

**ANÁLISIS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:25000 DEL SGC EN LA VEREDA KERMAN, MUNICIPIO DE QUIMBAYA, QUINDÍO**



**Universidad  
Católica  
de Manizales**

**NATALIA CARDONA NOREÑA**

**Geóloga**

**MAURICIO SERNA YEPES**

**Geólogo**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESPECIALIZACIÓN EN PREVENCIÓN, REDUCCIÓN Y ATENCIÓN DE DESASTRES  
AGOSTO 2019**

**ANÁLISIS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:25000 DEL SGC EN LA VEREDA KERMAN, MUNICIPIO DE QUIMBAYA, QUINDÍO**

**Monografía presentada como requisito para optar el título de Especialistas en Prevención, Reducción y Atención de Desastres**

**NATALIA CARDONA NOREÑA**

**Geóloga**

**MAURICIO SERNA YEPES**

**Geólogo**

**Tutor**

**PhD. John Makario Londoño**

**Geólogo**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESPECIALIZACIÓN EN PREVENCIÓN, REDUCCIÓN Y ATENCIÓN DE DESASTRES  
AGOSTO 2019**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
2. JUSTIFICACIÓN .....	9
3. OBJETIVOS .....	10
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	10
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
4. MARCOS CONCEPTUALES .....	11
4.1. REFERENCIAL .....	11
4.2. MARCO NORMATIVO .....	13
4.3. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL .....	13
5. UNIDAD GEOGRÁFICA .....	15
6. METODOLOGÍA GENERAL .....	16
6.1 REVISIÓN INFORMACIÓN SECUNDARIA.....	16
6.2. TRABAJO DE CAMPO.....	17
6.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA .....	17
7. ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES.....	19
7.1. FACTORES CONDICIONANTES .....	19
7.1.1. Geología .....	19
7.1.2. Unidades Geológicas Superficiales .....	22
7.1.3. Geomorfología .....	26
7.1.4. Cobertura de la tierra y uso del suelo.....	38
8. ANÁLISIS DE LA AMENAZA .....	41
8.1. AMENAZA REPORTADA A NIVEL REGIONAL SEGÚN EL SGC .....	41
8.2. MÉTODO ESTADÍSTICO BIVARIADO .....	42
8.2.1. Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa 1:5.000 .....	46
8.2.2. Cálculo de susceptibilidad.....	61
8.2.3. Mapa de susceptibilidad .....	62
8.3. ANÁLISIS DE AMENAZA.....	64
9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	66
10. CONCLUSIONES.....	69
11. RECOMENDACIONES .....	70
12. BIBLIOGRAFÍA.....	71

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización general del área de estudio .....	15
<b>Figura 2.</b> Pasos o momentos.....	16
<b>Figura 3.</b> Metodología para el cálculo de la amenaza por movimientos en masa 1:5.000.....	18
<b>Figura 4:</b> Mapa Geológico Estructural .....	20
<b>Figura 5.</b> Afloramiento Formación Armenia .....	21
<b>Figura 6:</b> Mapa de Unidades Geológicas Superficiales.....	23
<b>Figura 7.</b> Intercalaciones de flujos de lodo y escombros, Afluente Quebrada Buenavista.....	24
<b>Figura 8.</b> Depósitos Aluviales .....	25
<b>Figura 9.</b> Suelo antrópico urbano.....	26
<b>Figura 10.</b> Mapa de Subunidades Geomorfológicas.....	27
<b>Figura 11.</b> Quebrada Buenavista .....	28
<b>Figura 12.</b> Zona de escarpe del abanico en la vereda Kerman.....	30
<b>Figura 13.</b> Ladera escarpada de abanico .....	30
<b>Figura 14.</b> Relieve ligeramente inclinado.....	31
<b>Figura 15.</b> Mapa de Pendientes.....	32
<b>Figura 16.</b> Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente .....	34
<b>Figura 17.</b> Mapa de Curvatura .....	34
<b>Figura 18.</b> Mapa de procesos morfodinámicos .....	35
<b>Figura 19.</b> Deslizamientos en la vía hacia Panaca .....	36
<b>Figura 20.</b> Socavación en la Quebrada La Silenciosa .....	37
<b>Figura 21.</b> Gráfico explicativo.....	38
<b>Figura 22.</b> Mapa del uso del suelo en la vereda Kerman.....	39
<b>Figura 23:</b> Mapa de amenaza de movimientos en masa, municipio de Quimbaya (2015).....	41
<b>Figura 24.</b> Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante .....	43
<b>Figura 25.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante pendientes .....	49
<b>Figura 26.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante curvatura .....	50
<b>Figura 27.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante geomorfología .....	52
<b>Figura 28.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante unidades geológicas superficiales.....	54
<b>Figura 29.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante densidad de fracturamiento..	56
<b>Figura 30.</b> Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante uso del suelo.....	59
<b>Figura 31.</b> Curva de éxito.....	61
<b>Figura 32.</b> Curva de éxito categorizada .....	62
<b>Figura 33.</b> Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda Kerman .....	63
<b>Figura 34.</b> Mapa de amenaza a movimiento en masa .....	64
<b>Figura 35.</b> Comparativa de los mapas de susceptibilidad por remoción en masa en la vereda Kerman ....	66

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Niveles y métodos para calcular la amenaza por deslizamiento .....	12
<b>Tabla 2.</b> Leyenda Geológica .....	21
<b>Tabla 3.</b> Leyenda Unidades Geológicas Superficiales UGS .....	23
<b>Tabla 4.</b> Leyenda de geomorfología del área de influencia .....	27
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de las pendientes en la zona de estudio .....	33
<b>Tabla 6.</b> Clasificación del tipo de curvatura en el terreno .....	35
<b>Tabla 7.</b> Tabulación de Datos de la ficha de caracterización aplicada en 8 predios .....	37
<b>Tabla 8.</b> Clasificación del tipo de cobertura de la tierra y uso del suelo .....	39
<b>Tabla 9.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante pendientes .....	47
<b>Tabla 10.</b> Pesos finales para la variable pendiente aplicando el método WofE. ....	47
<b>Tabla 11.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante curvatura.....	50
<b>Tabla 12.</b> Pesos finales para la variable curvatura aplicando el método WofE .....	50
<b>Tabla 13.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante geomorfología .....	51
<b>Tabla 14.</b> Pesos finales para la variable geomorfología aplicando el método WofE .....	52
<b>Tabla 15.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante unidades geológicas superficiales .....	53
<b>Tabla 16.</b> Pesos finales para la variable unidades geológicas superficiales aplicando el método WofE.....	54
<b>Tabla 17.</b> Distancia en metros de las zonas de influencia dependiendo el tipo de estructura.....	55
<b>Tabla 18.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante densidad de fracturamiento .....	56
<b>Tabla 19.</b> Pesos finales para la variable densidad de fracturamiento aplicando el método WofE.....	56
<b>Tabla 20.</b> Procesamiento estadístico para el factor condicionante uso del suelo.....	58
<b>Tabla 21.</b> Pesos finales para la variable de uso del suelo aplicando el método WofE .....	58
<b>Tabla 22.</b> Descripción de las categorías de susceptibilidad .....	63
<b>Tabla 23.</b> Categorías de amenaza determinadas a partir del mapa de susceptibilidad .....	64
<b>Tabla 24.</b> Descripción de las categorías de amenaza.....	65
<b>Tabla 25.</b> Paralelo entre los porcentajes de las áreas clasificadas especialmente con categorías de susceptibilidad alta, media y baja obtenidos en la UPR, 2018 y este trabajo .....	66

## RESUMEN

El presente estudio tiene la finalidad de analizar la implementación de la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:25.000 implementada en la Unidad de Planificación Rural de la vereda Kerman en el año 2018, en una zona de aparente estabilidad debido a que los resultados delimitaban áreas de susceptibilidad media y alta, además, se indagó la aplicabilidad de la metodología por la baja cantidad de procesos morfodinámicos existentes en el sector.

