel del mar
GRUPO	VARIABLE	DEFINICIÓN
6. Geometría de ladera	6.1 PEND	Pendiente de la ladera
	6.2 ORIENT	Orientación o dirección de exposición de la ladera
	6.3 INSOL	Insolación o coeficiente de iluminación de la ladera
	6.4 ACUENCA	Área de la cuenca acumulada
	6.5 LONG	Longitud máxima de cuenca acumulada ponderada con la pendiente
	6.6 DENS-DREN	Densidad de los drenajes en la cuenca
	6.7 DIST-CAUCES	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el cauce, quebrada o río más cercano
	6.8 DIST-VIAS	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la vía más cercana

Fuente: modificado de Nuria (2001), Cardona, (2013).

Cabe aclarar que para el caso del mapa geológico 1:100.000 solo fue posible trabajar a esta escala, ya que llevarlo a una escala mayor como la 1:25.000 suponía verificar en campo, a partir de controles geológicos distribuidos sobre toda el área de estudio, cada una de las unidades litológicas señaladas por el Servicio Geológico Colombiano en las planchas suministradas, alcances que no son planteados para este tipo de proyecto exploratorio, ya que únicamente contempla la elaboración cartográfica temática a partir de información secundaria disponible.

9. VARIABLES CARTOGRÁFICAS PRIMARIAS

Con el fin de adelantar los estudios de susceptibilidad por movimientos en masa y favoreciendo el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se hace uso de información cartográfica y geoambiental requerida para el análisis físico de la cuenca.

Esta información básica del área de estudio fue provista por fuentes oficiales de datos, como, por ejemplo, la cartografía básica digital obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), las planchas geológicas producidas por el Servicio Geológico de Colombia (SGC) y la Cobertura y Uso Actual de la Tierra que fueron obtenidas a través de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER).

Todos las variables cartográficas anteriormente mencionadas y su correspondiente procesamiento serán presentadas en los siguientes apartados, las cuales son requeridas como insumo para el posterior análisis en el modelo cartográfico de Superposición Ponderada.

9.1. Sistema de referencia

Tanto los objetos geográficos como los productos fueron debidamente referenciados y proyectados de acuerdo al sistema de coordenada Magna Sirgas origen Oeste para Colombia y bajo los lineamientos exigidos en el documento *Tipos de Coordenadas manejadas en Colombia*, publicado por el IGAC en el 2004.

A continuación, se relacionan los parámetros espaciales utilizados tanto para los insumos como para las salidas cartográficas y mapas del presente estudio:

Tabla 3. Parámetros cartográficos para datos de tipo Vector y Ráster.

Sistema de Coordenada Proyectado:	MAGNA_Colombia_Oeste
Proyección:	Transverse Mercator
Falso Este:	1000000
Falso Norte:	1000000
Meridiano Central:	-77.077508°
Factor de Escala:	1
Latitud de Origen:	4.5962004°
Unidad Linear:	Metro
Sistema de Coordenada Geográfico:	GCS_MAGNA
Datum:	D_MAGNA
Prime Meridian:	Greenwich
Unidad Angular:	Grados

Fuente: Este estudio.

9.2. Información base vial

El IGAC como entidad dispone de datos abiertos para todas las personas, organizaciones y entidades que la requieran, con el fin de aportar y contribuir con la generación de nuevo conocimiento y apoyar la toma de decisiones del territorio colombiano⁸. La información de la cartografía base de gran parte del territorio colombiano se puede encontrar a escalas 1:500.000, 1:100.000 y 1:25.000, en formatos abiertos e interoperables con cualquier sistema.

De esta forma y, continuando con la identificación de datos fundamentales cartográficos, se accedió a la información de la plataforma de datos libres de la página oficial del IGAC (Consultada el 20 de febrero de 2019) para descarga de planchas cartográficas a escala 1:25.000, como se observa en la Figura 6, en la cual se relaciona las 6 planchas IGAC necesarias para la zona de interés y se evidencia la información faltante para las planchas 205-IV-A y 205-IV-C.

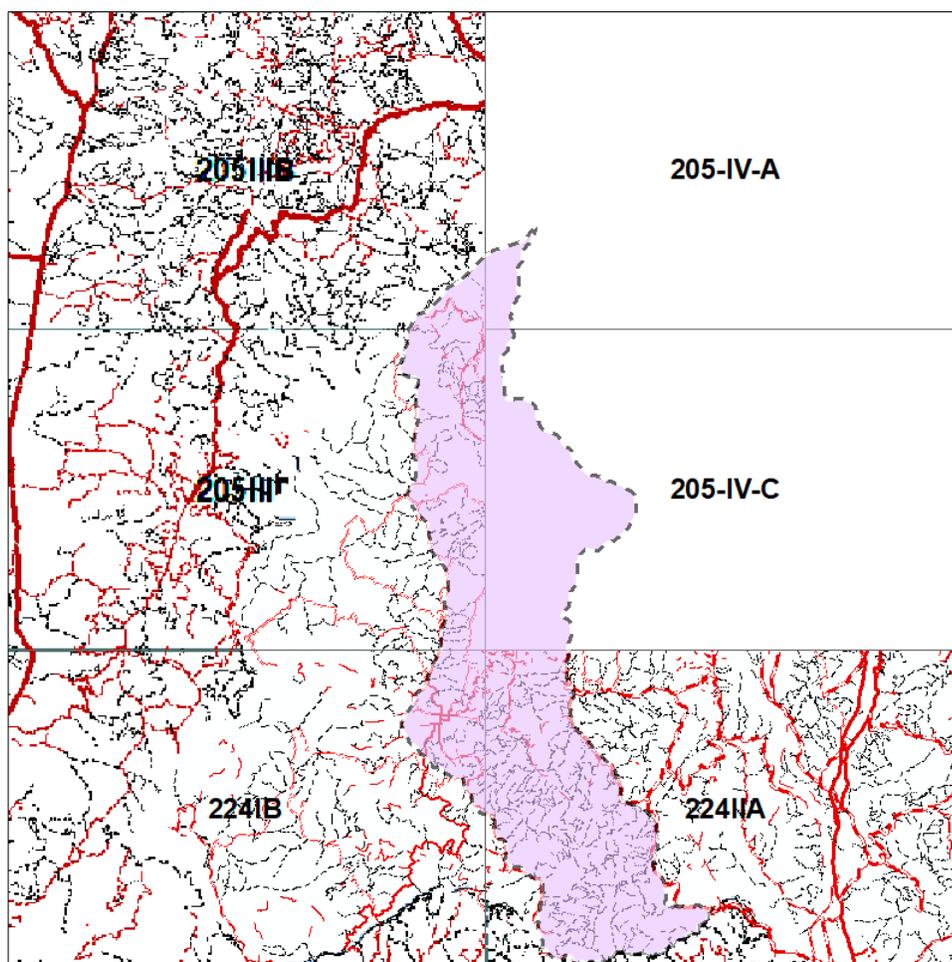


Figura 6. Índice de planchas IGAC e información faltante del área de estudio.
Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC.

⁸ <https://www.igac.gov.co/es/ide/datos-e-informacion/cartografia>

Para complementar la información base faltante de las mencionadas planchas, relacionadas con infraestructura social - vial, se procedió a la utilización de información de fuentes libres secundarias como la de Openstreetmap, la cual se asume como una fuente de información de relativa gran calidad y confiabilidad, ya que este funciona como un proyecto colaborativo de usuarios para crear mapas editables y libres en líneas, en donde los mapas se crean utilizando información geográfica capturada con dispositivos GPS móviles, ortofotografías y otras fuentes libres (Ver Figura 7).

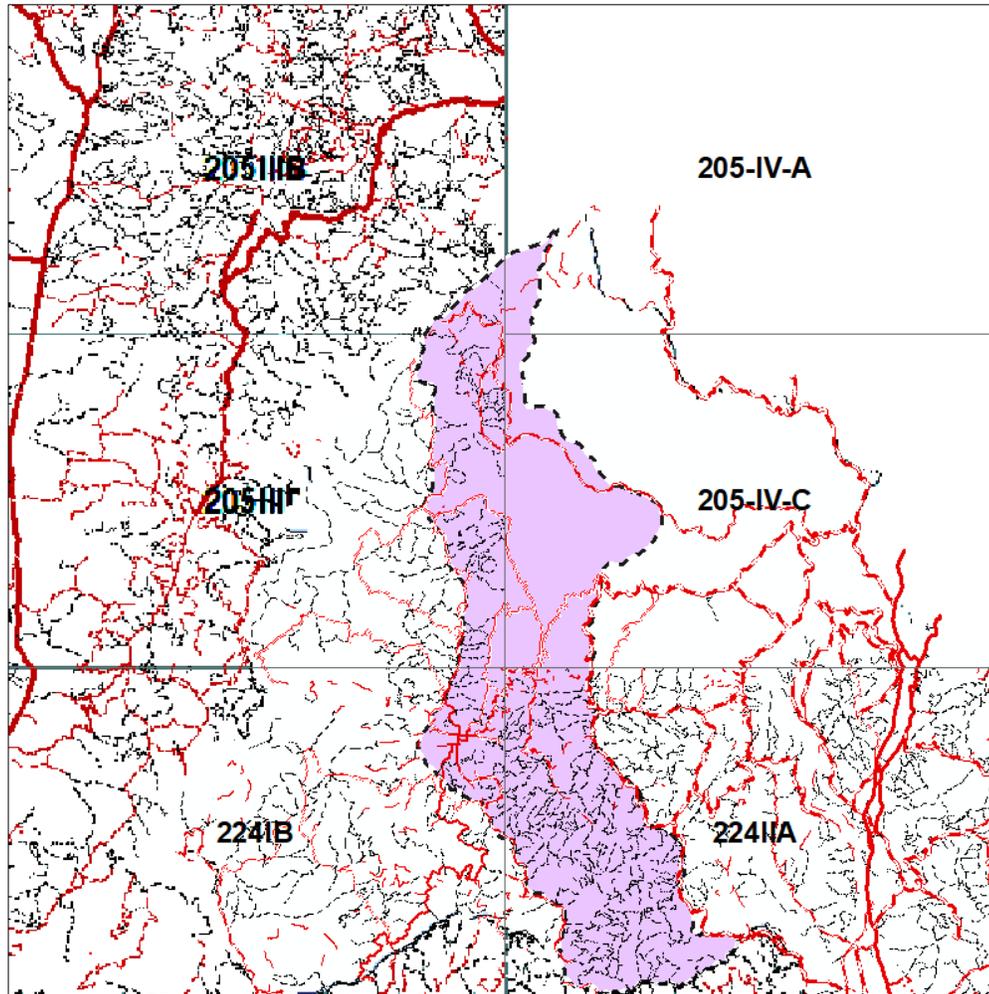


Figura 7. Información vial tomada de fuente secundaria en línea.
Fuente IGAC - Openstreetmap.

Este tipo de cartografía online de Openstreetmap, así como las imágenes creadas y los datos vectoriales almacenados en su base de datos, se distribuyen bajo licencia abierta Licencia Abierta de Bases de Datos (en inglés ODbL).

9.3. Modelo Digital de Elevación (DEM)

Para la zonificación de Susceptibilidad por movimientos en masa es de vital importancia contar con un MDE o DEM (Digital Elevation Model, por sus siglas en inglés) con cubrimiento total en el área de estudio, el cual servirá de base para el levantamiento de las temáticas relacionadas con los factores condicionantes y para la operación con datos espaciales.

El DEM del satélite ALOS que se describe a continuación corresponden a entre los más utilizados a escalas medias, y que tiene cubrimiento nacional. Además, este modelo es ampliamente usado por su resolución y fácil adquisición.

Tabla 4. Parámetros Ráster del Modelo Digital de Elevación (DEM).

Property	Value
Raster Information	
Columns and Rows	825, 1892
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	12.5, 12.5
Uncompressed Size	2.98 MB
Format	TIFF
Source Type	Generic
Pixel Type	unsigned integer
Pixel Depth	16 Bit
NoData Value	65535
Colormap	absent
Pyramids	level: 2, resampling: Nearest Neighbor
Compression	LZW
Mensuration Capabilities	Basic
Status	Permanent
Extent	
Spatial Reference	MAGNA_Colombia_Oeste
Linear Unit	Meter (1.000000)
Angular Unit	Degree (0.0174532925199433)
false_easting	1000000
false_northing	1000000
central_meridian	-77.07750791666666
scale_factor	1
latitude_of_origin	4.596200416666666
Datum	D_MAGNA
Statistics	

Fuente: Este estudio.

Para la elaboración del DEM se utilizó información de imágenes ALOS-1 Palsar con resolución espacial de 12,5 m y una resolución radiométrica de 16 bits. Las imágenes satelitales capturadas por el satélite japonés ALOS (Advanced Land Observing Satellite) puesto en órbita en enero de 2004 como parte del programa satelital de monitoreo terrestre de la Agencia de Exploración Espacial Japonesa (JAXA). El objetivo de la misión fue generar datos con resolución suficiente para la elaboración de mapas a escala 1:25.000, lo que a su vez permite el cumplimiento de la escala mínima de información exigida para proyectos regionales y de semidetalle en estudio de cuencas hidrográficas.

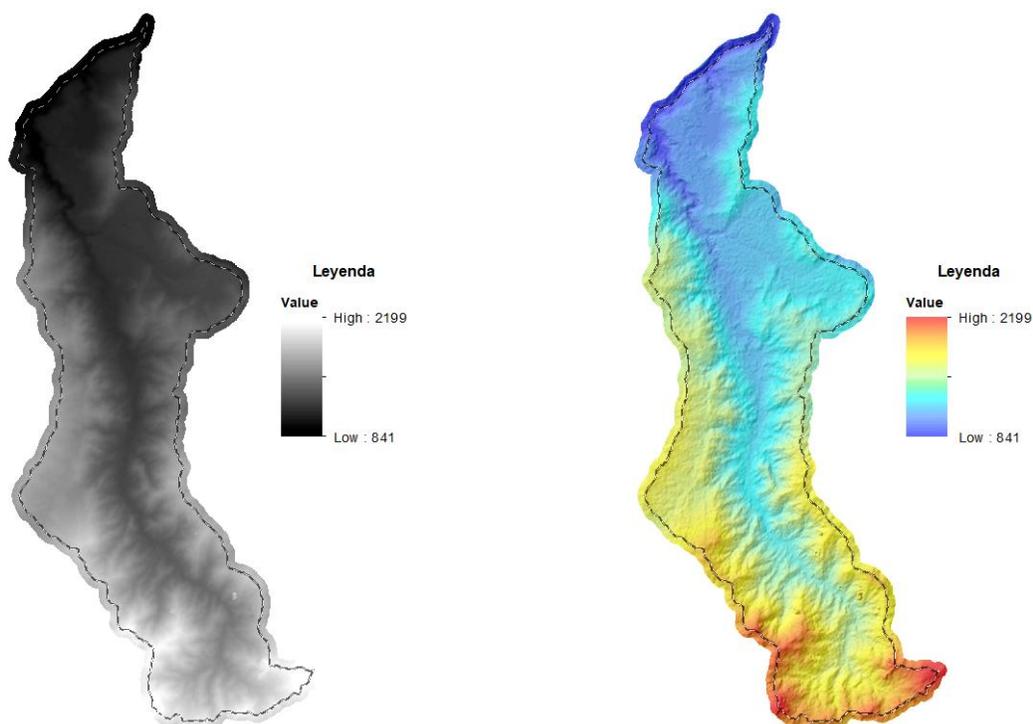


Figura 8. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la subcuenca del río San Francisco.
Fuente: Satélite Alos Palsar 1 (Resolución 12,5 m)

Debido a que la mayor parte de variables que entran al modelo de evaluación se obtienen a partir de la cartografía base, es necesaria la generación de un modelo digital de Elevación a escala 1:25.000 con base en la cartografía básica existente. A partir de este MDE y con el uso de herramientas SIG, se generarán las variables secundarias a que se hace referencia posteriormente.

9.4. Mapa de pendientes

El Análisis de las pendientes de un terreno es fundamental desde diferentes puntos de vista: (i) en lo relacionado al análisis de la morfometría del terreno en función de las restricciones y potencialidades que pueda tener el área de estudio; (ii) importante en el análisis y la identificación de las unidades de Capacidad de uso de las tierras; y (iii) como factor primordial para la determinación de la susceptibilidad y amenazas a movimientos de masa, avenidas torrenciales, inundaciones y para incendios de la cobertura vegetal.

Mediante el procesamiento de la información obtenida a partir del DEM se generaron los mapas de pendiente para la cuenca, reclasificados según las clases definidas en la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Ver Tabla 5), por tanto, como insumo se realizaron las salidas cartográficas con su respectiva leyenda para las pendientes en la cuenca tanto en grados como en porcentaje.

Tabla 5. Rangos de Pendientes en porcentaje (%)

SÍMBOLO	GRADIENTE %	Gradiente en Grados	DESCRIPCIÓN
a	0 – 3	0 – 1,72	Plano
b	3 – 7	1,72 – 4,00	Ligeramente inclinado
c	7 – 12	4,00 – 6,84	Moderadamente inclinado
d	12 – 25	6,84 – 14,04	Fuertemente inclinado
e	25 – 50	14,04 – 26,57	Ligeramente escarpado
f	50 – 75	26,57 – 36,87	Moderadamente escarpado
g	>75	> 36,87	Fuertemente escarpado

Fuente: Guía Técnica para la formulación de los POMCAS, 2013.

En la siguiente figura se presenta la salida cartográfica de las pendientes en porcentaje para la zona de estudio con su respectivo resumen:

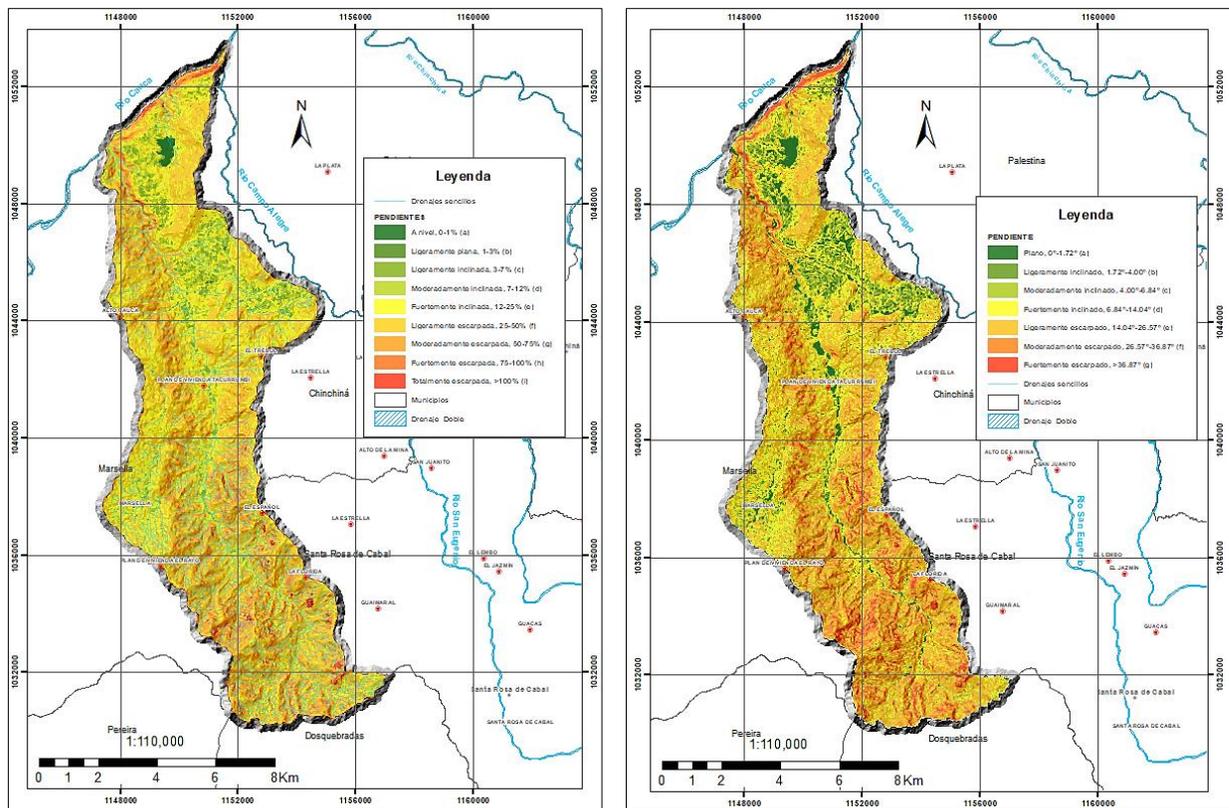


Figura 9. Salidas cartográficas del mapa de pendiente en Porcentaje (izquierda) y de pendiente en Grados (derecha).

Fuente: Este estudio.

En ambos mapas se logra apreciar que la mayor parte de las zonas de altas pendientes tienen concentraciones sobre las regiones volcánicas de la Formación Barroso desde la vereda El Chaquiro al sur, extendiéndose al noroeste hasta la vereda Buenavista en la margen derecha del río Cauca, bordeada por el río San Francisco y controlada por una variedad de fallas y lineamientos que atraviesan esta zona, lo que permite denotar drenajes detríticos de baja densidad y un valle intramontano con posible control estructural.

Hacia esta parte sur de la cuenca se ubican la mayor variedad de litologías del área, como, por ejemplo, los pórfidos andesíticos, las rocas volcánicas básicas, rocas sedimentarias y complejos metamórficos, en donde a su vez se presentan relieves muy posiblemente relacionados a las configuraciones geológicas, morfológicos y estructurales de la zona, lo que le brinda sin duda un carácter de pendientes más fuertes y abruptas que el resto de la cuenca.

Tabla 6. Distribución del área de la cuenca para los rangos de pendientes en porcentaje.

SIMBOLO	DESCRIPCION	RANGOS	ÁREA (ha)	ÁREA (%)	PESO
a	A nivel	0-1%	41.92	0.4%	0.2
b	Ligeramente plana	1-3%	0.44	0.0%	0.3
c	Ligeramente inclinada	3-7%	215.59	2.2%	0.4
d	Moderadamente inclinada	7-12%	562.16	5.9%	0.5
e	Fuertemente inclinada	12-25%	2637.90	27.5%	0.6
f	Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	25-50%	4367.59	45.5%	0.7
g	Moderadamente escarpada o moderadamente empinada	50-75%	1475.27	15.4%	0.8
h	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	75-100%	234.41	2.4%	0.9
i	Totalmente escarpada	>100%	63.40	0.7%	1
Total general			9598.67	100%	

Fuente: Este estudio.

La anterior tabla muestra la distribución del área para cada uno de los rangos de clasificación de pendientes en porcentajes y de su valor de ocupación total dentro de la cuenca (Ver Tabla 6). Así mismo, se muestra el resumen de la ocupación que tienen las laderas para la clasificación de pendientes por grados (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Distribución del área de la cuenca para los rangos de pendientes en grados

SIMBOLO	DESCRIPCIÓN	RANGOS	AREA (ha)	ÁREA (%)	PESO
a	Plano	0º-1.72º	323.90	3%	0.1
b	Ligeramente inclinado	1.72º-4.00º	351.47	4%	0.3
c	Moderadamente inclinado	4.00º-6.84º	669.83	7%	0.5
d	Fuertemente inclinado	6.84º-14.04º	2335.01	24%	0.7
e	Ligeramente escarpado	14.04º-26.57º	4106.59	43%	0.8
f	Moderadamente escarpado	26.57º-36.87º	1471.11	15%	0.9
g	Fuertemente escarpado	>36.87º	340.53	4%	1
Total general			9598.44	100%	

Fuente: Este estudio.

El análisis de las pendientes para la subcuenca del río San Francisco arrojó como resultado que aproximadamente del 43% al 46% de la cuenca presenta laderas con pendientes superiores al 25% de inclinación lo que corresponde al mayor porcentaje del área de estudio y lo tipifica dentro de la categoría de 'Ligeramente escarpado o ligeramente empinado', dándole a su vez un carácter de cuenca de montaña. Solo alrededor del 3% del territorio presenta laderas de pendientes 'Fuertemente escarpada'.

10. CONDICIONES GEOAMBIENTALES

Diferentes autores han publicado versiones dirigidas a determinar los factores o combinación de factores y su incidencia en la generación de movimientos en masa (Varnes, 1984; Dikau et al., 1996; Turner & Schuster, 1996; Popescu, 2002; van Westen et al., 2008). A continuación, se explica brevemente cada una de las variables obtenidas para la caracterización geoambiental de la zona de estudio.

Se debe tener presente que el tipo e importancia de cada factor considerado para explicar la susceptibilidad a un fenómeno de remoción en masa depende del marco geoambiental (relieve, geología, geomorfología y procesos morfodinámicos) y puede diferir sustancialmente de un área a otra debido a diferentes condiciones del terreno (Corominas et al., 2013); sin embargo, es posible establecer reglas generales sobre el tipo de dato a ser usado, como por ejemplo, la metodología expuesta en el protocolo para la formulación de los POMCAs, en donde la selección de los mismos se procure hacer con base en el conocimiento integral del área de estudio.

10.1. Geología a escala 1:100.000

La evaluación de las Unidades geológicas presentes para la cuenca del río San Francisco involucró únicamente el análisis de información existente, que como referente principal contempló la información proveniente del INGEOMINAS a escala 1:100.000, en lo que hoy se conoce como Servicio Geológico Colombiano (SGC), para los mapas geológicos generalizados de los departamentos de Caldas y Risaralda según las planchas 224 de Pereira (Humberto Caballero A., Gilberto Zapata G. et. al.) y la plancha 205 de Chinchiná (Juan José Estrada L., Ricardo Viana R. 1998).

La información digitalizada inicialmente fue revisada en términos topológicos para determinar irregularidades entre versiones, encontrándose diversidades en traslapes entre unidades para las planchas 224 y 225, para lo cual se procedió a la respectiva verificación bibliográfica y la priorización de la información de acuerdo a la fecha de realización de estos, con el fin de establecer el mapa Geológico a escala 1:100.000 para la zona de trabajo.

Tabla 8. Información cartográfica empleada

Nombre Plancha	Fuente	Escala	Año	Número plancha
Geología Regional - Pereira	INGEOMINAS	1:100.000	1984	224
Geología Regional - Chinchiná	INGEOMINAS	1:100.000	1998	205

Fuente: este estudio.

Las áreas donde se presentan diferencias en contactos y traslapes se relacionan con líneas rojas en la siguiente figura, en donde se presentan contrastes importantes en la parte central de la cuenca. Estas diferencias de información entre planchas podrían estar asociado a errores de nomenclaturas, posibles diferencias entre unidades o a ajustes topológicos debidos a la diferencia de años entre estos dos estudios (Ver Figura 10).

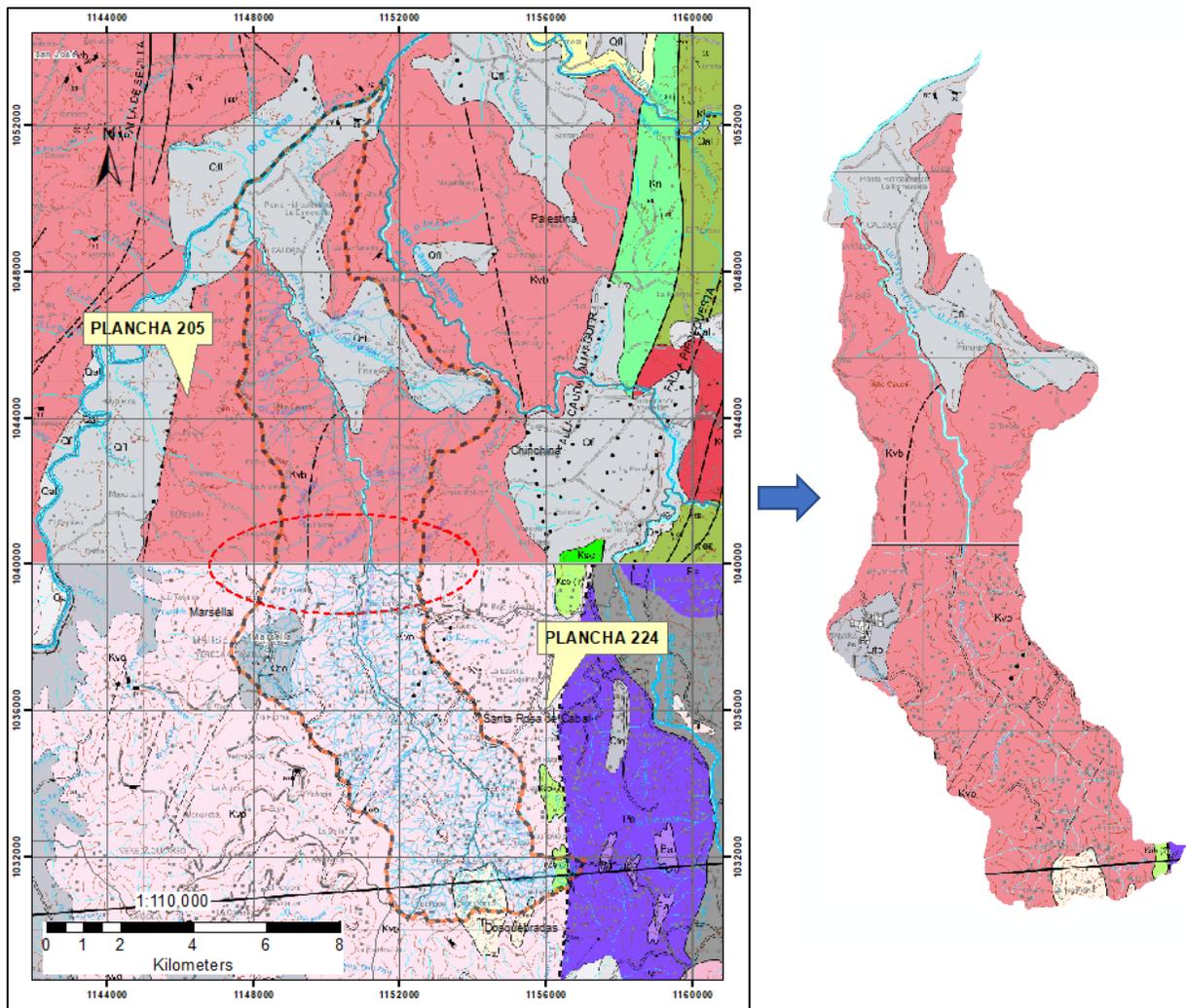


Figura 10. Compilación, validación y unificación de la información litológicas de las planchas Geológicas 205 y 224 a escala 1:100.000 de INGEOMINAS.
Fuente: este estudio.

Se describen a continuación cada una de las unidades geológicas presentes en el área de estudio desde la más antigua a la más reciente. La información litológica aquí presentada fue tomada del documento *'Informe Final del Río San Francisco'* realizada por la CARDER en convenio con CORPOCALDAS en noviembre del 2014.

10.1.1. Formación Quebradagrande – Miembro sedimentario (Kds)

La Formación Quebradagrande, aflora únicamente sobre una reducida área de la parte alta de la subcuenca San Francisco, y donde consisten principalmente de sedimentos lutíticos de contenido silíceo. No se evidencia una propensión particular de dicha litología, a la ocurrencia de procesos erosivos y de remoción en masa, lo que conjuntamente con su reducida cobertura, le disminuye su valor estadístico en el modelamiento de la amenaza.

10.1.2. Complejo Arquía (Pe)

Sobre la parte alta de la subcuenca de San Francisco afloran esquistos grafitosos, algunas reducidas zonas corresponden principalmente a sedimentos lutíticos de la Formación Quebradagrande que subyacen las cenizas volcánicas y que, resultan relevantes cuando los procesos de erosión vertical sobrepasan las capas de cenizas, ya que este tipo de esquistos, por sus condiciones mecánicas intrínsecas, presenta una alta susceptibilidad a los procesos erosivos y a la generación de movimientos en masa, sin embargo, dentro del contexto de la zona de estudio las áreas involucradas no resultan significativas en el modelamiento de la susceptibilidad. Afloramiento de esta roca pueden reconocerse en la vereda La Argentina, donde se observan subyaciendo cenizas volcánicas y en contacto con pórfidos andesíticos, mientras que González, H. (1993) los reconoce en la vereda La Rivera en el municipio de Dosquebradas.

10.1.3. Formación Barroso (Kvb)

La Formación Barroso corresponde a una secuencia volcánica lávica y volcano-clástica, principalmente de composición básica, integrada por diabasas, basaltos y secundariamente espilitas, presentándose lavas almohadilladas, tobas, brechas y aglomerados ocasionalmente con lentes irregulares de chert y sedimentitas silíceas (González, 1.993), aunque dentro del área de estudio, dominan las rocas de carácter ígneo básicos.

Sobre el área de la subcuenca del San Francisco, afloran en general 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. Los suelos residuales de la Formación Barroso 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.

10.1.4. Pórfido andesítico de Pereira (Tpp)

Relacionados con cuerpos hipoabisales, con presencia de materiales de color blanco, los cuales son asociados con una franja que se manifiesta desde la depresión del Cauca entre las cordilleras central y Occidental, hasta el norte del área de estudio. Caracterizada por textura porfídica con variación tanto en la relación matriz/fenocristales, como en el tipo y disposición de los fenocristales (González, 1993). Para el área de estudio, estos cuerpos se circunscriben al sector suroccidental, y están compuestos por fenocristales de plagioclasas, y minerales de hornblenda y biotita en matriz holocristalina feldespática.

Cuando se presentan altos niveles de alteración, esta roca aparece como un material claro, de color gris a blanco y de consistencia friable, suprayacidas por depósitos de ceniza volcánica.

10.1.5. Formación Armenia (Qfl)

Sobre la zona norte, sobre la vereda La Esmeralda del municipio de Chinchiná y en el extremo noroccidental del municipio de Marsella, se presentan espesas secuencias de depósitos de flujos de lodo y escombros derivados de la actividad volcánica de la cordillera Central. Estos depósitos están conformados por materiales piroclásticos, principalmente cenizas volcánicas retrabajadas, y con fragmentos rocosos sub-angulares a sub-redondeados de origen ígneo como metamórfico, en donde hacia la base dominan los flujos de escombros. El grado de alteración por parte de las secuencias es evidente.

10.1.6. Depósitos aluviales recientes (Qal)

Sobre las márgenes del río San Francisco se evidencia al menos tres (3) niveles de terrazas bajas, donde se observan materiales conglomeráticos y niveles arcillosos, que evidencian los procesos de inundación tanto rápidos como lentos que se presentan en dicho cauce.

Los materiales derivados de eventos aluviotorrenciales son evidentes en sectores como La Pedrera, en proximidad de la confluencia de la Quebrada El Zancudo. Algunos otros depósitos aluviales se evidencian a manera de valles colgados, como es el caso del sector El Paraíso en relación con la microcuenca Socavón – Villa Gómez.

En la subcuenca del río San Francisco predominan las unidades volcánicas de la Formación Barroso con una cobertura del 72% en área del total de la cuenca, seguido de los depósitos de la Formación Armenia con una distribución del 21% del área total, donde cuyos depósitos se extienden de manera irregular hacia el Norte y hacia el Oeste de la cuenca, este último sobre el casco urbano del municipio de Marsella. Mientras tanto, el restante 7% se distribuye en las unidades geológicas de la formación Quebradagrande, el Complejo Arquía, los depósitos aluviales y el Pórfido andesítico de Pereira, como se relaciona en la siguiente gráfica:

Tabla 9. Resumen de unidades geológicas en la cuenca.