Se verificó el estado de los factores condicionantes y detonantes utilizados, posteriormente se realizó un análisis detallado del geoprocesamiento con los Sistemas de Información Geográfica y se revisó el método estadístico bivariado implementado para el cálculo del índice de susceptibilidad por movimientos en masa; la guía fue implementada nuevamente de tal manera que se complementó la investigación con la realización de la curva de éxito la cual cuantifica la bondad del cálculo de los valores de susceptibilidad.

En la Unidad de Planificación Rural, 2018 utilizaron correctamente los factores condicionantes en el cálculo de susceptibilidad, no obstante, no tuvieron en cuenta dos pasos importantes, realizar una adecuada superposición de píxeles al convertir a formato ráster las capas temáticas y realizar un cálculo estadístico correcto. El segundo paso omitido, fue la realización de la curva de éxito, esta además de medir la bondad del cálculo, es un insumo para clasificar espacialmente la susceptibilidad, al no realizar esto sino categorizar la susceptibilidad con intervalos equidistantes, delimitó en gran medida zonas de susceptibilidad media y alta en la vereda Kerman, en contraste categorizando la susceptibilidad con base en la curva de éxito, la zona de topografía plana y de características de relativa estabilidad, se clasificó con una categoría de susceptibilidad baja, un resultado acorde con la naturaleza del territorio.

Al implementar nuevamente la metodología se aumentó el detalle 5 veces a los factores condicionantes: unidades geológicas superficiales, geomorfología, uso del suelo y densidad de fracturamiento, permitiendo aumentar la calidad de análisis. Una limitante para el cálculo fue la baja cantidad de procesos morfodinámicos, puesto que se sugiere que la metodología se implemente en áreas con alta densidad de movimientos en masa, sin embargo, el resultado obtenido de áreas predominantes de baja susceptibilidad sugiere la efectividad de la aplicación del método en el sector.

**Palabras clave:** Vereda Kerman, Amenaza, Susceptibilidad, Movimiento en Masa, Factores Condicionantes, Factores Detonantes.

## INTRODUCCIÓN

La guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 propuesta por el Servicio Geológico Colombiano, actualmente es la más utilizada en nuestro territorio nacional, la cual fue diseñada con el propósito de establecer una guía para los geocientíficos que permita la delimitación de las amenazas por deslizamientos en Colombia, sin embargo, nuestro país, es dinámico, cordillerano, con variedades en relieves, climas, tipos de vegetación, estos entre otros factores, dificultan la elaboración de una metodología estándar aplicable en cualquier parte del país para evaluar amenazas por deslizamientos. Debido a esto, se pretende analizar la validez de la aplicación de la guía metodológica en la vereda Kerman, en el Municipio de Quimbaya, Quindío.

Los procesos por remoción en masa, son bastante frecuentes en la región Andina colombiana, la cual acoge al menos el 52% de habitantes de la nación, además, es la región con mayor desarrollo económico y posee las mayores riquezas naturales de Colombia, por tal motivo, se genera la necesidad de realizar zonificaciones confiables, las cuales sean un insumo robusto para la toma de decisiones en la planificación territorial, este trabajo pretende evaluar la implementación de la metodología propuesta por el SGC, con el fin de aportar al conocimiento como componente de la Gestión del Riesgo de Desastres.

Se realizará un análisis minucioso de la implementación de la metodología donde se evaluarán los factores condicionantes y detonantes propuestos en la guía, con el fin de verificar que las condiciones de amenaza cartografiadas sean las condiciones reales. Este trabajo es un aporte al componente del conocimiento de la Gestión del Riesgo de Desastres, al evaluar la confiabilidad de los resultados de zonificaciones por movimientos en masa, generando parámetros para el mejoramiento en la realización de las mismas, lo cual puede contribuir a la disminución de la vulnerabilidad de la población ante la ocurrencia de este tipo de fenómenos tan frecuentes en nuestro territorio.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En 2018 se realizó una Unidad de Planificación Rural en la vereda Kerman, donde se elaboró los estudios básicos de acuerdo al Decreto 1077 de 2015, estableciendo una amenaza media en gran parte del centro poblado, generando el interrogante debido a que en la vereda Kerman no se presentan fenómenos de remoción en masa significantes ni cartografiables a escala 1:25000, sólo en zonas de ganadería se presentan algunas reptaciones delimitadas por fotografías aéreas, las cuales no generan afectaciones a la población.

Las Corporaciones Autónomas Regionales exigen la implementación de la guía metodológica para la evaluación de amenazas por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano, por ser la única entidad pública avalada a nivel nacional para realizar la divulgación del conocimiento geocientífico. La guía fue principalmente diseñada con base en el estudio de van Westen, 1993, no obstante, los métodos implementados en este trabajo fueron probados en el área de la cuenca del río Chinchiná, cerca de la ciudad de Manizales. Las características geológicas y geomorfológicas de la vereda Kerman son sumamente diferentes a la zona de estudio de van Westen; por tal motivo es necesario aplicar la metodología, con rigor técnico y científico para determinar las medidas y tener un mejor direccionamiento a la hora de aplicarla.

### a. Pregunta de investigación

¿Por qué es aplicable la implementación de la guía metodológica para la evaluación de movimientos en masa en la vereda Kerman, municipio de Quimbaya, Quindío?



## 2. JUSTIFICACIÓN

La realización de esta investigación será un insumo para el mejoramiento de las zonificaciones de amenazas por fenómenos de remoción en masa, puesto que, estudiará en detalle la implementación de la guía metodológica del SGC, en la vereda Kerman, con este aporte se verificará la aplicabilidad de la metodología para este sector, evaluando si el protocolo sugerido en ésta es el acertado para realizar este tipo de investigaciones.

La población del territorio colombiano está principalmente concentrada en la región Andina, la cual por su morfología y procesos geodinámicos es altamente susceptible a la ocurrencia de fenómenos por remoción en masa, por tal razón, es imprescindible la realización de estudios objetivos y certeros para la delimitación de zonas de amenaza, los cuales permitan la toma de oportunas decisiones en el ordenamiento territorial y la realización de medidas estructurales adecuadas para la mitigación del riesgo.

En la vereda Kerman en el año 2018, se elaboró una unidad de planificación territorial, en la cual, en el capítulo de gestión del riesgo, se presentó una amenaza media en gran parte del área de la vereda, sin embargo, al parecer las características geotécnicas y geomorfológicas no representan un escenario de riesgo.

Para la realización de este trabajo se cuenta con la información primaria y secundaria necesaria, hay disponibilidad de software tales como los sistemas de información geográfica para llevar a cabo los análisis, además, como geólogos siendo los autores, tenemos las bases conceptuales requeridas para afrontar esta investigación.

Este proyecto corresponde a la línea de investigación en la Gestión del Riesgo de Desastres, es de vital importancia en la actualidad, la cual fortalece el componente de conocimiento del riesgo permitiendo tomar medidas oportunas para la reducción del mismo, disminuyendo la ocurrencia de desastres. La sublínea de investigación pertenece a la instrumentación y monitoreo de amenazas y el área de investigación compete a las tecnologías aplicadas para el análisis de amenazas, vulnerabilidad y riesgo.

### 3. OBJETIVOS

#### 3. 1. Objetivo general

Analizar la implementación de la guía metodológica para la evaluación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25000 del SGC, en la vereda Kerman, municipio de Quimbaya, Quindío.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Identificar los factores condicionantes y detonantes propuestos en la guía metodológica para la vereda Kerman.
- Redefinir la amenaza obtenida en la Unidad de planificación rural de la vereda Kerman.
- Verificar la correcta implementación de la guía a partir de la curva de éxito.

## 4. MARCOS CONCEPTUALES

### 4.1. Referencial

Desde la década de 1970's se han realizado guías metodológicas para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa y la zonificación de amenazas (e.g. Brabb *et al.*, 1972; Nilsen *et al.*, 1979; Kienholz, 1978), a continuación, se explican algunas guías nacionales e internacionales usadas en la actualidad:

La Sociedad Australiana de Geomecánica (AGS), en 2007 publicó la guía titulada “*Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning*”, la cual, aborda la susceptibilidad a movimientos en masa, la amenaza y la zonificación de riesgos para la planificación territorial. La guía proporciona: definiciones y terminología, descripción de los tipos de zonificaciones de movimientos en masa, orientación sobre donde es necesaria la zonificación de movimientos en masa, instrucciones para realizar las zonificaciones de acuerdo a las necesidades del territorio, la cual es ampliamente usada en Australia y otros lugares alrededor del mundo.

The Joint International Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1), publicó en 2008, este trabajo es una guía internacional europea para la evaluación de amenazas por movimientos en masa. Proporciona directrices para determinar la susceptibilidad de movimientos en masa, amenaza y zonificaciones de riesgo para la planificación en las naciones europeas.

SAFELAND (2009-2012), desarrolló el trabajo “*Living with landslide risk in Europe; Assessment, effects of global change, and risk management strategies*”, este fue un gran proyecto de investigación que se formó bajo El Séptimo Programa Marco (PM) de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación de la Unión Europea. Fue coordinado por el Centro Internacional de Geoamenazas (ICG) de Oslo, Noruega. Los principales objetivos fueron:

- Proporcionar a los responsables políticos, administradores públicos, investigadores, científicos, educadores y otras partes interesadas un marco y una metodología mejorada y armonizada para la evaluación y cuantificación del riesgo de deslizamientos en las regiones de Europa.
- Evaluar los cambios en el patrón de riesgo causados por el cambio climático, la actividad humana y cambios políticos.
- Proporcionar pautas para elegir el riesgo más apropiado. estrategias de gestión, incluida la mitigación de riesgos y medidas de prevención.

Corominas *et al.* (2013), publicó un artículo científico titulado “*Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk*”, este documento recomienda una metodología para el análisis cuantitativo de amenazas de deslizamiento, vulnerabilidad y riesgo en diferentes escalas espaciales, tanto para la verificación y validación de resultados. La metodología se concentra en describir la evaluación de las probabilidades de ocurrencia de diferentes tipos de movimientos en masa con sus características específicas.

Yamín *et al.* (2013), realizó una modelación probabilística del riesgo de desastre que se pueden generar producto de amenazas naturales, presenta unas bases conceptuales y serie de aplicaciones con fines de gestión del riesgo en el marco de la planificación socioeconómica y el desarrollo sostenible, uno de los temas enfatizados es el riesgo por deslizamientos urbanos. Explica brevemente los factores necesarios para la generación de movimientos en masa y cómo debería realizarse el análisis de amenazas por deslizamientos.

Cardona (2013), presenta un instructivo titulado “*Evaluación de la amenaza frente deslizamientos en los diferentes niveles territoriales*”, el cual sugiere tres niveles de trabajo según la categoría del municipio y seis métodos para valorar la amenaza por deslizamiento según los requerimientos de información y la complejidad de los procesos de cálculo (tabla 1).

**Tabla 1.** Niveles y métodos para calcular la amenaza por deslizamiento

Nivel (Grupo)	Métodos	Requerimientos de información
1. Métodos de zonificación con niveles bajos de información	Observación directa	Bajos (visitas de campo)
	Zonificación heurística basada en criterio experto	Bajos
2. Métodos de zonificación con niveles medios de información	Métodos heurísticos basados en datos	Medios
	Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad	Medios
3. Métodos de zonificación con niveles altos de información	Análisis Discriminante	Altos
	Redes Neuronales Artificiales	

Fuente: Cardona, 2013

El Servicio Geológico Colombiano en colaboración con La Universidad Nacional de Colombia en el año 2015, desarrollaron “*La Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad, y Riesgo por Movimientos en Masa*”. En esta guía se describen los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local, que se podrán aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia.

Actualmente la guía más utilizada en el territorio colombiano, es la desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2017 “*Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*”, Esta guía presenta una propuesta metodológica para realizar análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, adaptando los requerimientos presentados por la normatividad del ordenamiento territorial y la gestión del riesgo.

## 4.2. Marco Normativo

- Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres: Ley 46/88 y Decreto Ley 919/89
- Directiva Presidencial No. 33/90: Define la prevención de Riesgos como concepto de Planificación. Constitución Política de Colombia (Art. 80)
- Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres –PNPAD- Decreto 93/98 (Art. 5, 31,105)
- Ley de Ordenamiento Territorial (planificación físico-espacial): Ley 388 de 1997
- Instrumentos de planificación ambiental (PGAR y PAT): Decreto 1200 de 2004
- Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial (LOOT): Ley 1454 de 2011
- Incorporación de la gestión del riesgo en la revisión de los planes de ordenamiento territorial: Ley Antitrámites, Decreto Ley 019 de 2012, artículo 189
- Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres: Ley 1523 - 24 de abril del 2012
- Reglamentación del artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012: Decreto 1807 de 2014
- Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio: Decreto 1077 de 2015