NOMENCL	NOMBRE	PERIODO	EPOCA	EDAD	AREA_ha	%
Ksc	Formación Quebradagrande, Miembro Sedimentario	Cretácico-K	Inferior temprano-K1	Aptiano-b5	49.91	1%
Kvb	Rocas volcánicas de la Formación Barroso	Cretácico-K	Superior tardío-K2	Turoniano-k2	6913.15	72%
Pe	Rocas metamórficas del Complejo Arquía	Devónico-D	Inferior temprano-K1	Albiano-b6	61.11	1%
Q-al	Depositos aluviales recientes	Cuaternario-Q	Holoceno-Q2	Gelasiano-n9	208.04	2%
Qfl	Cenizas y flujos de escombros	Cuaternario-Q	Pleistoceno-Q1	Piacenziano-n8	2009.44	21%
Tpp	Pórfido Andesítico de Pereira	Neogeno-N	Mioceno-N1	Tortoniano-n5	355.00	4%

Fuente: Este estudio.

A continuación, se presenta el Mapa de Geología Básica a escala 1:100.000 basado en las unidades litoestratigráficas de información geológica secundaria, así como las debidas ponderaciones realizadas para cada una de las clases litológicas:

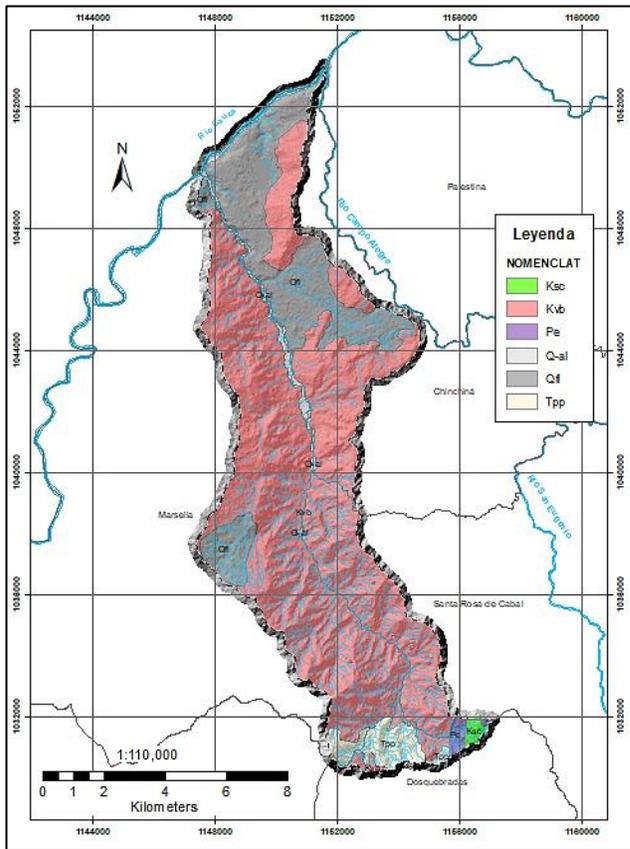


Figura 11. Mapa geológico de la cuenca del Río San Francisco a escala 1:100.000.
Fuente: modificado del SGC.

10.2. Geología estructural – Fallas y lineamientos

El análisis de los elementos estructurales (fallas y lineamientos) en la cuenca tuvo como criterios de identificación y evaluación los siguientes:

- Información de fallas y lineamientos aportadas por el Servicio Geológico Colombiano.
- Información de fallas y lineamientos aportados por estudios realizados en la zona.
- Análisis de fotointerpretación e imágenes de satélite efectuados en el presente proyecto.

A partir de la fotointerpretación, se identifican algunas características morfométricas que determinan configuraciones particulares en sistemas transpresivos asociados a zonas de subducción. Sobre la subcuenca del río San Francisco se presenta todo un sistema de lineamientos asociados al sistema de fallas Cauca Almaguer.

Desde la parte baja de la cuenca hacia el norte, se aprecian algunas estructuras lineales que a su vez se convierten en criterio para determinar algunos posibles lineamientos trazables con rumbo al NE y NW, asociados a variedad de geformas estructurales sobre

el flanco occidental en límite con el río Cauca. En la siguiente figura se muestra el mapa de fallas-lineamientos, así como la salida cartográfica del ráster de distancia a fallas obtenido por el método de Distancia Euclidiana.

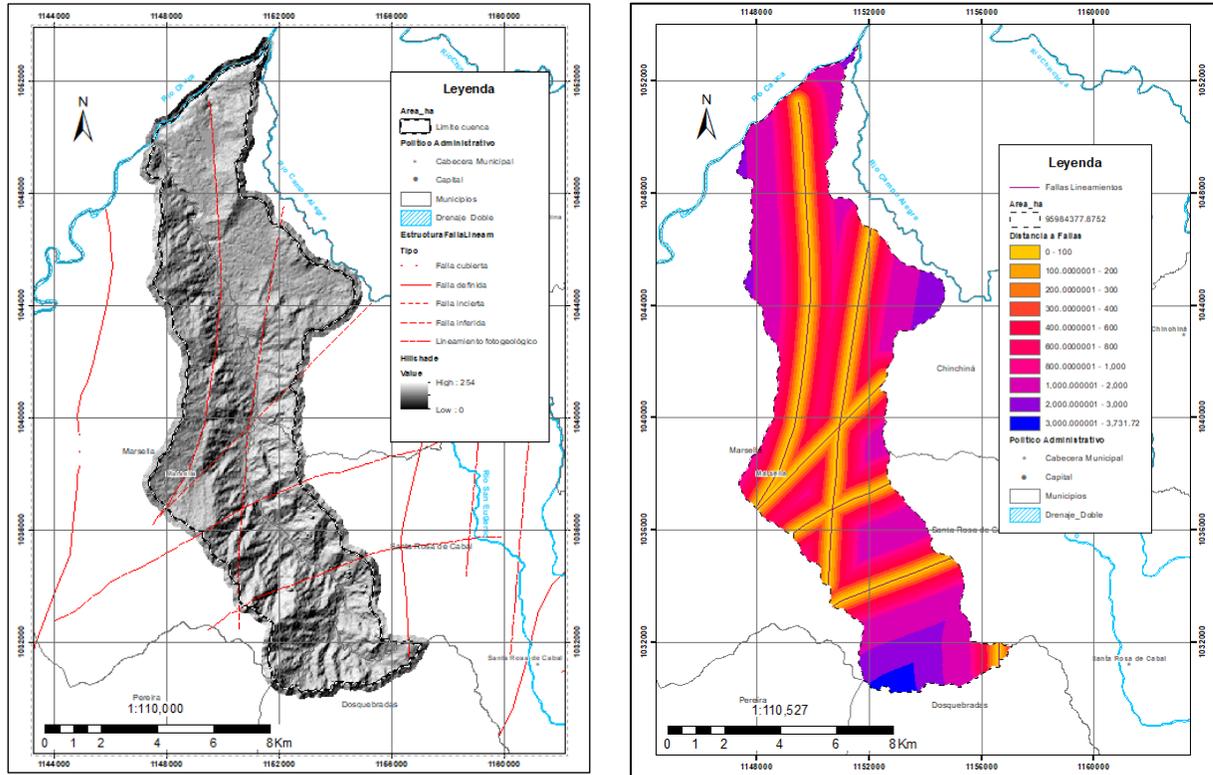


Figura 12. Izquierda: Mapa estructural de la zona de estudio sobre el ráster de sombras. Derecha: Ráster de Distancia Euclidiana de fallas y lineamientos.

Fuente: Este estudio.

Tabla 10. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos.

DISTANCIA FALLAS Y LINEAMIENTOS (Grosor del buffer en m)	CATEGORIA	PESO
0 – 100	Alta	1
101 – 200	Alta	0,9
201 – 300	Alta	0,8
301 – 400	Alta	0,7
401 – 600	Moderada	0,6
601 – 800	Moderada	0,5
801 – 1000	Moderada	0,4
1001 – 2000	Baja	0,3
2001– 3000	Baja	0,2
>3000	Baja	0,1

Fuente: Este estudio

10.3. Cobertura y uso actual del suelo

Esta variable hace referencia a la vegetación que cubre el suelo de la zona de estudio. Se considera desde el punto de vista de la densidad de vegetación (aunque también refleja los principales estratos vegetales como el bosque, prado, matorral, etc. y tipo de vegetación). También incluye el uso del suelo puesto que contempla dentro de sus categorías los prados y terrazas antrópicas, núcleos urbanos.

El tipo de cobertura y su densidad influyen en la estabilidad del depósito mediante mecanismos que se pueden clasificar como hidrológicos y mecánicos. Los hidrológicos comprenden la capacidad de infiltración en el suelo, la humedad del suelo, la evapotranspiración, entre otros, mientras que los mecánicos traducen el aumento de resistencia que proporcionan las raíces y la protección frente a la erosión (Geenway, 1987; Mulder, 1991).

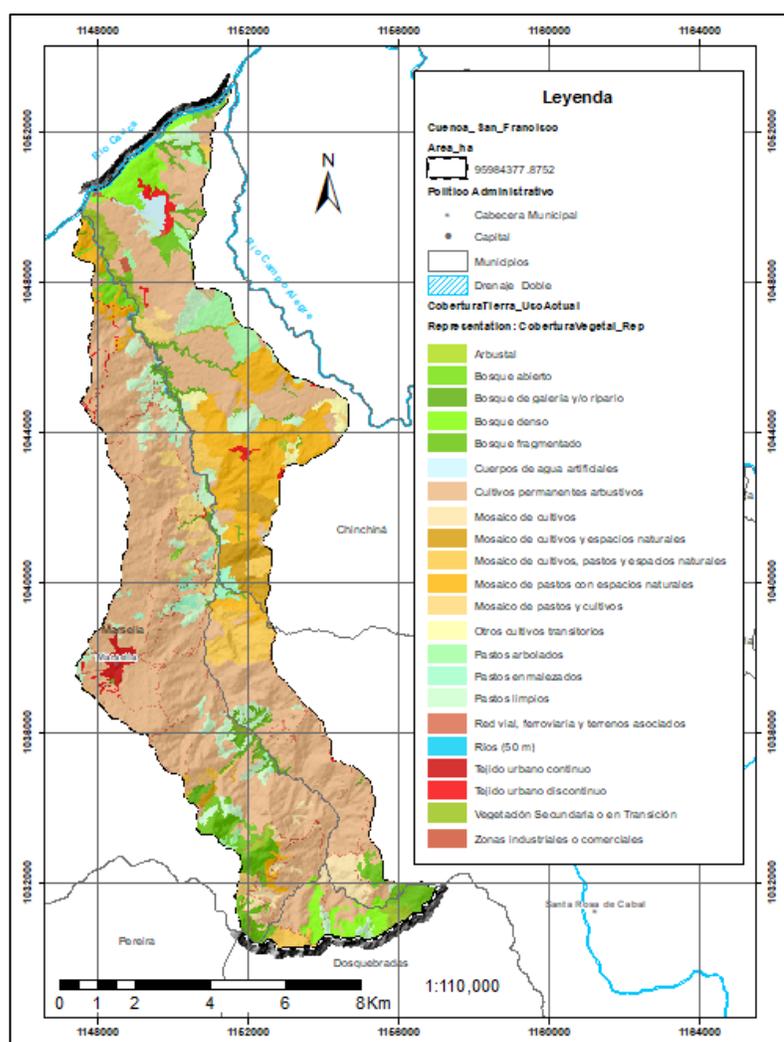


Tabla 11. Mapa de cobertura de la tierra y uso actual. Clasificación Corine Land Cover.
Fuente: Modificado de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, CARDER.

La vegetación puede influir de manera beneficiosa o adversa en la estabilidad de las laderas, dependiendo de cómo actúen los mecanismos mencionados (Baeza, 1994). Un ejemplo de ello es mientras que las raíces aumentan la resistencia del suelo, al mismo tiempo favorecen una mayor infiltración del agua de lluvia.

Se establece a manera general una ponderación dentro de un rango de 1 a 10 como máximo, teniendo en cuenta para dicho análisis la relación de la cobertura con: infiltración y profundidad de protección como mínimo, de acuerdo al tipo de cobertura existente en el área de estudio.

Tabla 12. Resumen de la distribución de los tipos de cobertura y uso actual del suelo para la subcuenca del río San Francisco.

COBERTURA NIVEL 3	USO ACTUAL	AREA_ha	%	PESO
Arbustal	Producción-protección	0.65	0%	0.2
Bosque abierto	Sistemas forestales protectores (FPR)	52.03	1%	0.1
Bosque de galería y/o ripario	Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	282.97	3%	0.2
Bosque denso	Sistemas forestales protectores (FPR)	330.21	3%	0.1
Bosque fragmentado	Sistemas forestales protectores (FPR)	412.38	4%	0.1
Cuerpos de agua artificiales	Industrial	52.09	1%	0
Cultivos confinados	Cultivos transitorios intensivos (CTI)	4.96	0%	0.8
Cultivos permanentes arbustivos	Cultivos transitorios intensivos (CTI)	4957.32	52%	0.8
Mosaico de cultivos	Cultivos permanentes intensivos (CPI)	186.13	2%	0.7
Mosaico de cultivos y espacios naturales	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	216.54	2%	0.7
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	448.93	5%	0.7
Mosaico de pastos con espacios naturales	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	911.39	9%	0.7
Mosaico de pastos y cultivos	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	231.00	2%	0.7
Obras hidráulicas	Industrial	5.12	0%	0
Otros cultivos transitorios	Cultivos transitorios intensivos (CTI)	83.71	1%	0.9
Pastos arbolados	Pastoreo semi-intensivo (PSI)	202.09	2%	0.5
Pastos enmalezados	Pastoreo semi-intensivo (PSI)	89.75	1%	0.5
Pastos limpios	Pastoreo intensivo (PIN)	647.83	7%	0.6
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	Transporte	149.50	2%	0
Ríos (50 m)	Cuerpos de Agua Naturales	7.33	0%	0.7
Tejido urbano continuo	Residencial	63.35	1%	0
Tejido urbano discontinuo	Residencial	83.96	1%	0.1
Vegetación secundaria o en transición	Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	164.12	2%	0.2
Zonas industriales o comerciales	Industrial	15.08	0%	0
Total general		9598.44	100%	

Fuente: Este estudio.

10.4. Geomorfología

El levantamiento geomorfológico está dirigido a proporcionar información concisa, sistemática y debidamente jerarquizada de las geoformas de la cuenca, la definición y caracterización de los procesos morfodinámicos y los fenómenos naturales conexos. Para su caracterización se consideró la metodología de trabajo que desarrollan las entidades del Estado cuya misión es la evaluación de las amenazas naturales (SGC-metodología Carvajal-2011) y cuyo marco de jerarquía difiere ligeramente en los niveles de categorización y conceptualización genérica.

Por lo tanto, el desarrollo de la componente de geomorfología aquí utilizado, jerarquiza las geoformas del relieve con base en los Ambientes Morfogenéticos, los Sistemas de Terreno y las Unidades Geomorfológicas y define atributos de morfografía, morfometría, morfodinámica y morfocronología; de tal forma que al final del proceso se genere una salida cartográfica a escala 1:100.000 a nivel de “Subunidades” que responde a la necesidades de la zonificación de la Gestión del Riesgo bajo la metodología propuesta de Carvajal (2011) y utilizada por Servicio Geológico Colombiano, SGC.

La metodología del SGC (Carvajal, 2011), categoriza las Unidades del Terreno por los “contrastes morfológicos y morfométricos que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de estos con la correspondiente topografía del terreno” definida como “Subunidades”, que corresponden a formas particulares del terreno consideradas en un ambiente morfogenético y morfodinámico específico; sin embargo, dada la imposibilidad de la realización de labores de campo para este proyecto, el alcance de este apartado queda sujeto a la determinación no de las subunidades sino de las unidades geomorfológicas de la cuenca, lo cual sugiere un nivel de detalle geomorfológico para una escala 1:100.000.

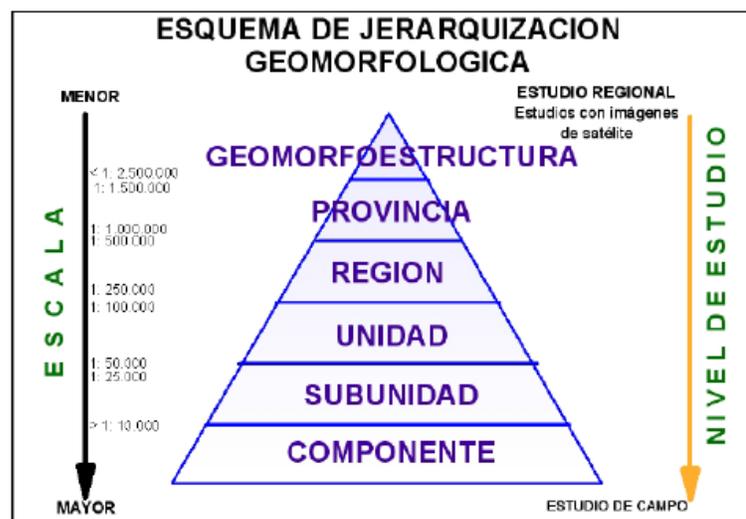


Figura 13. Jerarquización Geomorfológica propuesta por INGEOMINAS.
Fuente: Modificado de Velásquez (1999) e INGEOMINAS (1999), Carvajal (2002-2008).

A continuación, se describen cada una de las formas de terreno identificadas en la subcuenca del río San Francisco obtenidas a partir del análisis de fotointerpretación con su respectiva nomenclatura asignada:

10.4.1.1. Cadena Montañosa (Cmt)

La mayor parte de la superficie del área de estudio está formada por laderas, éstas pueden considerarse como una de los componentes fundamentales del relieve de la cuenca. Esta forma de terreno se extiende desde la parte alta de la cuenca al sur en inmediaciones del área protegida La Nona hasta la parte baja de la cuenca y del Río Cauca. Realizando un sistema de análisis morfológico de la cuenca se observa como la excavación fluvial es acelerada sobre las laderas de la cadena montañosa, lo que genera un perfil resultante convexo sobre las paredes de las laderas, como ocurre a lo largo del valle encajonado del río en su trayectoria de sur a norte.

10.4.1.2. Flujo Fluviovolcánicos (Flv)

Los flujos de lahar han fluido sobre esta parte del relieve bajo la influencia de la gravedad, sin embargo, el tipo de flujo, la velocidad y la extensión que alcanzan las lavas depende de su composición química, contenidos de volátiles, temperatura y otras variables relacionadas entre sí que, en últimas, condicionan la viscosidad del material y esta a su vez a la forma del terreno semillanos de peneplanicies, ya que estos factores dan idea de la viscosidad, el volumen emitido y la velocidad que tuvieron estos flujos para lograr la trayectoria que tuvieron desde su foco generador en el Volcán Nevado Santa Isabel.

10.4.1.3. Vallecitos (Vct)

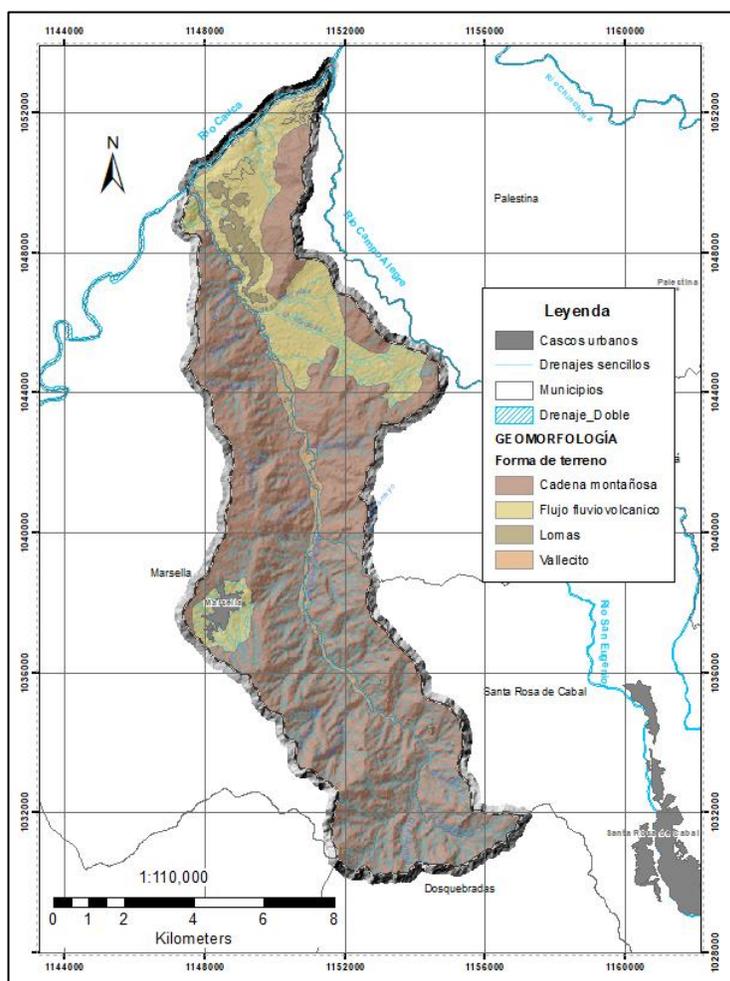
Una terraza de inundación corresponde a la superficial fluvial adyacente a un curso fluvial y que frecuentemente suele inundarse, están constituidas por depósitos que los ríos movilizan por excavación de los canales o por migración lateral.

Los depósitos de planos de inundación determinados en esta cuenca se sitúan en la parte más baja de estas llanuras para los cauces del San Francisco, con extensiones mayores a los 100 metros distancia en el caso de las llanuras del río Cauca y baja de la cuenca.

10.4.1.4. Lomas (Lm)

Sobre la parte baja de la cuenca, en la vereda La Esmeralda, se distinguen relieves de pendientes suaves y poca cobertura vegetal. Esta forma de relieve se encuentra asociada a flujos de lodo y lava recientes del cuaternario y, a depósitos de cenizas de potente espesor provenientes del Paramillo de Santa Rosa y, en mayor medida, del volcán Santa Isabel que, a través del tiempo han contribuido al suavizado paulatino de la morfometría de esta parte del territorio, aunado por la erosión fluvial sobre estas zonas onduladas.

En el Mapa de Subunidades (Ver Figura 14) se espacializan las diferentes unidades geomorfológicas existentes en la zona de estudio según clasificación de Carvajal (2011).



SUBUNIDADES GEOMORFOLOGICAS	PESO
Cadena montañosa	0.9
Flujo fluviovolcánicos	0.4
Lomas	0.8
Vallecito	0.1

Figura 14. Mapa geomorfológico de la subcuenca del río San Francisco bajo la clasificación de Subunidades de terreno modificada de Carvajal, 2011.

Fuente: Este estudio.

La tabla siguiente condensa la distribución espacial de cada una de las geoformas, así como el ambiente morfogenético, relieve y material litológico asociado:

Tabla 13. Resumen de las subunidades geomorfológicas presentes en la cuenca.

AMBIENTE MORFO	PAISAJE	MAT_PARE LITOLÓGÍA	MAT_PARE FACIES	TIPO MATERIAL LITOLÓGICO	FORMA TERRENO	NOMCL	AREA_ha	%
Erosional	Piedemonte	Ígneas Extrusivas	Volcánico	Rocas volcánicas (Kvb)	Cadena montañosa	Cmt	118.47	1%
Estructural - Erosional	Montaña	Ígneas Extrusivas	Volcánico	Rocas volcánicas (Kvb)	Cadena montañosa		6890.69	72%
		Metamórficas	Mixto	Rocas metamorfa (Pe)	Cadena montañosa		173.46	2%
Erosional	Lomerío	Sedimentarias	Mixto	Flujos volcanoclasticos (Qf1)	Flujo fluviovolcanico	Flv	48.97	1%
	Peneplanicie	Sedimentarias	Mixto	Flujos volcanoclasticos (Qf1)	Flujo fluviovolcanico		1505.67	16%
	Piedemonte	Sedimentarias	Diluvial	Flujos volcanoclasticos (Qf1)	Flujo fluviovolcanico		47.49	0%
Estructural - Erosional	Peneplanicie	Sedimentarias	Diluvial	Flujos volcanoclasticos (Qf1)	Flujo fluviovolcanico	Lm	279.30	3%
Erosional	Peneplanicie	Sedimentarias	Diluvial	Flujos volcanoclasticos (Qf1)	Lomas		154.15	2%
Deposicional	Valle	Sedimentarias	Aluvial	Depositos aluviales (Qal)	Vallecito	Vct	3.63	0%
Erosional	Valle	Sedimentarias	Aluvial	Depositos aluviales (Qal)	Vallecito		376.04	4%
Totales general							9598.44	100%

Fuente: Este estudio.

10.5. Inventario de procesos morfodinámicos

La caracterización de procesos morfodinámicos en la cuenca involucra la definición de los diversos fenómenos que han sido inventariados en el área de estudio por diferentes métodos, entendiendo que algunos eventos son antiguos, otros recientes y solo algunos están activos en el momento de la evaluación.

El inventario de procesos morfodinámicos se presenta como una capa de información independiente de acuerdo con la metodología propuesta. A partir de lo anterior, se efectuó la integración del total de procesos basado en los siguientes datos:

- **Catálogo de eventos históricos:** Corresponde a los fenómenos obtenidos en la fase de revisión del análisis situacional y/o revisión bibliográfica adicional que aportaron las diferentes entidades e instituciones sobre procesos en la cuenca y que fueron especializados correctamente
- **Eventos definidos por fotointerpretación:** Hacen parte de los procesos identificados en la fase de fotointerpretación y que fueron cartografiados.

10.5.1. Catálogo de eventos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el catálogo de eventos hace parte del compilado de procesos por fenómeno en remoción en masa que fueron obtenidos en la fase de revisión del análisis situacional del área de estudio y/o revisión bibliográfica que aportaron diferentes entidades para la cuenca del río Campoalegre. La siguiente tabla muestra el resumen del número total de procesos morfodinámicos recopilados de fuentes de información secundaria:

Tabla 14. Catálogo de eventos morfodinámicos.

FUENTE	CANTIDAD	%
Carder	53	12%
Deslizamiento rotacional	31	7%
Deslizamiento traslacional planar	22	5%
Corpocaldas (1991)	400	88%
Caida de rocas	7	2%
Deslizamiento	383	85%
Desprendimiento por socavación de orilla	10	2%
Total general	453	100%

Fuente: Este estudio.

10.5.2. Procesos definidos en la etapa de fotointerpretación.

La identificación de cada uno de los procesos morfodinámicos identificado por fotointerpretación fue realizada a partir de imágenes satelitales de Google Earth, las cuales contaban con una excelente resolución en la mayoría de los casos, permitiendo

en gran parte realizar la tipificación del movimiento en masa evaluado. En ese sentido se identificaron movimientos tanto de tipo rotacional y planar como de tipo caídas de tierra.

Por otro lado, cabe aclarar que aquellos procesos denominados como de tipo 'Deslizamiento' hace referencia a los movimientos en masa que por la resolución de la imagen satelital y por la dificultad de su respectiva clasificación fueron tipificados de manera general con este nombre (Ver Tabla 15).

Tabla 15. Procesos morfodinámicos identificados por fotointerpretación.

FOTOINTERPRETACIÓN	CANTIDAD	%
Caida de tierra	1	2%
Deslizamiento	16	30%
Deslizamiento rotacional	24	44%
Deslizamiento traslacional planar	10	19%
Flujo	3	6%
Total general	54	100%

Fuente: Este estudio.

10.5.3. Análisis de eventos

La tabla siguiente compila todos los procesos morfodinámicos recopilados de información tanto de primera (fotointerpretación) como de segunda (bibliográficos), así mismo, se discrimina para la cantidad y el tipo de movimiento en masa identificado. Se observa que el mayor número de estos procesos se obtuvieron estudio de detalle realizado por la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) para un total de 400 procesos morfodinámicos, equivalentes al 79% del total de todos los eventos inventariados.

Tabla 16. Resumen total de eventos morfodinámicos.

FUENTE	CANTIDAD	%
Carder	53	10%
Deslizamiento rotacional	31	6%
Deslizamiento traslacional planar	22	4%
Corpocaldas (1991)	400	79%
Caida de rocas	7	1%
Deslizamiento	383	76%
Desprendimiento por socavación de orilla	10	2%
Fotointerpretación	54	11%
Caida de tierra	1	0%
Deslizamiento	16	3%
Deslizamiento rotacional	24	5%
Deslizamiento traslacional planar	10	2%
Flujo	3	1%
Total general	507	100%

Fuente: Este estudio.

Con el fin de realizar una correcta identificación de cada uno de los eventos morfodinámicos hallados en la cuenca, se procedió a espacializar y a relacionar geográficamente cada uno de estos con el nombre de la vereda en la cual ocurrió el evento, con esto se busca un eficiente análisis de la información para posteriores tomas decisiones para las autoridades locales. Las veredas que presentan el mayor número de movimientos en masa se encuentran corresponden a las veredas que hacen parte del municipio de Santa Rosa de Cabal (Ver Tabla 17).

Se observa que, el municipio que contiene el segundo mayor número de eventos corresponde a Marsella para veredas como San Carlos, Valencia y Cantadelicia, entre otras.

Tabla 17. Total de eventos morfodinámicos para la cuenca del río San Francisco.

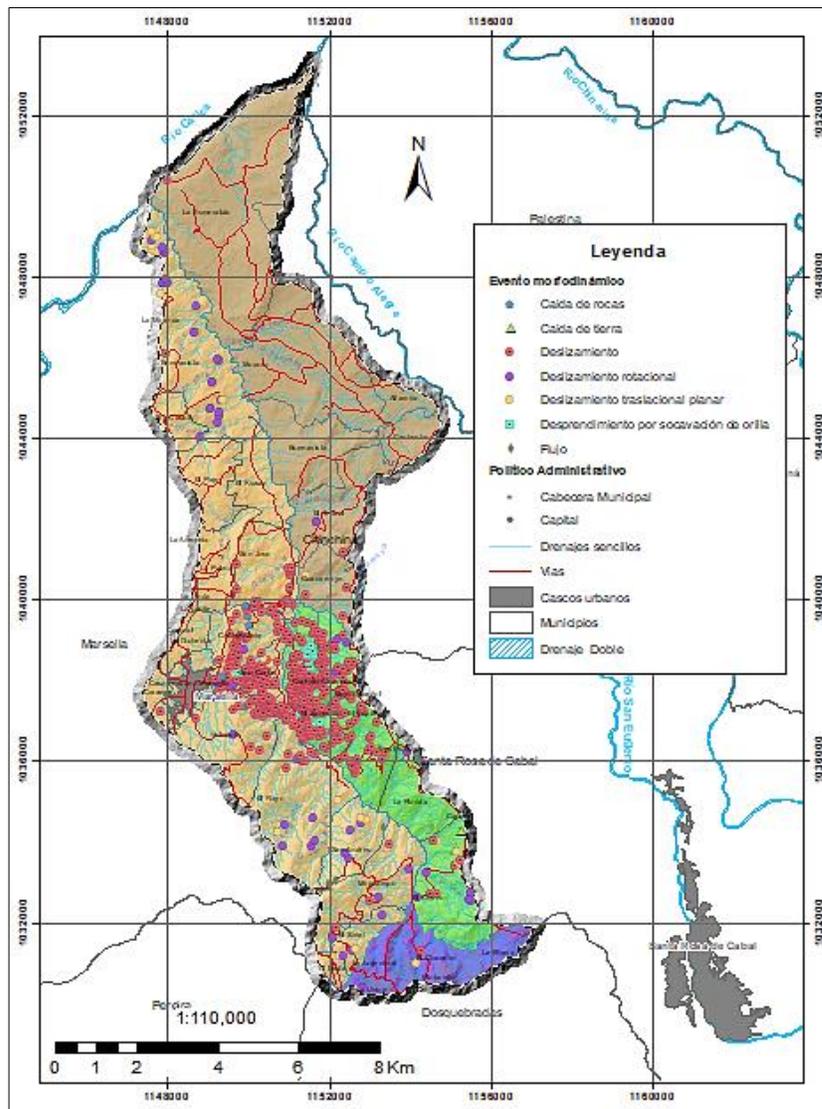
DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	VEREDA	CANTIDAD
Caldas	Chinchiná	El Trebol	3
		Guacamayo	4
		La Esmeralda	1
Total Caldas			8
Risaralda	Dosquebradas	El Chaquiro	2
		La Union	1
	Total Dosquebradas		3
	Marsella	Sin nombre	11
		Alto Cauca	1
		Buenavista	37
		CantaDelicia	44
		Caracas	1
		El Rayo	30
		El Sinai	7
		Miracampo	5
		San Andres	9
		San Carlos	58
		San Jose	10
	Valencia	47	
	Total Marsella		260
	Santa Rosa de Cabal	Cuchilla Atravesada	111
		El Chuzo	14
		El Zancudo - El Español	110
		La Flórida	1
Total Santa Rosa de Cabal		236	
Total Risaralda			499
TOTAL GENERAL			507

Fuente: Este estudio.

Cabe aclarar que la mayoría de estos movimientos hacen parte de procesos de tipo deslizamientos y caídas de tierra ocurridos dentro de periodos de tiempo distintos y con una ocurrencia de actividad desde reactivado (1-10 años) hasta inactivo (20-30 años).

Para el área de estudio, los procesos morfodinámicos evaluados en la etapa de campo se encuentran distribuidos sobre la subcuenca del río San Francisco de este a oeste sobre la zona de montaña la que se encuentra el municipio de Marsella, hasta el flanco occidental en límites con el río Cauca, sobre laderas algunas semiescarpadas con pendientes altas como se detalla en la figura siguiente:

Figura 15. Mapa de ubicación de procesos morfodinámicos.



Fuente: Este estudio.

11. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LADERA

Las variables que constituyen las características geométricas de la ladera, también llamadas variables derivadas del DEM para el área de estudio, incluyen: Pendiente de ladera, pendiente senoidal, relieve relativo, curvatura en planta, perfil, insolación, orientación, cuenca acumulada y longitud de flujo como se definen a continuación:

11.1. Pendiente de la ladera (slope)

Hace referencia al ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, su importancia radica en la influencia del factor sobre la estabilidad del suelo como factor geométrico. Para esta variable, se normalizaron sus valores entre 0 y 1, siendo 0 muy poco susceptible, y 1 muy susceptible.