## 4.3. Marco Teórico-conceptual

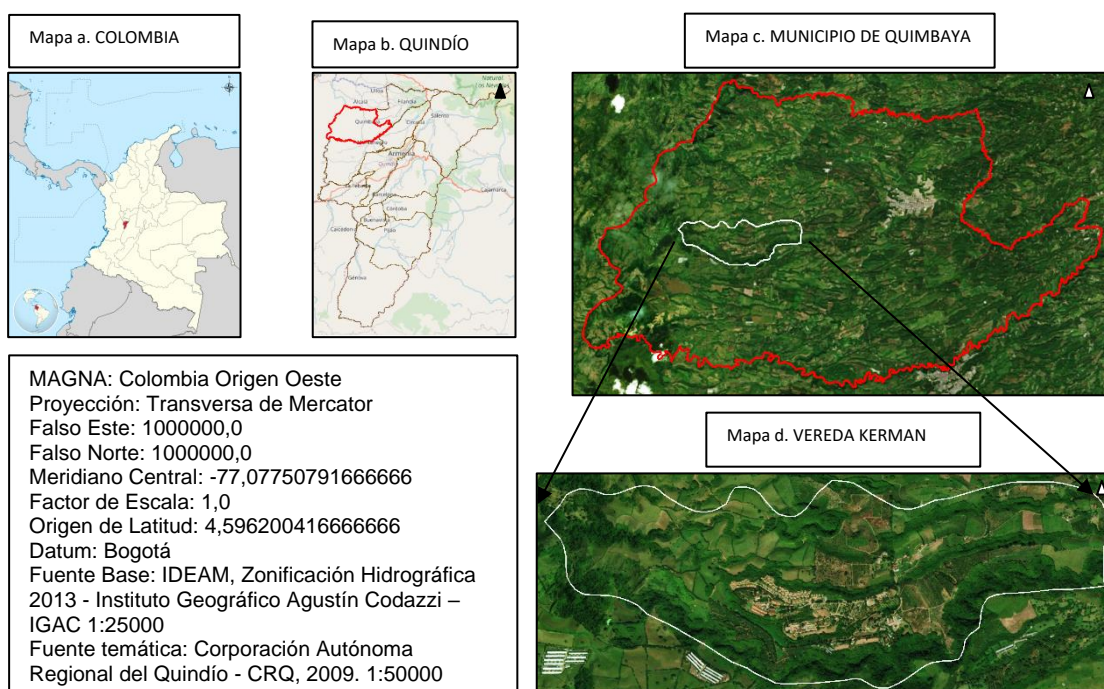
- **Amenaza:** evento físico o condición peligrosa de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, capaz de causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia (SGC, 2017).
- **Erosión:** adaptando la definición presentada en el estudio Indicadores de erosión en áreas áridas y semiáridas (FAO, 2014), la erosión es un proceso de pérdida continua y selectiva de materiales ocasionada por agentes naturales o antrópicos. Cuando la erosión se produce sin intervención antrópica, se denomina erosión geológica o natural, debido a la acción de agentes como el agua (hídrica), viento (eólica), deshielo (glaciar), entre otros, sobre los materiales de las capas superficiales roca o suelo; de lo contrario se considera erosión antrópica o acelerada, en la que el hombre altera los procesos naturales principalmente con prácticas como el laboreo en el sentido de la pendiente, cultivos, compactación del terreno, deforestación, quemas, minería, entre otras actividades (SGC, 2017).
- **Frecuencia:** representa el número de eventos o de procesos en un intervalo de tiempo dado. Puede ser evaluada a partir de datos empíricos (SGC, 2017).

- **Movimiento en masa:** equivale a definiciones como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa o fallas de taludes y laderas. La terminología y clasificación de movimientos en masa para este documento es conforme a la Guía para la Evaluación de Amenazas por Movimientos en Masa propuesta por el Proyecto Multinacional Andino (PMA), adoptada por Colombia (PMA: GCA, 2007), en la que movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (SGC, 2017).
- **Susceptibilidad a movimientos en masa:** medida cualitativa o cuantitativa de la magnitud y distribución espacial de movimientos en masa existentes o que potencialmente pueden ocurrir en un área. Su determinación se basa solamente en el análisis de factores intrínsecos o condicionantes y puede también incluir una descripción de la velocidad e intensidad de los movimientos en masa existentes o potenciales. Los mapas de susceptibilidad contienen información sobre el tipo de deslizamiento que puede ocurrir y sobre su posibilidad de ocurrencia espacial en términos de identificación de las áreas de iniciación más probables y la posibilidad de extensión (retrogresión o progresión — distancias de viaje) (SGC, 2017).
- **Zonificación:** la división del territorio en áreas o dominios homogéneos y su categoría de acuerdo al nivel de susceptibilidad, amenaza o riesgo actual o potencial (SGC, 2017).

## 5. UNIDAD GEOGRÁFICA

La vereda Kerman se localiza en al occidente del municipio de Quimbaya, (Figura 1) en la subzona hidrográfica del río La Vieja (2612), cuenta con un área de 502 Ha, allí se encuentra el Parque Temático Panaca siendo un atractivo turístico para la región.

**Figura 1.** Localización general del área de estudio

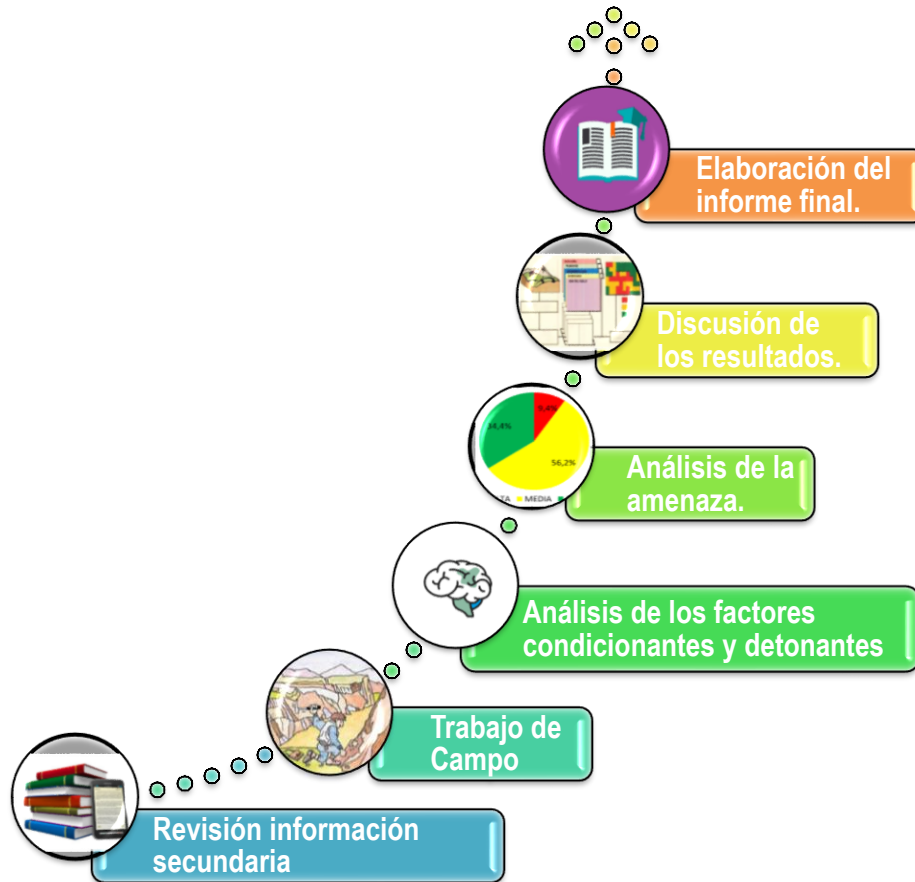


Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por IDEAM, CRQ e IGAC.