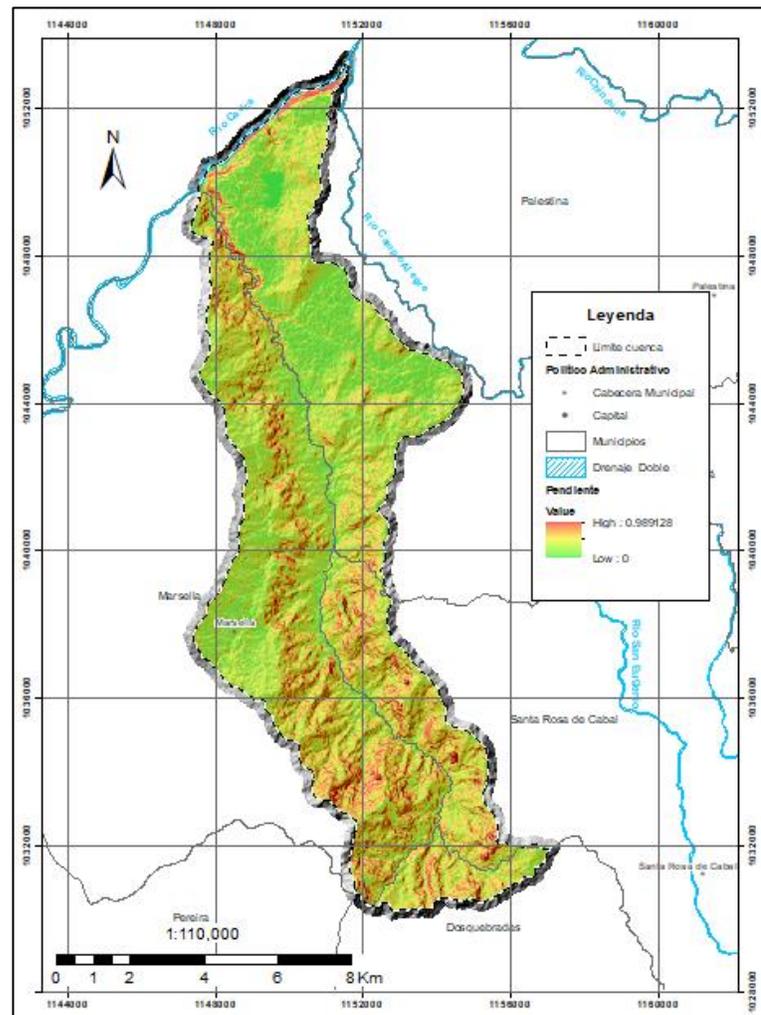


Figura 16 Mapa de pendientes
Fuente: Este estudio.

11.2. Rugosidad (Rugosid1)

Corresponde a la desviación del vector normal a la superficie de cada celda permitiendo definir límites de taludes y laderas. Además, tiene un impacto en los deslizamientos pues a mayores cambios de pendiente aumenta su probabilidad. Debido a que los valores de Rugosidad varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno no presenta variación alguna y 1 cuando el terreno presenta alta variación, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

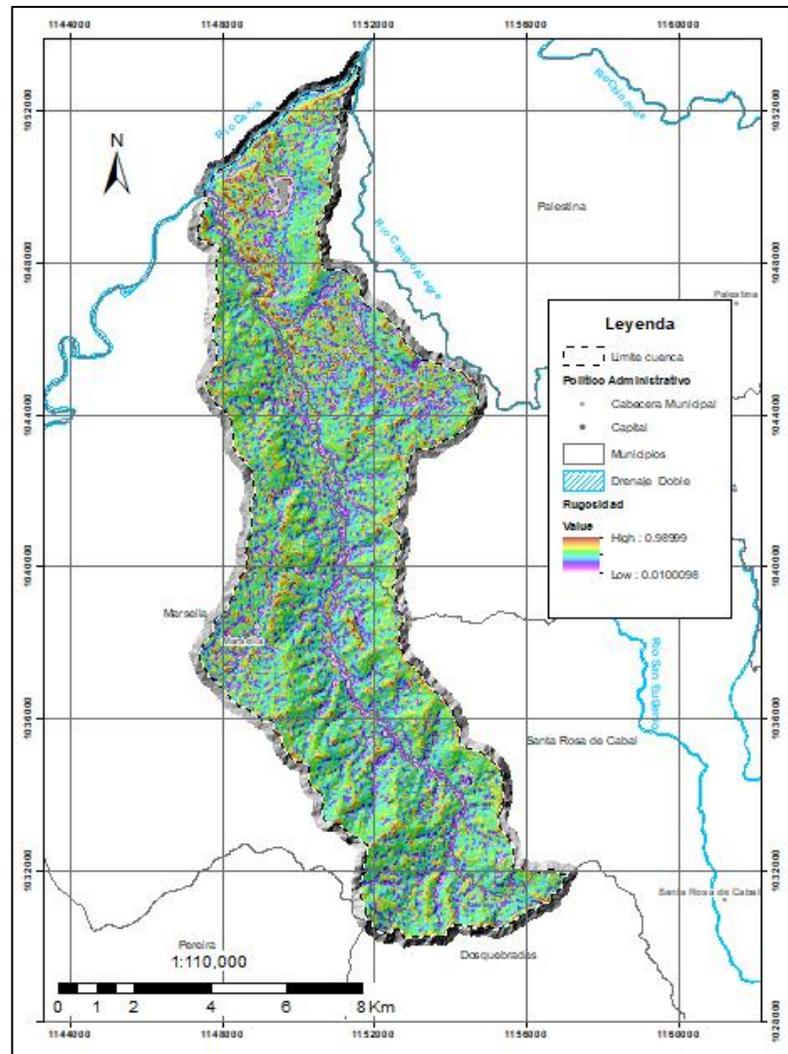


Figura 17 Mapa de rugosidad
Fuente: Este estudio.

11.3. Curvatura del terreno (curvatura2)

Corresponde al grado de curvatura de cada celda a evaluar con respecto al plano vertical. Su relación con el modelo está dada por el grado de concentración del drenaje superficial, el cual aumenta en las zonas con mayor concavidad. En la tabla siguiente se presenta la calificación y categorización de curvatura del terreno utilizada en el presente estudio.

Tabla 18 Calificación y categorización de curvatura del terreno

CURVATURA	CATEGORÍA	CALIFICACIÓN
<-0,3	Alta	1
-0.3 – 0.3	Moderada	0,5
>0,3	Baja	0

Fuente: Este estudio.

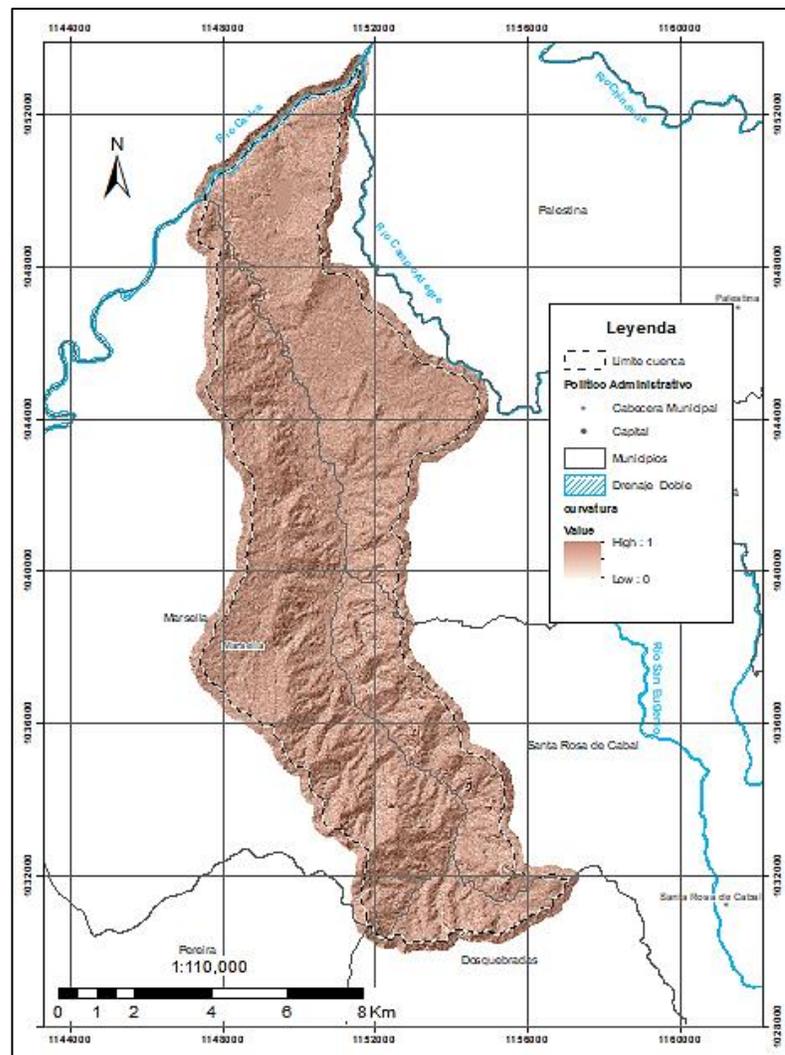


Figura 18. Mapa de curvatura del terreno.

Fuente: Este estudio.

11.4. Curvatura con respecto al perfil (perfil2)

Hace referencia al grado de curvatura, pero a diferencia de la variable curvatura del terreno, esta se mide de manera longitudinal y tiene una repercusión en la generación de erosión y deposición, debido a su impacto en la escorrentía y la aceleración del flujo. En la siguiente tabla se presenta la calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al perfil utilizada en el presente estudio.

Tabla 19. Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al perfil.

CURVATURA LONGITUDINAL	CATEGORIA	CALIFICACION
<-0,3	Alta	1
-0.3 – 0.3	Moderada	0,5
>0,3	Baja	0

Fuente: Este estudio.

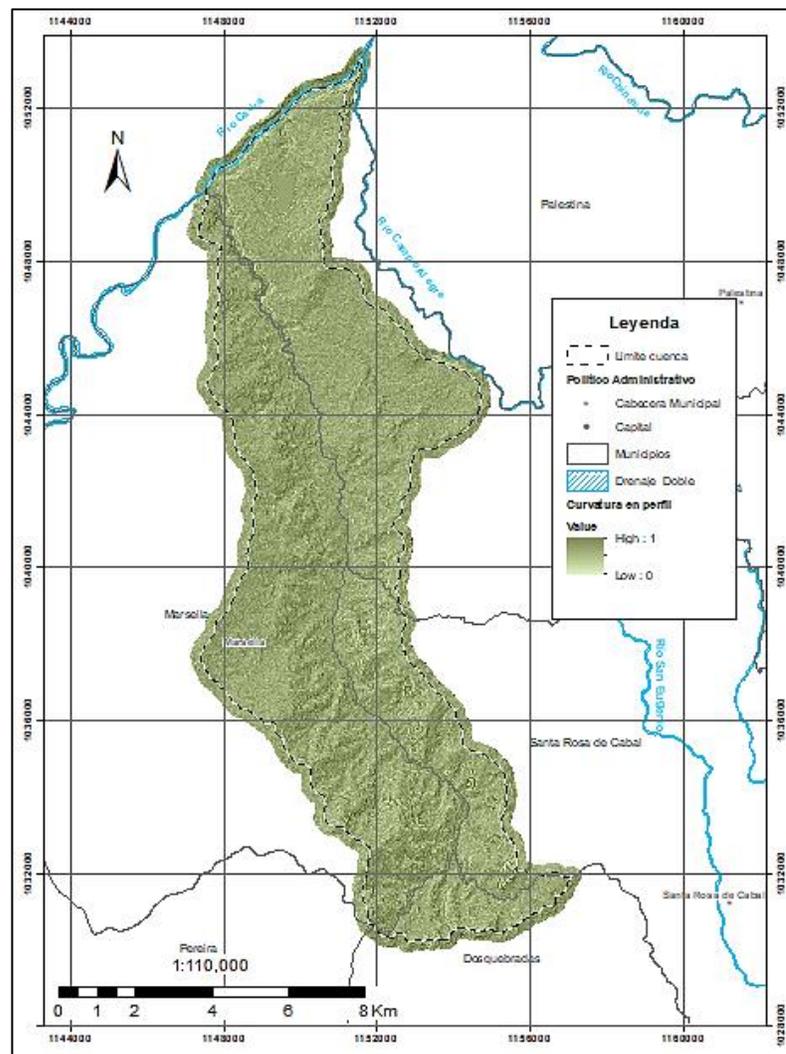


Figura 19. Mapa de curvatura en perfil.

Fuente: Este estudio.

11.5. Curvatura con respecto al plano horizontal (plan2).

Esta variable también está asociada con la curvatura del terreno, pero para este caso es medido en la dirección perpendicular de la pendiente. Indica la convergencia del flujo hacia la celda. En la siguiente tabla se presenta la calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal utilizada en el presente estudio.

Tabla 20 Calificación y categorización de curvatura del terreno con respecto al plano horizontal.

CURVATURA TRANSVERSAL	CATEGORIA	PESO
<-0,3	Alta	1
-0.3 – 0.3	Moderada	0,5
>0,3	Baja	0

Fuente: Este estudio.

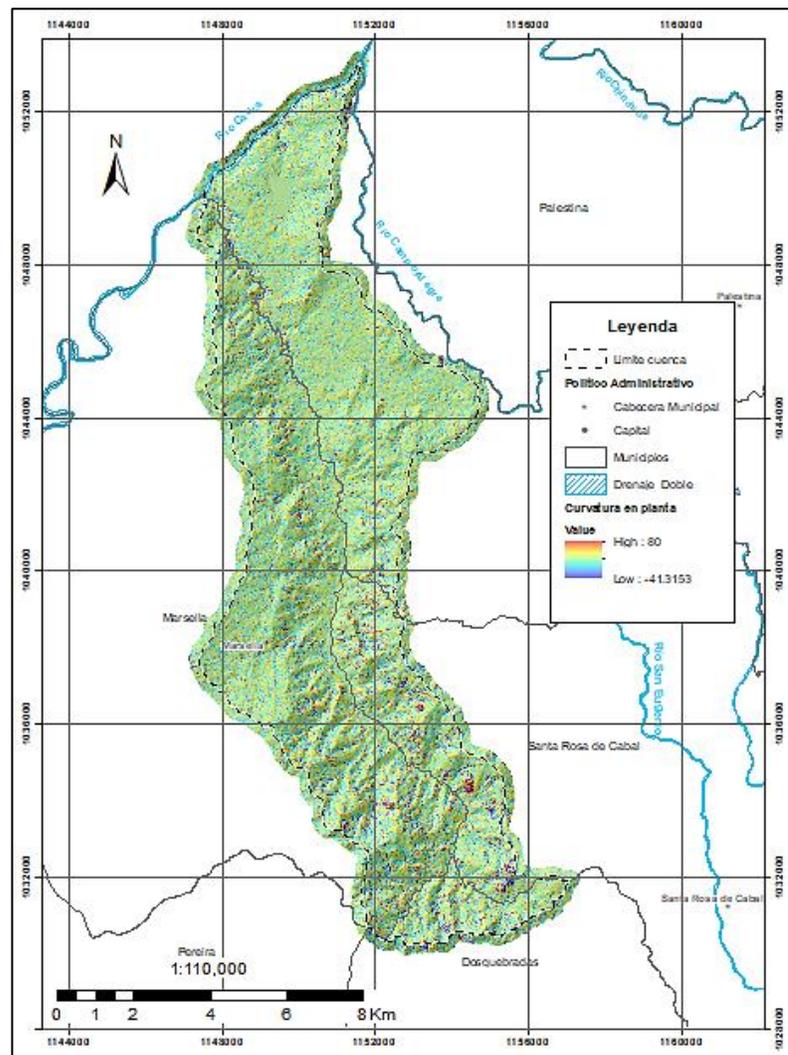


Figura 20 Mapa de curvatura en planta.

Fuente: Este estudio.

11.6. Insolación (Insola)

Corresponde al coeficiente de iluminación o intensidad reflejada de la superficie terrestre, indicando el tiempo en que cada punto a evaluar dentro del área de estudio se encuentra en la sombra, lo que tiene incidencia en la humedad del suelo y a cambios bruscos.

Esta variable fue calculada con la variación del azimut y altitud. Debido a que los valores de Insolación varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno presenta menor retención de humedad y en consecuencia menor susceptibilidad a eventos de movimientos en masa, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

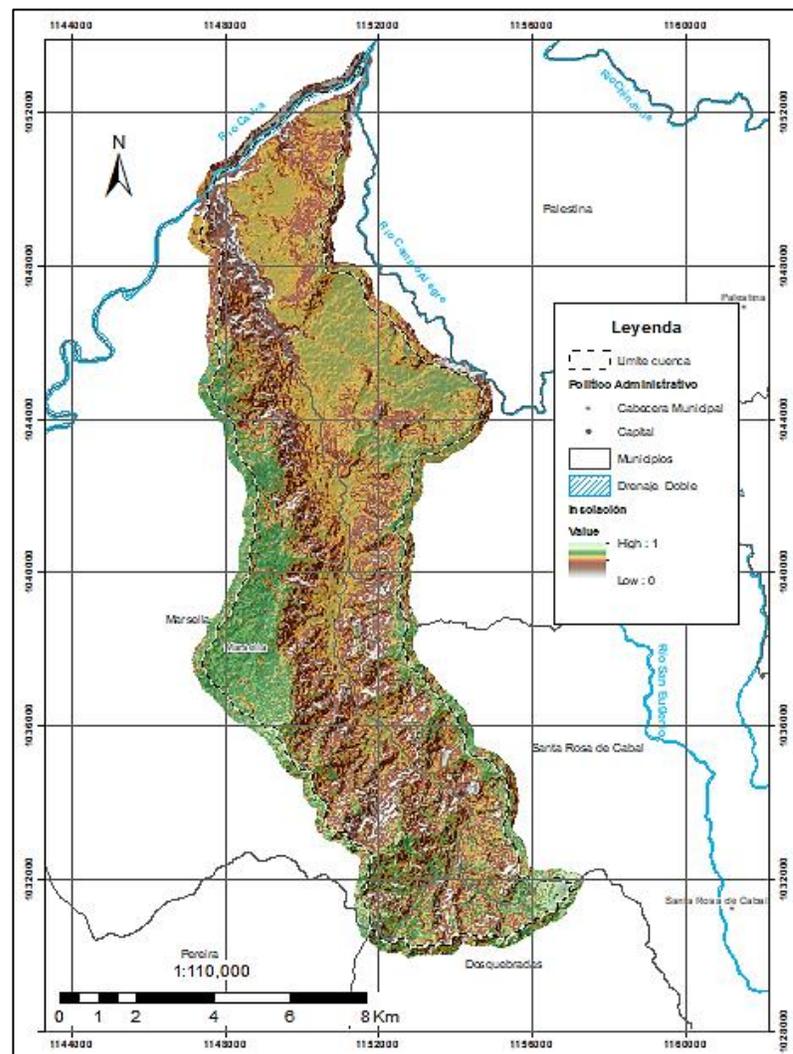


Figura 21. Mapa de insolación del área de estudio.
Fuente: Este estudio.