## 6. METODOLOGÍA GENERAL

La elaboración del trabajo en el área de influencia se realizó en las siguientes fases o etapas, (figura 2):

Figura 2. Pasos o momentos.



Fuente: Autores, 2019.

### 6.1 Revisión Información secundaria.

- Recopilación e interpretación del mapa geológico para ingeniería en la plancha 224-III-D a escala 1:25.000 que contienen información estratigráfica y estructural generada por el INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano SGC, para el área de estudio.



- Fotointerpretación. La información disponible fue complementada con la fotointerpretación de Imágenes Satelitales GeoEye 2017, modelos de Elevación Digital DEM, mapa de sombras y de pendientes generados para el área de estudio.
- Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS). Con base en el mapa de geología estructural, la reinterpretación de la información de la Cuenca del río La Vieja, la “Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000” (SGC, 2017), el estudio semi-detallado de suelos del departamento del Quindío (IGAC, 2013), la fotointerpretación y la primera aproximación de campo, se generó un mapa de UGS preliminar para el área de estudio.
- Mapa geomorfológico. Se elaboró el mapa de subunidades geomorfológicas para fines de amenaza de remoción en masa, el cual proporciona información básica fundamental sobre las unidades de relieve o geoformas con características y comportamiento homogéneo, con énfasis en la evolución de los procesos morfodinámicos, de acuerdo con la metodología de Carvajal 2012. Al igual que para la cartografía geológica, en la cartografía geomorfológica se recopiló y analizó la información del SGC, se complementó con la fotointerpretación y el trabajo de campo, en el que se verificó la información geomorfológica de las fuentes secundarias.
- Mapa de cobertura y uso del suelo. Se realizó una aproximación por medio de fotointerpretación a las diferentes coberturas y usos en la vereda Kerman obteniendo el mapa de cobertura vegetal, insumo importante como factor condicionante para la aplicación de la guía.

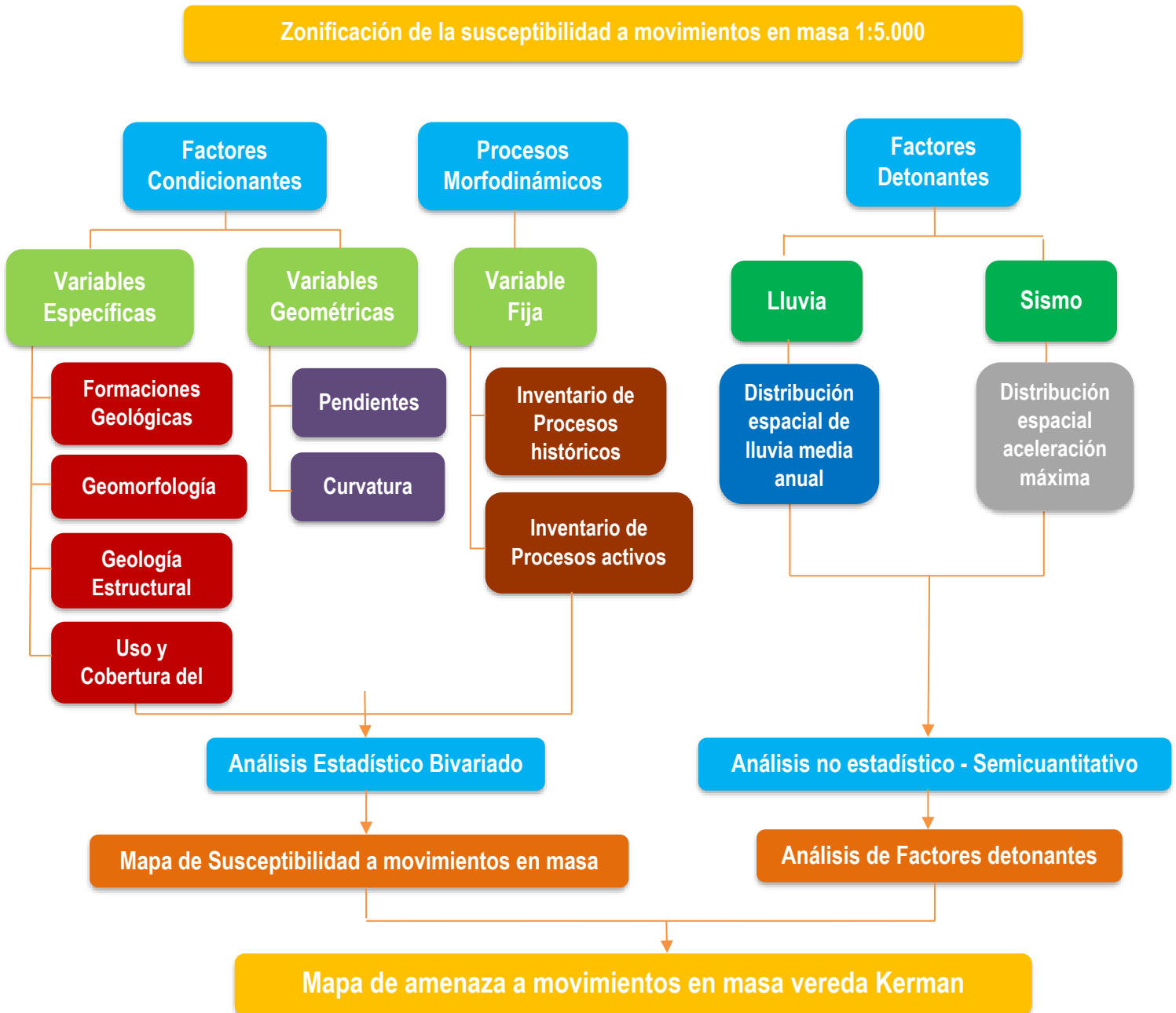
## 6.2. Trabajo de campo

- Se realizó la primera aproximación de campo, dirigida a consolidar la cartografía geológica básica a escala 1:5.000 en el área de influencia, en la que se encontraron y definieron diferentes tipos de materiales residuales.

## 6.3 Procesamiento de la información obtenida

- Teniendo en cuenta los anteriores insumos se realizó la aplicación de la guía metodológica para el procesamiento de la información en el software ArcGIS 10.5 descrito en la figura 3.

**Figura 3.** Metodología para el cálculo de la amenaza por movimientos en masa 1:5.000



Fuente: Autores, 2019.

## 7. ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES

### 7.1. FACTORES CONDICIONANTES

#### 7.1.1. Geología

##### 7.1.1.1. Geología Regional

La evolución geológica regional del Departamento del Quindío se enmarca dentro de la historia geológica de la Cordillera Central. Sobre el basamento precámbrico de la cordillera se depositó una secuencia volcanosedimentaria durante el Paleozoico Temprano (Complejo Cajamarca), que posteriormente fue sometida a condiciones de metamorfismo de alta temperatura y baja presión, que en los procesos orogénicos posteriores permitieron el emplazamiento de intrusivos néisicos. Posteriormente y durante el Cretácico Temprano se depositaron las sedimentitas intercaladas con vulcanitas del Complejo Quebradagrande, posiblemente en un ambiente oceánico.

La secuencia metamórfica del Complejo Arquía corresponde posiblemente al emplazamiento tectónico por obducción de remanentes de una placa oceánica, que durante la adhesión a la cordillera fueron fragmentadas, metamorizadas y se mezclaron estructuralmente con la secuencia del Complejo Quebradagrande.

Durante el Cretácico Tardío-Paleógeno se produjo el emplazamiento de los complejos ígneos de Córdoba y del Río Navarco, así como el fallamiento de rumbo del sistema de fallas Cauca-Romeral. En el Oligoceno-Mioceno se depositaron entre las cordilleras Central y Occidental los sedimentos continentales de las formaciones Cinta de Piedra y La Pobreza. Al final del Neógeno se presentó la intrusión de los cuerpos hipoabisales porfídicos de composición andesítica a dacítica.

Durante el Plioceno–Pleistoceno se produjeron eventos sedimentario-volcánicos que dieron origen al espeso depósito del Abanico del Quindío, producto de la actividad eruptiva de los volcanes, Nevado del Quindío, Nevado Santa Isabel y Nevado del Ruiz localizados en la cima de la Cordillera Central. Las erupciones volcánicas provocaron el deshielo y la formación de flujos de lodo que descendieron por el flanco occidental de la cordillera hacia el valle del Río La Vieja. Adicionalmente, la acción de los glaciares, las avenidas torrenciales y los depósitos piroclásticos de caída y de flujo contribuyeron de igual manera a la construcción de este depósito, (Formación Armenia).

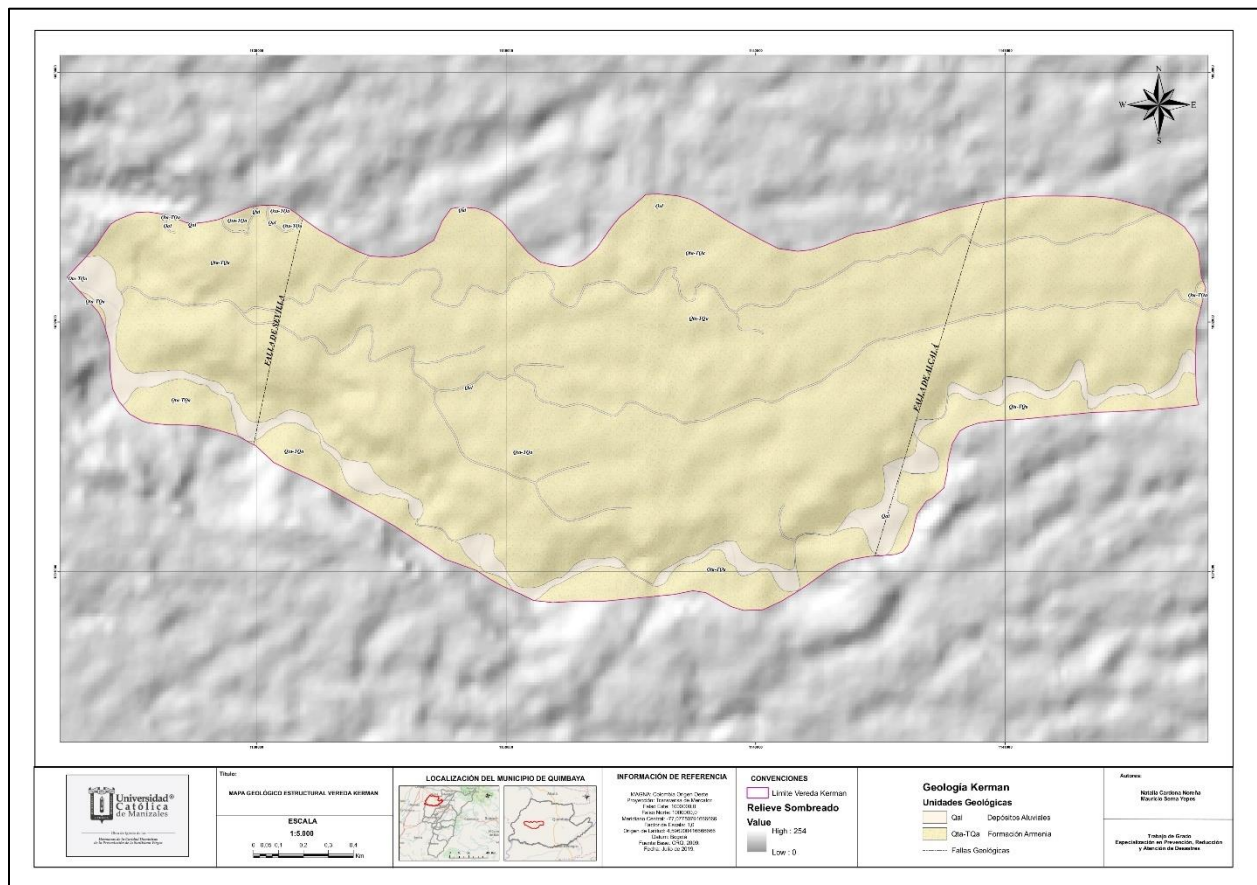
Después de la última glaciación, ocurrió una reactivación volcánica que dio origen a gran parte de los materiales piroclásticos que actualmente cubren las formaciones rocosas más antiguas. Las variaciones climáticas y la actividad tectónica contribuyeron a la formación de los depósitos aluviales y coluviales. La disección fue acelerada por el levantamiento regional de la cordillera durante el Cuaternario, dando al área la configuración geomorfológica actual. (Tomado del Estudio Semidetallado de Suelos del Departamento del Quindío- IGAC- C.R.Q 2013).

### 7.1.1.2. Geología Local

El área de estudio se caracteriza por presentar materiales volcánicos y volcano-sedimentarios del cenozoico tardío (Formación Armenia) y cuaternario, conformada en su mayor extensión por áreas planas debido a los depósitos aluviales y coluviales recientes que configuran un abanico disectado de gran proporción, así como las capas de piroclastos de espesor variable que recubren parcialmente el área, los cuales son productos de la actividad volcánica del complejo Ruiz-Tolima.

Para la descripción de las unidades geológicas presentes en el área, se toman descripciones de las memorias de la cartografía realizada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), 2005, (Figura 4 y Tabla 2) complementados con las observaciones realizadas en campo.

**Figura 4: Mapa Geológico Estructural.**



Fuente: Elaboración propia con base en el Mapa Geológico para Ingeniería, Plancha 224-III-D Escala 1:25.000, INGEOMINAS 2005.

**Tabla 2.** Leyenda Geológica.

EDAD		DEPÓSITOS Y ROCAS ESTRATIFICADAS		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Qal	Depósitos Aluviales	Aluviones recientes de ríos y terrazas
		Qto-TQa	Formación Armenia	Depósitos de cenizas volcánicas, flujos de lodo y depósitos de piedemonte

Fuente: Elaboración propia con base en el Mapa Geológico para Ingeniería, Plancha 224-III-D Escala 1:25.000, INGEOMINAS 2005.

#### 7.1.1.2.1. Formación Armenia (Qta-TQa)

Es la unidad geológica de mayor presencia en el área de estudio, presente en el centro y norte de la Cuenca del Río la Vieja. Son depósitos no deformados de materiales de caídas de cenizas volcánicas semi-consolidadas y flujos de lodos volcano-genéticos (Figura 5) (McCourt *et al.*, 1984).