11.7. Orientación de la ladera (orienta2)

Hace referencia a la dirección de exposición de la ladera para cada punto de la cuenca a evaluar, y se adiciona con el fin de tener en cuenta tres elementos. Inicialmente es una forma de evaluar de manera indirecta la insolación (y por tanto su estado de humedad frecuente), y relacionada con la vegetación existente y la potencial cantidad de lluvia recibida por la dirección preferencial de frentes nubosos.

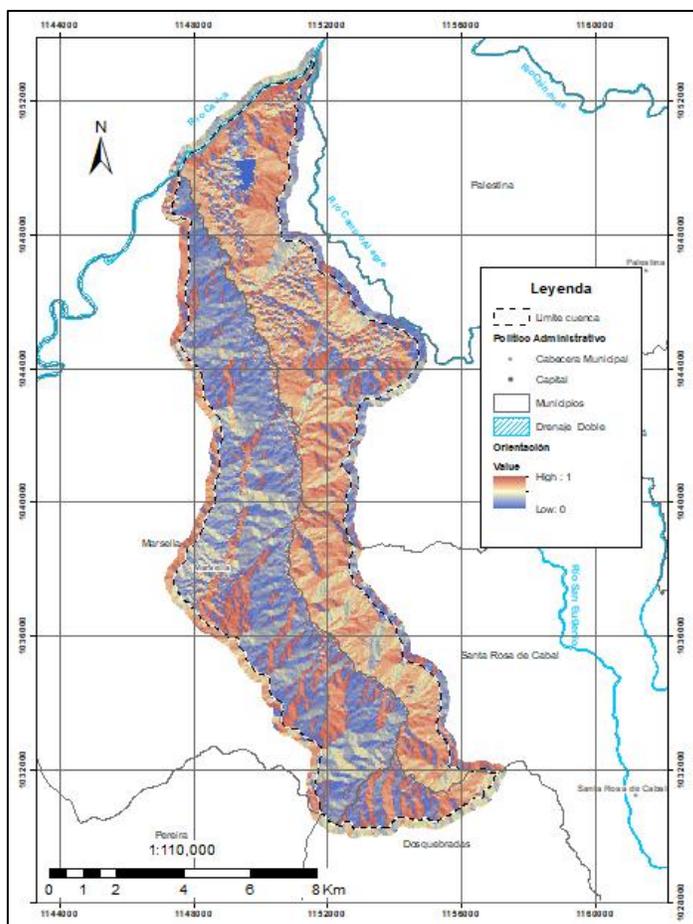


Figura 22 Mapa de orientación de la ladera.
Fuente: Este estudio.

ORIENTACION DE LADERA	CATEGORIA	CALIFICACION
-1	Baja	0
0 – 22.5	Alta	1
22.5 – 67.5	Moderada	0,66
67.5 – 112.5	Baja	0,33
112.5 – 157.5	Moderada	0,66
157.5 – 202.5	Alta	1
202.5 – 247.5	Moderada	0,66
247.5 – 292.5	Baja	0,33
292.5 – 337.5	Moderada	0,66
337.5 - 360	Alta	1

Tabla 21. Calificación y categorización de la orientación de la ladera.
Fuente: Este estudio.

En la tabla anterior se presenta la calificación y categorización de la orientación de la ladera utilizada para realizar el análisis de la variable en el presente estudio.

11.8. Acumulación de la cuenca (accumulation2)

El área cuenca se relaciona con la cantidad de agua que es capaz de recoger e infiltrar en el terreno. A mayor superficie más agua infiltrada y más posibilidades de producir inestabilidades del terreno. Se obtiene a partir de la dirección del flujo, el cual permite posteriormente calcular la acumulación por cada celda del DEM. Debido a que sus valores varían entre 0 y 1, donde 1 hace referencia a las zonas de mayor acumulación de agua y 0 las zonas de menor acumulación de agua, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

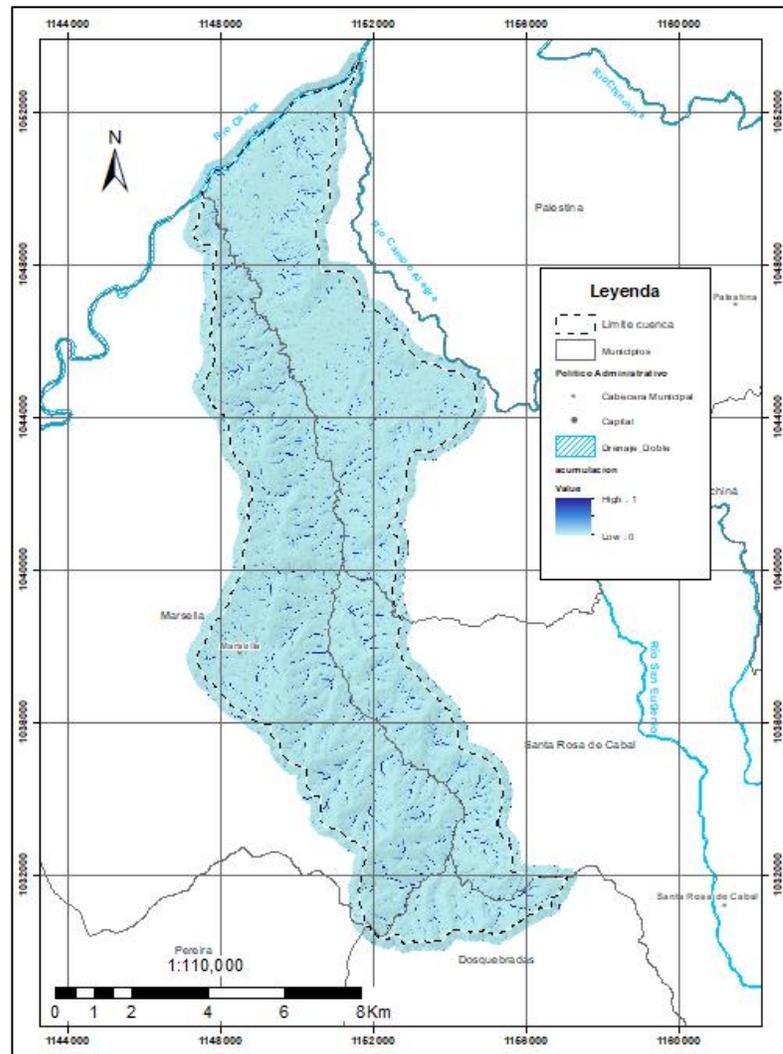


Figura 23 Mapa de acumulación de flujo de aguas.
Fuente: Este estudio.

11.9. Longitud de cuenca acumulada (long2)

Esta variable da una indicación del tamaño de la cuenca acumulada, la capacidad de la misma para concentrar agua subterránea y de la posible acumulación de sedimentos. Se obtiene a partir de la dirección de flujo que permite posteriormente calcular la longitud máxima de la cuenca acumulada para cada celda del DEM.

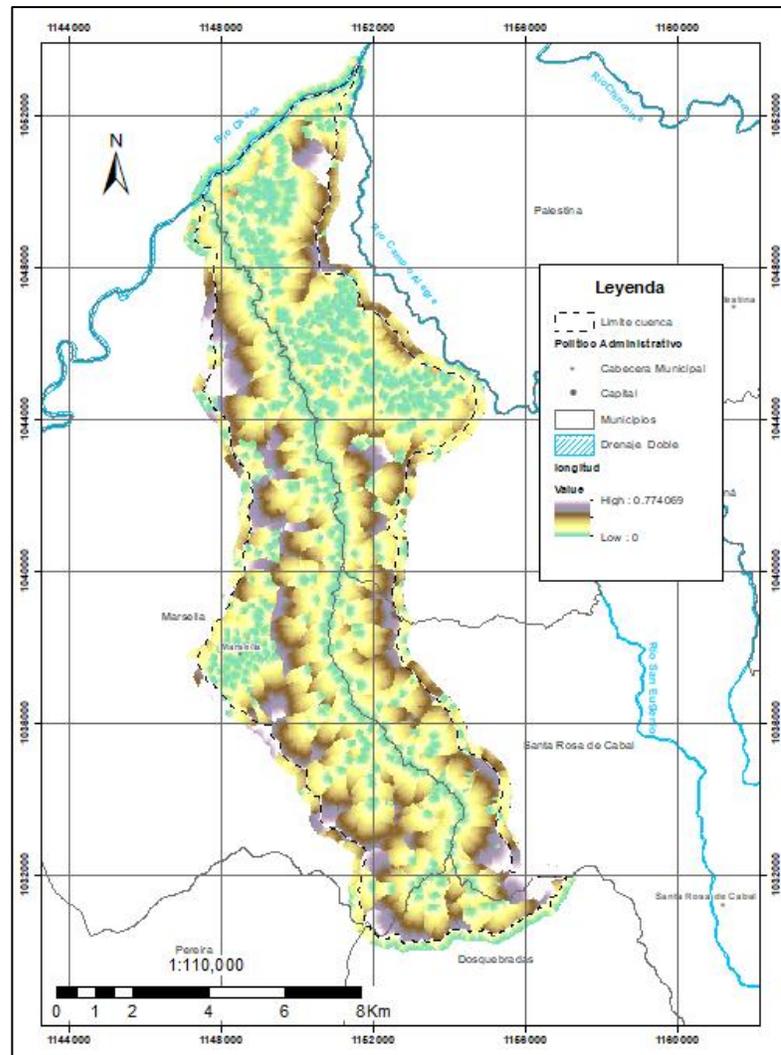


Figura 24 Mapa de la longitud de la cuenca acumulada.
Fuente: Este estudio.

11.10. Relieve relativo. (relieverel2)

Este indicador representa la rugosidad del relieve natural del terreno. Se define como la relación de la mayor diferencia de altura sobre el área de captación determinada. Hace referencia a la variabilidad del territorio entre el máximo y el mínimo, teniendo en cuenta las condiciones de elevación.

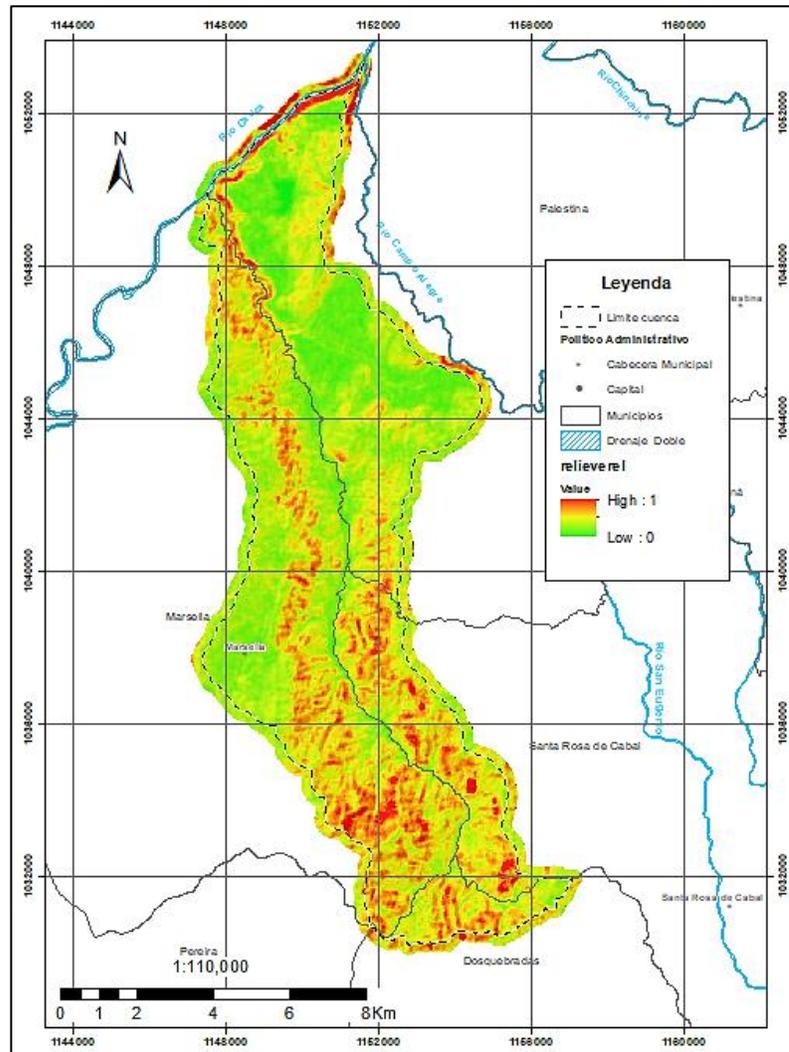


Figura 25. Mapa de relieve relativo.
Fuente: Este estudio.

11.11. Pendiente senoidal (snoidal1)

Corresponde a la pendiente senoidal de la ladera que tiene un comportamiento relevante con respecto a las zonas de rotura de los deslizamientos superficiales, pues la afectación del aumento de la pendiente es proporcional hasta los 45°, valor a partir del cual empieza a tener un comportamiento inversamente proporcional.

Debido a que los valores de Pendiente Senoidal de la Ladera varían de 0 a 1, donde 0 significa que el terreno es más estable y 1 cuando el terreno es más susceptible a sufrir un evento de remoción en masa, la calificación para esta variable es equiparable con su valor.

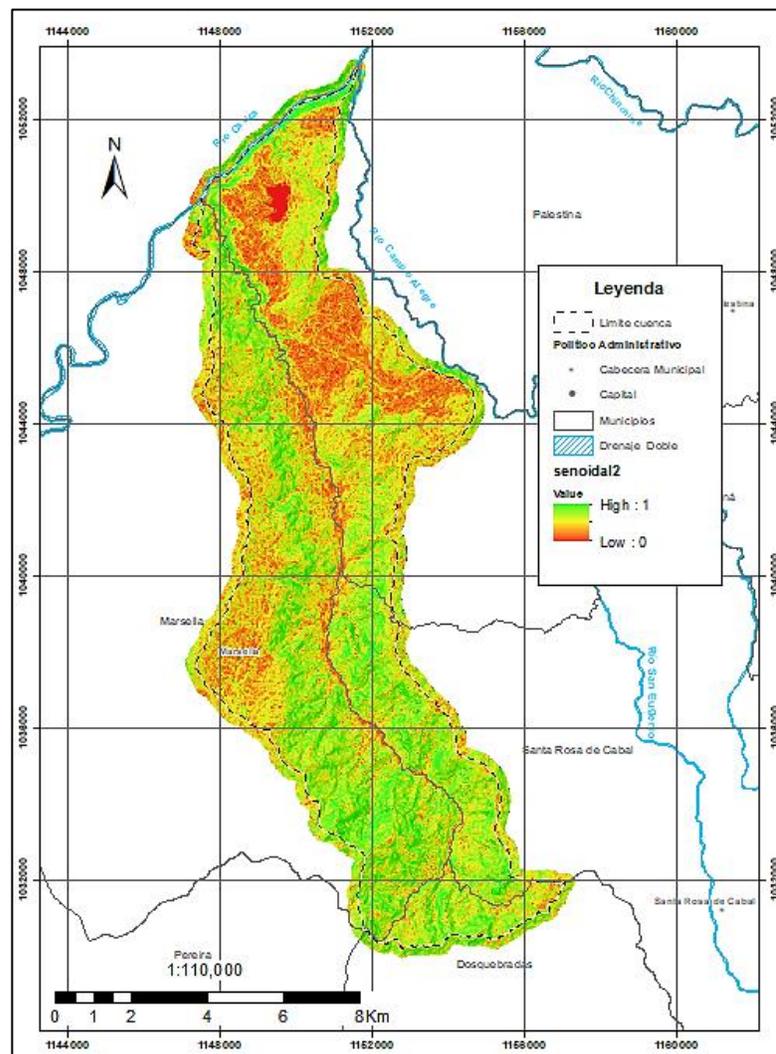


Figura 26. Mapa Densidad de drenaje.
Fuente: Este estudio.

12. VARIABLES DE PROXIMIDAD

Uno de los factores condicionantes capaz de aumentar o disminuir la susceptibilidad de una zona a eventos de fenómenos de remoción en masa son las variables con relación de proximidad, ya que entre menor distancia se tenga con uno de estos factores condicionantes como drenaje, vías, fallas, se presentará un incremento en los factores contribuyentes a la generación de remoción en masa.

La distancia a vías y fallas son unos de los condicionantes más fuertes para aumentar o disminuir la susceptibilidad de una zona a eventos de remoción en masa: la distancia a vías representa un factor antrópico que propicia la desestabilización de taludes por corte, remoción de material y ausencia de vegetación, en especial para las vías las cuales en general no cuentan con obras de estabilización de laderas luego de su construcción y adecuación.

Con respecto a la distancia a fallas, toma gran importancia ya que se convierte en un contribuyente a la generación de procesos ante el fracturamiento que experimentan las rocas ante la influencia de dichos elementos tectónicos. La distancia a drenajes representa zona de inestabilidad en cercanía a drenajes y cauces ante cambios notables en la humedad, superficies de las riberas entre otras que generan variaciones en las condiciones de estabilidad del sitio y la densidad de drenaje representa la capacidad de evacuación de aguas de la cuenca.

El método utilizado para llevar a cabo los análisis de proximidad fue llevado a cabo a partir de la *Distancia Euclidiana*, la cual describe la relación de cada celda con un origen o un conjunto de orígenes basándose en la distancia de la línea recta (distancia euclidiana) en las unidades de proyección del ráster, como pies o metros, y se computan desde el centro de la celda hasta el centro de la celda⁹.