Se le asigna una edad plio-pleistocena y está representando el producto del ciclo magmático mio-plioceno del complejo volcánico Ruiz-Tolima (McCourt, 1984; Nivia, 2001). El espesor de esta unidad es variable y puede alcanzar en sus sectores más profundos espesores de más de 200 m.

**Figura 5.** Afloramiento Formación Armenia. E: 1139527, N: 1001661:



Fuente: Autores, 2019.

### 7.1.1.2. Depósitos Aluviales Recientes (Qal)

Corresponden a los depósitos de origen aluvial (Terrazas, Llanuras de inundación y aluviones recientes) los cuales se encuentran en los valles de los ríos principales que atraviesan o circundan el área, de espesores variables que se depositan a los lados de las fuentes hídricas. Están compuestos por fragmentos de diversos tipos de roca mal seleccionados y arenas, limos y arcillas generalmente sin estratificación. (Mc. Court et al. 1984).

### 7.1.1.3. Geología Estructural

**7.1.3.1. Falla de Alcalá:** James (1986) lo define como un lineamiento originado posiblemente por un pliegue localizado al occidente de la población de Alcalá y es paralelo al río La Vieja, con rumbo N5°E y longitud de 30 km. (Cardona y Ortiz, 1994), le asignan una longitud total de 65 km con el bloque Este levantado, dividiéndola en tres segmentos así: uno de longitud 38 km y rumbo N18°E, el segundo con 13 km de longitud y rumbo N11°E y el último con longitud de 27 km y rumbo N5°W.

El movimiento de la falla Alcalá no explica la existencia de las colinas y el terreno levantado al occidente de esta estructura. Se propone como hipótesis que en la región existía un paleorelieve con colinas hacia el occidente, las cuales fueron cubiertas por las cenizas volcánicas de caída y a pesar del movimiento descendente hacia el oeste siguen resaltando en la topografía de la región.

**7.1.3.2. Falla de Sevilla:** Cartografiada por McCourt et al. (1984), es definida por Cardona y Ortiz (1994) como una estructura que presenta escarpes y controla parte del río La Vieja. La dividen en dos segmentos, uno de 32 km de longitud y dirección N15°E y el otro de 9 km de longitud y dirección NS. (Lalinde, 2004).

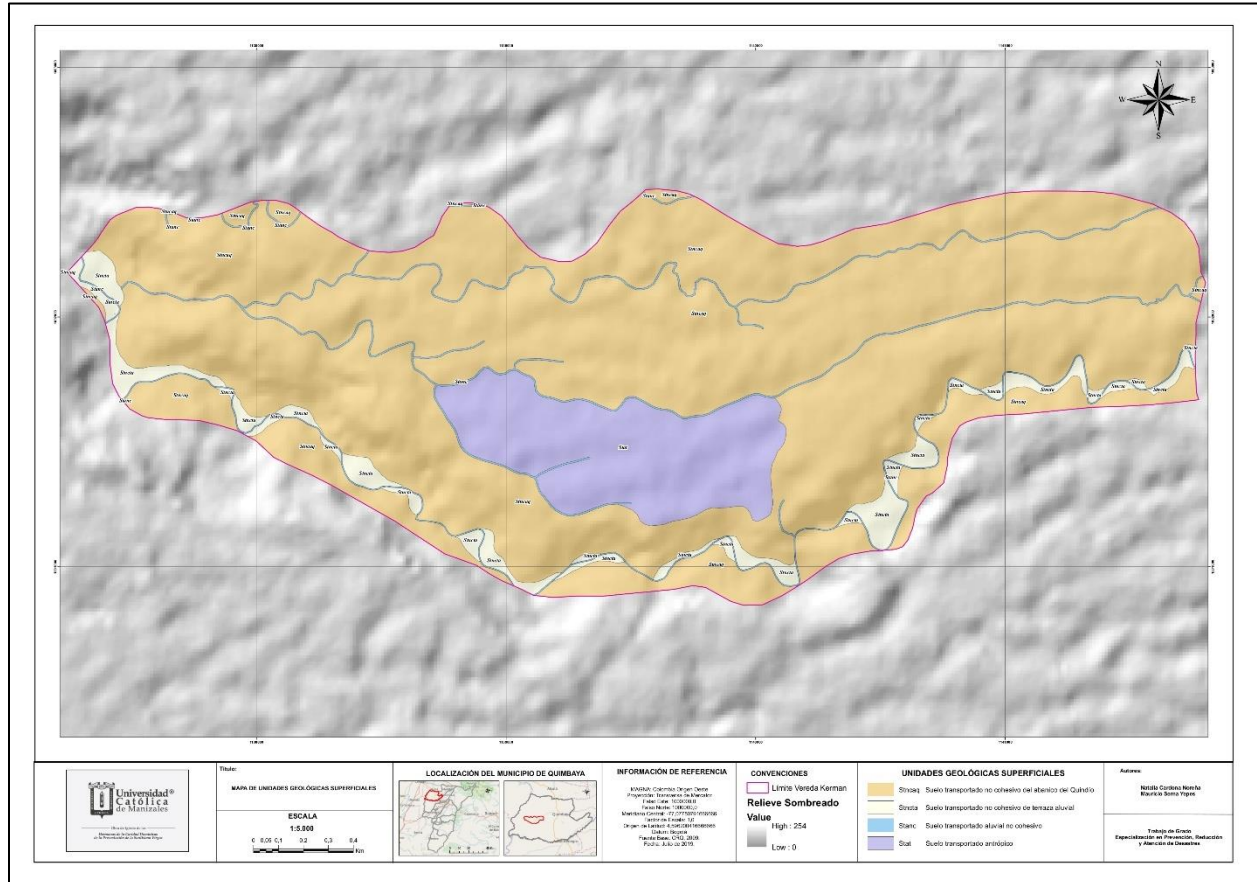
### 7.1.2. Unidades Geológicas Superficiales

La metodología por la cual se ha elaborado el mapa de unidades geológicas superficiales y el mapa de subunidades geomorfológicas del área de estudio a escala 1:5.000 ha sido propuesta por el Servicio Geológico Colombiano en el documento "Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000" (SGC, 2017) y también bajo las pautas descritas en "Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia" (Carvajal, 2011). En primer lugar, se llevó a cabo la recopilación de información secundaria que incluye estudios previos como Caracterización de la cuenca del río La Vieja (Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río La Vieja, 2018), el Estudio semi-detallado de suelos del departamento del Quindío (IGAC, 2013).

Por otra parte, también se descargó el modelo digital de elevación de 12.5 m del satélite Alos Pasar con el cual se generó el modelo de sombras, pendientes y la base cartográfica 1:25.000, La definición de los nombres de las Unidades Geológicas Superficiales, las subunidades geomorfológicas y su posterior descripción se hizo bajo los lineamientos de la "Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000" (SGC, 2017) teniendo en cuenta la información secundaria y la información primaria recopilada en campo.

A continuación, se describen las unidades geológicas superficiales que afloran en el área de estudio, (Figura 6).

**Figura 6:** Mapa de Unidades Geológicas Superficiales



Fuente: Autores, 2019.