12.1. Distancia a drenajes (distdren2)

Esta variable hace referencia a la presencia del sistema de la red de drenaje, la cual se relaciona con las áreas próximas al drenaje de las corrientes donde se presentan riberas, taludes verticalizados a subverticalizados, altas zonas de humedad, presencia de manantiales, empozamientos, zonas de infiltración, entre otros que pueden contribuir la generación de procesos morfodinámicos.

En la siguiente página se presenta la tabla de calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua utilizada para el presente estudio (Ver Tabla 22), de igual forma, se presenta la salida ráster del mapa de distancia a drenajes obtenido para la cuenca en interés (Figura 27):

⁹ <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis>.

Tabla 22. Calificación y categorización de la distancia a cuerpos de agua.

DISTANCIA A CUERPOS DE AGUA (Grosor del buffer en m)	CATEGORIA DE SUSCEPTIBILIDAD	PESO
0 – 10	Alta	1
10 - 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Este estudio.

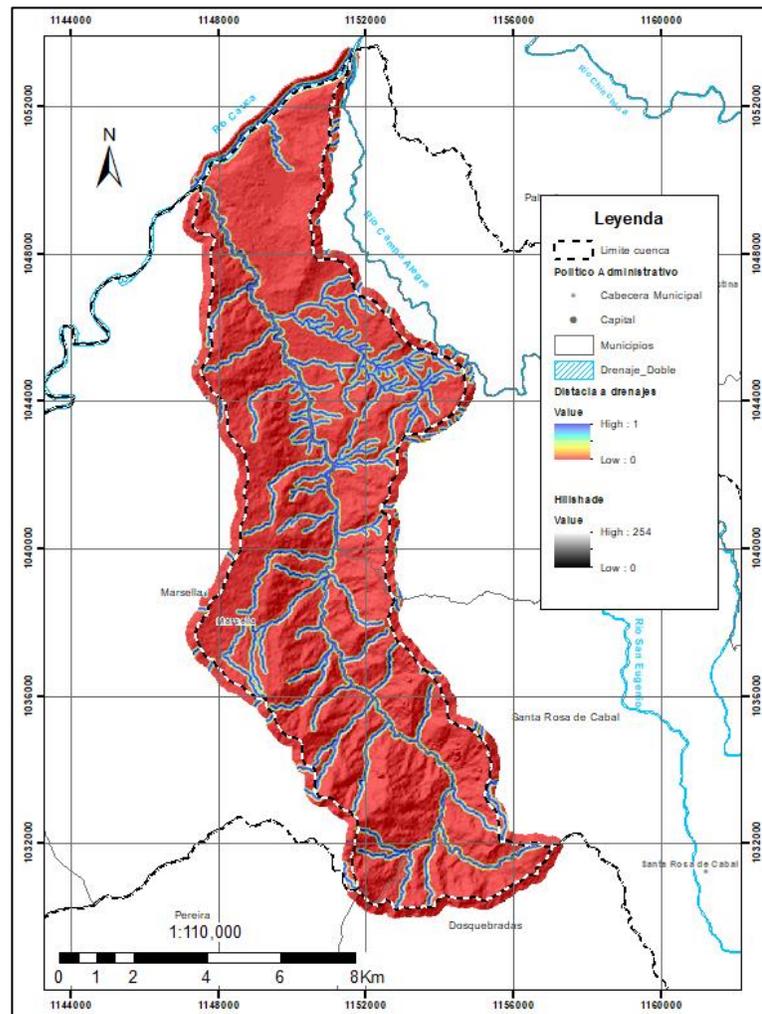


Figura 27. Mapa de distancia drenajes.

Fuente: Este estudio.

12.2. Distancia a vías (distvias2)

Corresponde a las zonas en las que, por el paso de las vías, se concibe presencia antrópica por la facilidad de acceso que genera, y el área es determinada mediante la obtención de la densidad vial de acuerdo con la influencia que esta presenta para cada pixel, adicionalmente se tiene en cuenta el tipo de vía, asignándole mayor peso a las de más alta categoría y disminuyendo por cada tipo.

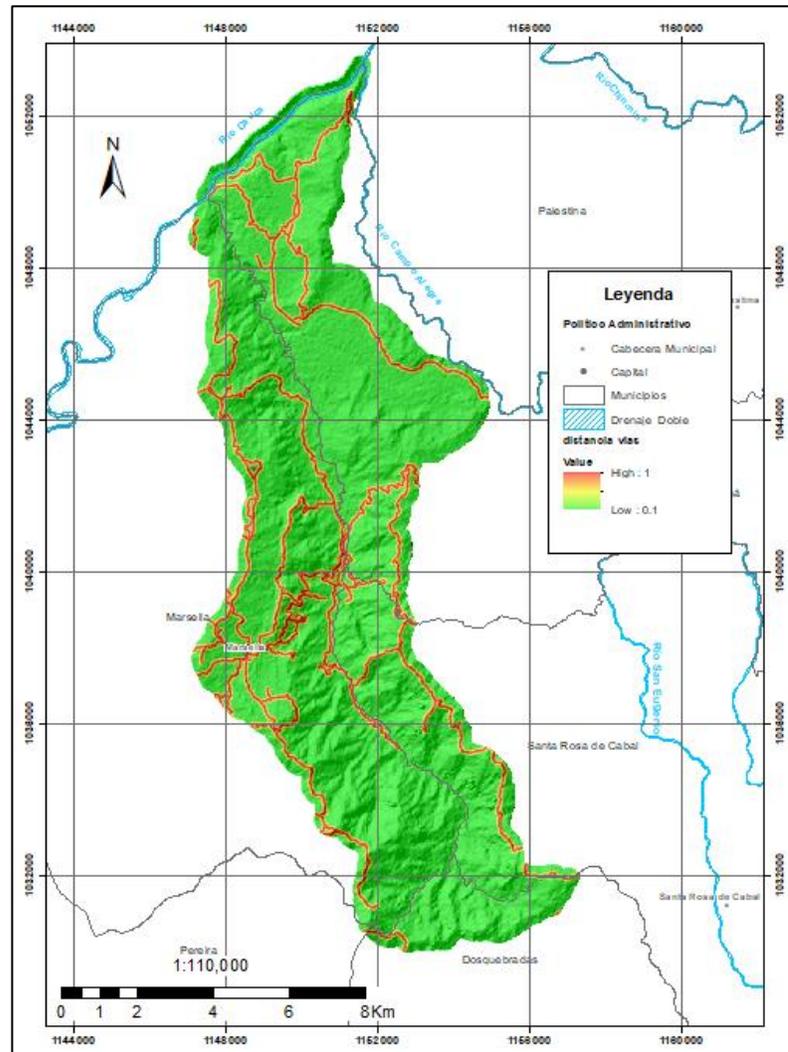


Figura 28. Mapa distancia vías.

Fuente: Este estudio.

En la siguiente tabla se presenta la calificación y categorización de la distancia a vías utilizada en el presente estudio.

Tabla 23 Calificación y categorización de la distancia a vías.

DISTANCIA A VÍAS (Grosor del buffer en m)	CATEGORÍA DE SUSCEPTIBILIDAD	PESO
0 – 10	Alta	1
10 - 20	Alta	0,9
20 – 30	Alta	0,8
30 – 40	Alta	0,7
40 – 50	Moderada	0,6
50 – 60	Moderada	0,5
60 – 70	Moderada	0,4
70 – 80	Baja	0,3
80– 90	Baja	0,2
100	Baja	0,1

Fuente: Este estudio.

12.3. Distancia fallas y lineamientos (fallas3)

Corresponde a las variaciones en las calidades de los materiales asociados a la afectación por elementos estructurales tipo fallas y lineamientos que generan condiciones diversas en la calidad de los macizos rocosos y materiales existentes y relacionado con la densidad de fracturamiento. Se determina que a menor distancia a las fallas se presenta mayor densidad de fracturamiento, aumentando la susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Por lo anterior, se realiza la siguiente clasificación y calificación y de manera gráfica se remite el mapa de para distancia a fallas en la figura siguiente:

Tabla 24. Calificación y categorización de la distancia a fallas y lineamientos.

DISTANCIA FALLAS Y LINEAMIENTOS (Grosor del buffer en m)	CATEGORIA	PESO
0 – 100	Alta	1
100 – 200	Alta	0,9
200 – 300	Alta	0,8
300 – 400	Alta	0,7
400 – 600	Moderada	0,6
600 – 800	Moderada	0,5
800 – 1000	Moderada	0,4
1000 – 2000	Baja	0,3
2000– 3000	Baja	0,2
>3000	Baja	0,1

Fuente: Este estudio.

La salida cartográfica de la capa de distancia a fallas y lineamientos se relaciona en la Figura 12. Izquierda: Mapa estructural de la zona de estudio sobre el ráster de sombras. Derecha: Ráster de Distancia Euclidiana de fallas y lineamientos.

13. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

Inicialmente se utilizó el modelo digital del terreno a escala 1:25.000 con base en la cartografía básica existente utilizado para el análisis geomorfológico y a partir de este insumo y con el uso de herramientas SIG, se generaron las variables secundarias que se describirán posteriormente.

Posteriormente se llevó a cabo la categorización y calificación de cada una de las variables condicionantes de acuerdo con clasificaciones establecidas en metodologías propuestas.

Para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa se realizó una evaluación de factores de propensividad dentro de un análisis multivariante discriminante para la asignación de coeficientes o pesos para el método de Superposición Ponderada, dentro de una función discriminante ajustada por una variable de agrupación definida como sitios estables e inestables considerando la metodología planteada por Carrara (1991), Baeza (1996), Nuria (2001), Santacana (2003) y Cardona (2013).

13.1. Mapa de susceptibilidad ante Movimientos en Masa

Para la elaboración del mapa final de susceptibilidad se optó por dividir la serie en intervalos iguales según la distribución del histograma de frecuencias de los datos, de manera que cada uno de los rangos contenga igual cantidad de datos efectuando ajustes según la desviación estándar y la media de los resultados. Adicionalmente, se realizó el ajuste de contornos según los resultados obtenidos y así se definieron las zonas con mayor o menor susceptibilidad a movimientos en masa.

Para establecer los niveles o categorías de susceptibilidad se han dividido los valores del ráster en tres rangos iguales según el PROTOCOLO PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LOS PLANES DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (MinAmbiente, MinHacienda, Fondo Adaptación - 2014) así:

- SUSCEPTIBILIDAD ALTA
- SUSCEPTIBILIDAD MEDIA
- SUCEPTIBILIDAD BAJA

A partir de los análisis efectuados, se elabora el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa para la zona de interés, en donde se han identificado los sectores con baja, media y alta susceptibilidad para este tipo de eventos. Como se observa en el Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa (Ver Figura 29), el color rojo representa la susceptibilidad ALTA, la susceptibilidad MEDIA es representada en color amarillo y la BAJA en verde.

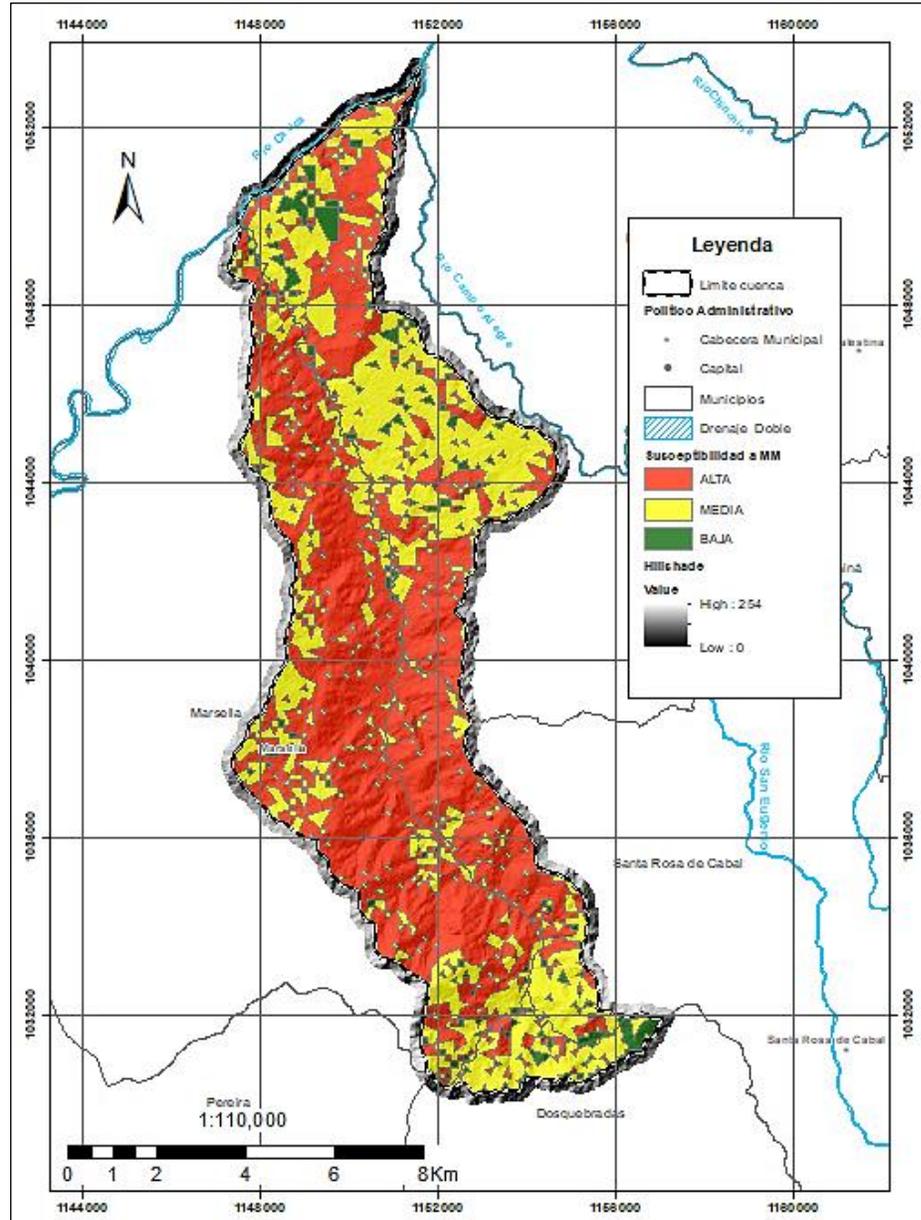


Figura 29. Mapa de susceptibilidad ante movimientos en masa.

Fuente: Este estudio.

La mayor parte de las zonas de Alta susceptibilidad se pueden encontrar en la parte central de la cuenca y sobre todo el flanco oriental montañoso, en donde se ubica el municipio de Marsella. Existen áreas de laderas con pendientes menos pronunciadas con categoría de susceptibilidad Media distribuidas en mayor medida sobre la parte más alta de la cuenca al sur y sobre sus zonas más bajas al norte en inmediaciones a la central hidroeléctrica de la CHEC. Las zonas de susceptibilidad Baja se distribuyen aleatoriamente sobre parte de la cuenca y se concentran sobre pequeñas áreas en la parte alta y baja de la subcuenca.

En la siguiente tabla se remite las áreas de susceptibilidad relacionadas con el área de interés del presente informe.

Tabla 25. Análisis de susceptibilidad frente a fenómenos de MM.

SUSCEPTIBILIDAD	ÁREA (ha)	%
ALTA	5449.45	57%
MEDIA	3732.64	39%
BAJA	416.35	4%
Total general	9598.44	100%

Fuente: Este estudio.



Figura 30. Porcentaje de áreas de susceptibilidad a Movimientos en Masa (MM).

Fuente: Este estudio.

A nivel municipal se establece que el municipio de Marsella es el que presenta mayor porcentaje de niveles de Susceptibilidad ALTA y MEDIA con un valor acumulado para ambas categorías del 45%; seguido de Chinchiná que presenta un acumulado del 33% para las mismas categorías. Posteriormente se ubican el municipio de Santa Rosa de Cabal con un porcentaje del 14%, y Dosquebradas con un porcentaje del 5%.

Los cuatro (4) municipios relacionados representan en conjunto el 65% del total del área de la subcuenca evaluada para los niveles de susceptibilidad Alta y Media. Los porcentajes restantes están distribuidos en los municipios mismos municipios para los diferentes niveles de susceptibilidad.

En la siguiente tabla se remiten los porcentajes para cada categoría de susceptibilidad por cada municipio y sus respectivas veredas presentes en la subcuenca:

Tabla 26. Distribución por veredas de las áreas susceptibles a MM.

SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA POR VEREDAS									
MUNICIPIO	VEREDAS	ALTA		MEDIA		BAJA		Total general	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Chinchiná	Guacamayo	192.45	92%	16.02	8%	0.18	0%	208.65	100%
	El Trebol	214.98	57%	152.68	41%	6.83	2%	374.49	100%
	La Esmeralda	604.58	47%	564.50	44%	122.23	9%	1291.31	100%
	Buenavista	150.38	39%	227.45	58%	11.12	3%	388.95	100%
	La Cachucha	42.98	29%	102.72	70%	0.50	0%	146.19	100%
	Moravo	125.67	15%	625.47	76%	69.53	8%	820.68	100%
	Altamira	9.67	9%	95.68	87%	4.44	4%	109.79	100%
Total Chinchiná		1340.71	40%	1784.52	53%	214.83	6%	3340.06	100%
Dosquebradas	La Argentina	35.17	26%	93.92	68%	8.80	6%	137.89	100%
	El Chaquiro	28.25	14%	147.71	73%	25.30	13%	201.25	100%
	La Union	1.45	6%	19.36	84%	2.10	9%	22.91	100%
	La Rivera	3.06	3%	54.13	55%	41.31	42%	98.50	100%
	Sin nombre	0.07	0%	17.43	76%	5.48	24%	22.98	100%
	Filobonito		0%	7.93	95%	0.43	5%	8.36	100%
Total Dosquebradas		67.99	14%	340.48	69%	83.42	17%	491.90	100%
Marsella	La Miranda	0.04	100%		0%		0%	0.04	100%
	Sin nombre	34.91	94%	1.21	3%	0.98	3%	37.11	100%
	El Zurrumbo	1.83	92%		0%	0.16	8%	1.99	100%
	CantaDelicia	224.40	91%	21.78	9%		0%	246.18	100%
	San Jose	253.47	89%	26.90	9%	4.05	1%	284.43	100%
	La Armenia	0.10	89%	0.01	11%		0%	0.11	100%
	San Andres	203.98	88%	26.20	11%	0.86	0%	231.04	100%
	San Carlos	110.39	86%	17.40	14%		0%	127.79	100%
	El Rayo	513.92	82%	108.53	17%	5.49	1%	627.95	100%
	Valencia	348.79	77%	100.66	22%	3.06	1%	452.52	100%
	Buenavista	476.43	69%	197.55	29%	17.05	2%	691.03	100%
	El Pajui	161.20	67%	79.85	33%		0%	241.05	100%
	El Kiosco	137.09	64%	71.55	33%	5.16	2%	213.80	100%
	La Palma	136.68	64%	78.45	36%		0%	215.13	100%
	Miracampo	207.07	54%	162.62	43%	11.82	3%	381.51	100%
	Alto Cauca	60.92	54%	48.46	43%	3.64	3%	113.02	100%
	Caracas	32.27	49%	32.35	49%	1.07	2%	65.69	100%
	La Linda	5.29	47%	6.09	53%		0%	11.38	100%
	El Sinai	45.69	35%	78.14	59%	8.11	6%	131.94	100%
	El Nudo	15.24	32%	27.54	58%	4.78	10%	47.57	100%
Mil Ochenta	24.83	29%	59.77	71%		0%	84.59	100%	
Corozal	3.31	22%	11.43	78%		0%	14.74	100%	
Total Marsella		2997.87	71%	1156.49	27%	66.25	2%	4220.61	100%
Santa Rosa de Cabal	Bajo Español	0.91	100%		0%		0%	0.91	100%
	Tres Esquinas	9.10	87%	1.37	13%		0%	10.47	100%
	Cuchilla Atravesada	215.41	87%	32.75	13%		0%	248.16	100%
	El Zancudo - El Español	446.15	86%	72.02	14%	2.42	0%	520.59	100%
	La Flórida	185.85	84%	30.52	14%	3.63	2%	220.00	100%
	Caracol	0.93	53%	0.38	21%	0.45	26%	1.75	100%
	El Chuzo	85.52	23%	256.80	68%	34.91	9%	377.22	100%
	Sin nombre	0.60	11%	3.08	56%	1.85	33%	5.53	100%
Total Santa Rosa de Cabal		944.47	68%	396.91	29%	43.26	3%	1384.64	100%
Total general		5351.04	57%	3678.40	39%	407.76	4%	9437.20	100%

Fuente: Este estudio.

De esta forma, la anterior tabla muestra el compilado de los resultados de cada una de las veredas por categoría de susceptibilidad, relacionando el área en hectárea de cada categoría y su respectivo valor en porcentaje de la ocupación dentro del área de la cuenca. Las veredas de cada municipio han sido organizadas de mayor a menor de acuerdo al valor de porcentaje de ocupación obtenido para la categoría de susceptibilidad Alta por fenómenos de remoción en masa.

Por otro lado, aquellos resaltados con rojo corresponden a los nombres de las veredas de cada municipio que poseen la mayor área en hectárea en categoría de susceptibilidad Alta. En ese sentido, veredas como La Esmeralda, El Rayo y El Zancudo-Español son las que mayor porcentaje en área poseen en susceptibilidad Alta.

Tabla 27. Distribución de áreas de susceptibilidad ante Movimientos en Masa por municipio.

MUNICIPIO	SUSCEPTIBILIDAD	AREA_ha	%
Chinchiná	ALTA	1340.71	14%
	MEDIA	1784.52	19%
	BAJA	214.83	2%
Dosquebradas	ALTA	67.99	1%
	MEDIA	340.48	4%
	BAJA	83.42	1%
Marsella	ALTA	3073.50	32%
	MEDIA	1232.11	13%
	BAJA	76.25	1%
Santa Rosa de Cabal	ALTA	944.47	10%
	MEDIA	396.91	4%
	BAJA	43.26	0%
Total general		9598.44	100%

Fuente: Este estudio.

13.2. Áreas críticas

Las áreas críticas corresponden a las zonas delimitadas según el nivel de susceptibilidad con categoría MEDIA y ALTA identificadas en el mapa definitivo y que se convierten en las zonas de análisis particular para la posterior evaluación del nivel de amenaza ante Movimientos en Masa MM.

A partir de la identificación de las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos de Movimientos en Masa del mapa de susceptibilidad, se procede a realizar el análisis de la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa. Se definieron un total de seis (3) zonas críticas las cuales poseen una distribución mayoritaria en los municipios de Marsella, Dosquebradas y Santa Rosa, como se detalla en la siguiente tabla y en la figura de las zonas críticas definidas (Ver Figura 31).

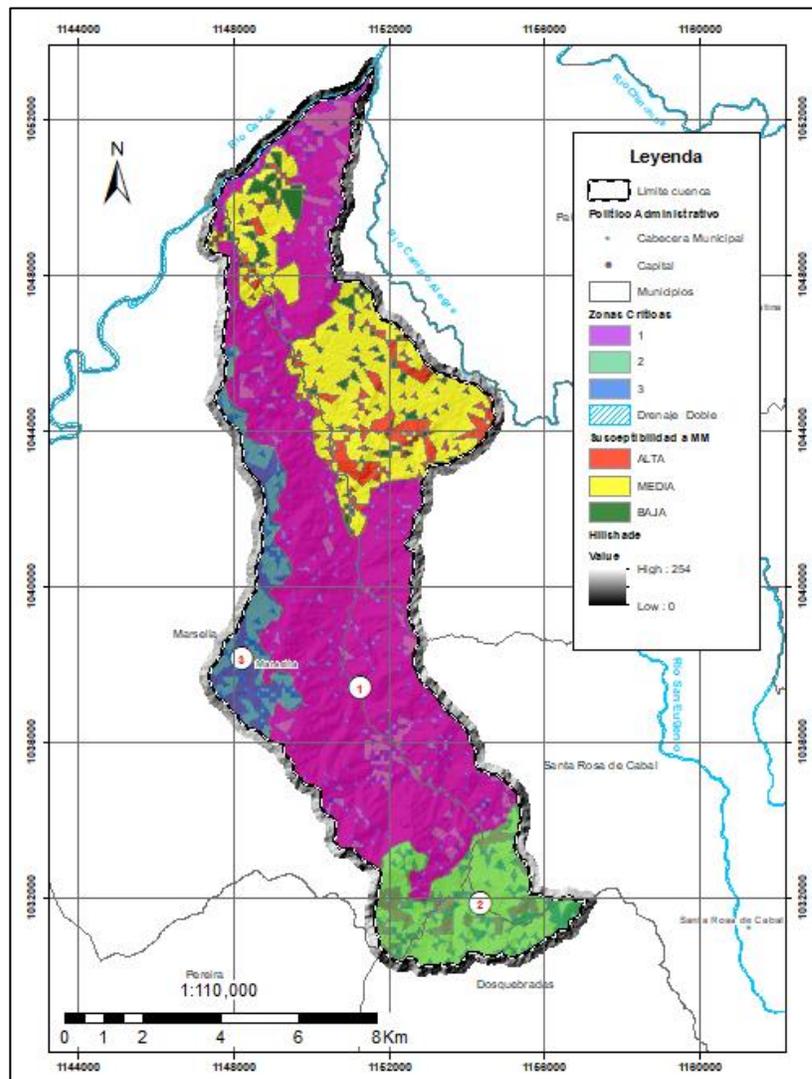


Figura 31. Mapa de Áreas críticas según categorías de susceptibilidad ALTA y MEDIA ante movimientos en masa.

Fuente: Este estudio.

Se aprecia que la zona 1 corresponde generalmente a una zona de susceptibilidad Alta, la cual se distribuye a lo largo de toda la cuenca y comprende básicamente las laderas de alta pendiente del valle del río San Francisco, extendiéndose desde el sur al norte hasta las inmediaciones del río Cauca. Las zonas 2 y 3 se localizan, respectivamente, sobre la parte alta de la cuenca y sobre el flanco Oeste del valle del río San Francisco.

La zona 3 corresponde a un área de consideración crítica dada la presencia del casco urbano del municipio de Marsella y por la catalogación de un área en susceptibilidad Media-Alta. En cambio, la zona 2 se considera como un área crítica debido a la presencia de numerosos fenómenos de RM ocurridos en esa zona, es el nacimiento de importantes cauces como la Quebrada La Nona y del mismo río San Francisco y porque además existe la presencia de varios caseríos en ese sector.

14. CONCLUSIONES

El mapa de susceptibilidad ante Movimientos en Masa (MM) generado tuvo como lineamientos principales lo establecido en el Protocolo de Gestión del Riesgo para POMCAs (MinAmbiente, MinHacienda, Fondo Adaptación 2014) y los aspectos adicionales establecidos en el decreto 1807 del 2014, implementando la metodología de superposición ponderada como herramienta en el análisis espacial, la cual aplica uno de los enfoques más utilizados en el análisis de superposición para resolver problemas de varios criterios, como por ejemplo, la selección de sitios de susceptibilidad y la determinación de áreas críticas.

Las categorías de susceptibilidad están basadas en el número o densidad de deslizamientos por área, o también en la probabilidad espacial relativa a la zona de estudio. Por tanto, la selección de los factores para el análisis depende en cierta parte del conocimiento de la zona de estudio y la disponibilidad de información, por lo que los factores recomendados en el Protocolo de Gestión del Riesgo para POMCAS no restringen la posibilidad de usar más datos, siempre y cuando estén orientados a explicar la ocurrencia actual y futura de movimientos en masa.

Los diferentes mapas generados anteriormente constituyen, de algún modo, una herramienta para incorporar en los procesos actuales de revisión y ajustes del ordenamiento territorial locales y de Planes de ordenación y manejo de cuencas mayores que contenga a la subcuenca del río San Francisco, a su vez, dichos insumos posibilitarán adelantar un mejor aprovechamiento de los territorios desde cualquiera de los ámbitos sectoriales, fortaleciendo el conocimiento de las restricciones ambientales territoriales desde la dimensión de la gestión del riesgo de desastres, el análisis integral del territorio, la toma de decisiones y, en consecuencia, el desarrollo sostenible.

De igual forma, la información temática aquí suministrada reúne las condiciones mínimas para ser utilizada en un Sistema de Información Geográfica y proporciona los datos fundamentales necesarios para el desarrollo de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales-ICDE, cuyo objetivo es organizar la producción de datos geográficos y facilitar su acceso y uso para el desarrollo del país.

Por otro lado, con respecto al método cartográfico de Superposición Ponderada utilizado, cabe aclarar que se vuelve un poco subjetivo su implementación puesto que requiere de la experiencia técnica del profesional en el tema (heurístico), aunque puede llegar a proporcionar resultados muy acertados toda vez que se realicen bajo criterios, metodologías y protocolos estipulados para la evaluación y zonificación de la susceptibilidad, ya que de esa forma se garantiza muy poco de la experticia profesional del tema y se requiera en cambio buenos conocimientos en los Sistemas de Información Geográfica y de sus herramientas asociadas.

15. RECOMENDACIONES

- Se debe iniciar controles de campo dentro del área de estudio, apoyado en los respectivos formatos geológicos, geomorfológicos, geotécnicos y de suelos del SGC, labor dirigida a consolidar la cartografía básica 1:100.000 obtenida y detallar esta información para una escala 1:25.000 requerida para los POMCAs. En esta actividad se definirán los tipos de rocas y depósitos (composición, textura, estructura, sorteamiento, porosidad y permeabilidad), grado de meteorización y sus disposiciones estructurales (rumbo y buzamiento), fallas, rasgos estructurales, familias predominantes de diaclasas y fracturas (tomadas en los sitios de control regional), tipos de depósitos (traslocados y transportados); materiales residuales y una descripción del perfil de suelo orgánico (A,B,C) representativos de la cuenca.
- Debido a que gran parte de variables que entran al proceso de evaluación de susceptibilidad se obtienen a partir de un Modelo Digital de Terreno a escala 1:100.000 y en algunos casos a escala 1:25.000, este último con resolución espacial aceptable para los POMCAs de 12.5 metros, sin embargo, se considera necesario trabajar en lo posible con resoluciones mayores de al menos 1 metro por pixel, puesto que esto aumentaría el detalle de las variables secundarias y la precisión de las modelaciones posteriores.
- Aunque los resultados de susceptibilidad obtenidos en este estudio presentan una precisión aceptable dado los alcances planteados en el proyecto, estos nos permiten tener una primera evaluación de la probabilidad de ocurrencia a los fenómenos de Movimientos en Masa, sin embargo, es necesario implementar análisis estadísticos para depurar los datos de entrada y que a su vez induzcan a reducir el error. En ese sentido, se recomienda realizar un análisis multivariable con función discriminante, el cual tiene como objetivo encontrar, dado un número de variables independientes, combinaciones lineales de aquellas variables que mejor separen los grupos de casos de zonas estables de las inestables, considerando las metodologías planteadas por Carrara (1991), Baeza (1996), Nuria (2001), Santacana (2003) y Cardona (2013).
- Se recomienda en lo posible realizar también un análisis de estabilidad de taludes, el cual implica básicamente hacer un estimativo del modelo de falla de toda el área de estudio y de la resistencia al corte, con el objetivo de determinar la predicción de las cargas que serán resistidas por el suelo, las tasas de filtración de agua y los esfuerzos de corte críticos que tratarán de producir la falla. Para ello, es necesario realizar ensayos de laboratorio de suelos y rocas en miras a conocer el comportamiento geotécnico de variables como la granulometría, límites, humedad y consolidación, así como de parámetros geomecánicos del macizo rocoso como resistencia a la compresión inconfiada, cohesión y fricción, para que posteriormente estos resultados sean tabulados y ayuden a determinar espacialmente las zonas o unidades geológicas superficiales que presentan menor factor de seguridad y sean propicias para la generación de movimientos en masa.

BIBLIOGRAFÍA.

Baeza, C. y Corominas, J. (2001): Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1251-1263.

BID, Universidad Nacional de Colombia - IDEA. (2003): “Indicadores para la gestión de Riesgos – Fundamentos Metodológicos”. Manizales, Colombia.

Borrero, C. (2012): Identificación y Análisis de Amenazas para evaluar la vulnerabilidad y riesgo de las Cuencas Hidrográficas de los ríos Arma y Campoalegre, y Aferentes Directos a los ríos Cauca y Magdalena. Informe de Avance No. 2. Amenaza Incendios. Contrato Corpocaldas No. 089 de 2012. 54 p.

Caballero, H., Zapata, G. et. al., (1984): Geología de la Plancha 224 de Pereira a escala 1:100.00. Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. Versión digital 2009.

CARDER – CORPOCALDAS, (2014): Aporte de insumos con énfasis en la temática de gestión del riesgo para la revisión y ajuste del plan de ordenación y manejo del nivel subsiguiente del río Campoalegre y otros directos al Cauca - sector San Francisco. Convenio 531 de 2013.

Carvajal, H. (2011): Propuesta de estandarización de La cartografía Geomorfológica en Colombia, Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS.

Cascini L. (2008): Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. Department of Civil Engineering, University of Salerno, via Ponte don Melillo, Italy.

Cruz G. A. et al. (2004). Geoquímica de las rocas del stock de Chinchiná Santa Rosa.

Estrada, J. J., Viana, R., (1998): Geología de la Plancha 205 de Chinchiná a escala 1:100.00. Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS. Versión digital 2006.

Gaspari, F. J. Multequina, (2011): Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. ISSN: 1852-7319.

Gómez, J., Nivia, A., Montes, N.E., Jiménez, D.M., Tejada, M.L., Sepúlveda, J., Osorio, J.A., Gaona, T., Diederix, H., Uribe, H. & Mora, M., (2007): Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:2'800.000. INGEOMINAS, 2 edición. Bogotá.

Gutiérrez, E. M., (2008): Geomorfología. Madrid (España). ISBN: 978-84-8322-389-5

Jaramillo, J. (2010): Complejo Quebradagrande, arco volcánico engrosado generado de un bloque continental. Universidad Nacional de Colombia.

Kammer, A. (1993). Las fallas Romeral y su relación con la tectónica de la cordillera central, Universidad Nacional de Colombia.

MinAmbiente, MinHacienda, Fondo Adaptación (2014): Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.

Ministerio de. Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014): Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas –POMCA-

Montero, J., (2017): Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Servicio Geológico Colombiano. ISBN: 978-958-59782-1-8.

Nguyen, T. L. (2008): Landslide Susceptibility Mapping of the Mountainous Area in a Luoi District, thua Thien Hue Province, Vietnam. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering Thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree of Doctor in Engineering. Vrije Universiteit Brussel. Faculty of Engineering. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering. Promoter: Prof. dr. ir. F. De Smedt. VUB – HYDROLOGIE (52). 229 p.

Nuria Santacana, Quintas, Jordi Corominas, Dulcet. (2001): Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de SIG – Aplicación a la cuenca alta del río LLobrega”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

Van Westen, J.C., Castellanos, E. and Kuriakose, Sekhar L. (2008): Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. Engineering Geology 102: 112–131.

Varnes, D.J., (1978), Slope movement types and processes, En: Schuster, R.L., and Krizek, R.J., Landslide analysis and control: National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Special Report 176, p. 11-33.

Zinck, A. (2012): GEOPEDOLOGIA: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Special Lecture Notes Series, ISBN: 90 6164 339 2.