**Tabla 3.** Leyenda Unidades Geológicas Superficiales UGS.

Descripción	Acrónimo	Área (ha)	%
Suelo transportado no cohesivo del abanico del Quindío	Stncaq	412	82
Suelo transportado no cohesivo de terraza aluvial	Stncta	26	5
Suelo transportado aluvial no cohesivo	Stanc	11	2
Suelo transportado antrópico	Stat	53	11
<b>Total</b>		<b>502</b>	<b>100</b>

Fuente: Autores, 2019.

### 7.1.2.1. Suelo transportado no cohesivo del abanico del Quindío (Stncaq)

Depósito volcanoclástico secundario de flujo de lodo y escombros que consta de numerosas intercalaciones lenticulares donde alternan depósitos piroclásticos, lahares, acumulaciones fluviales y glaciares, resultantes de la interacción de los glaciares y la actividad volcánica del sistema volcánico Ruiz-Tolima en la Cordillera Central (IGAC, 2013). Estos lodos de origen fluvio-glaciar están compuestos por rocas piroclásticas, lapilli y fragmentos de rocas volcánicas (INGEOMINAS, 1984). En la figura 7 se observan las intercalaciones de flujos de lodo y escombros cercanos a la Quebrada Buenavista.

**Figura 7.** Intercalaciones de flujos de lodo y escombros, Afluente Quebrada Buenavista E: 1140125, N: 1001130:



Fuente: Autores, 2019.

Algunos de estos materiales se encuentran fuertemente meteorizados y afectados por las dinámicas fluviales de ríos y quebradas que generan incisiones, meteorización y generación de materiales arcillosos en pendientes moderadas a fuertes.

### 7.1.2.2. Suelo transportado no cohesivo de terraza aluvial (Stncta)

Suelo transportado aluvial que representa los depósitos subrecientes de la Quebrada Buenavista depositados a manera de terrazas de acumulación a lado y lado del trayecto de este cauce activo en la Vereda Kerman.



Contienen materiales generalmente de gravas finas a gruesas ocasionalmente bloques rocosos subangulares; son depósitos matriz soportados o clasto soportados, la matriz de arena, arena gravosa y limos arenosos. (Figura 8)

**Figura 8.** Depósitos Aluviales E: 1140130, N: 1001121:



Fuente: Autores, 2019.

#### **7.1.2.3. Suelo transportado aluvial no cohesivo (Stanc)**

Corresponden a la unidad de materiales aluviales recientes y de cauces actuales incluyendo sistemas de orillares y barras, contiene materiales clastosoportados con gravas y arenas.

#### **7.1.2.4. Depósito antropogénico (Stat)**

Para este estudio se considera como suelo urbano (Figura 9), las áreas correspondientes a suelos de centros poblados constituidos dentro del área de estudio.

**Figura 9.** Suelo antrópico urbano E: 1140086, N: 1001603:



Fuente: Autores, 2019.

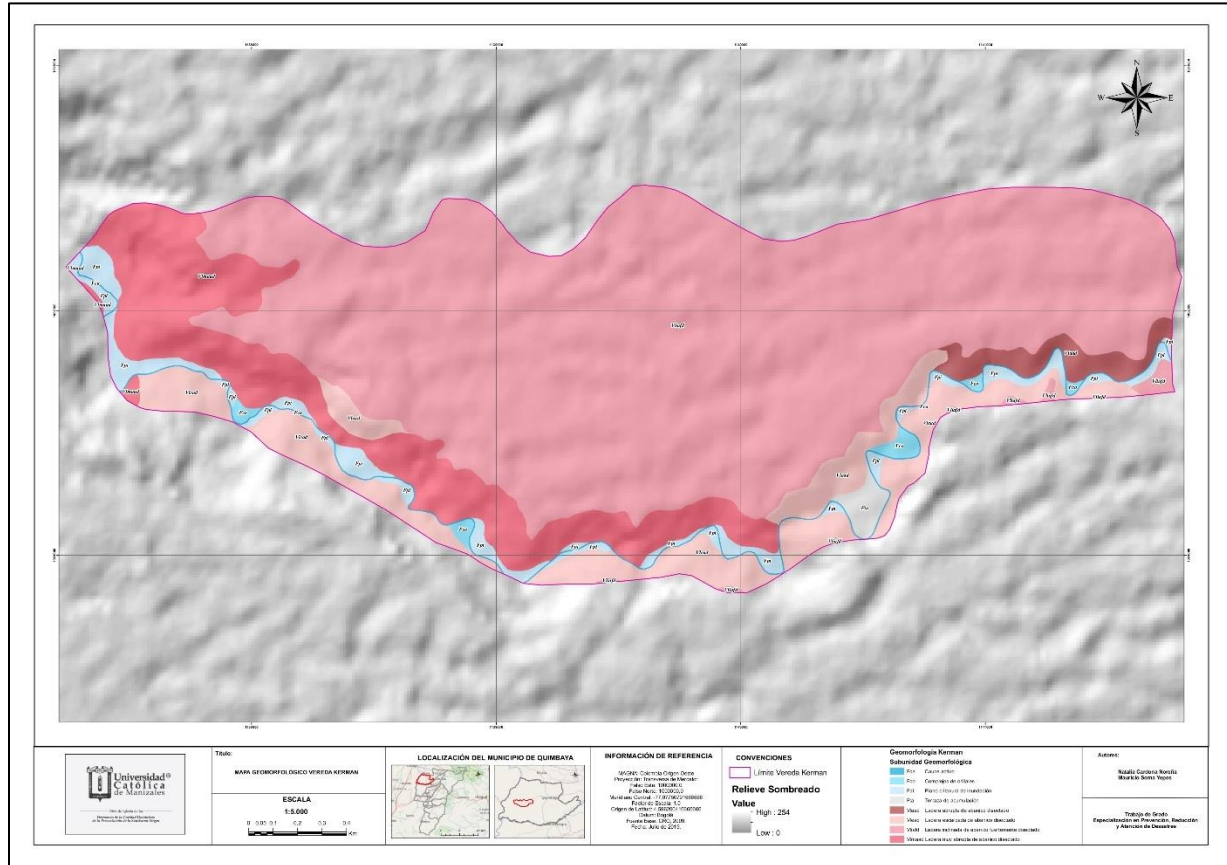
### **7.1.3. Geomorfología**

El área de influencia lo conforman materiales volcánicos y volcano-sedimentarios del cenozoico tardío y cuaternario, productos de la actividad volcánica del complejo Ruiz-Tolima; depósitos aluviales y coluviales recientes, en ambientes deposicionales y fluviales, con geformas planas a semiplanas, colinadas, de bajas alturas, pendientes y sectores con materiales muy disectados. A continuación, se describen las subunidades geomorfológicas (geformas a escala 1:5.000)

#### **7.1.3.1. Subunidades Geomorfológicas**

Se describen las subunidades geomorfológicas interpretadas a partir del modelo digital de elevación de 12,5 m, la cartografía 1:25.000 e imágenes satélites de Google Earth con 50 m de resolución y cuyo mapa resultante se puede ver en la Figura 10.

**Figura 10.** Mapa de Subunidades Geomorfológicas



Fuente: Autores, 2019.

**Tabla 4.** Leyenda de geomorfología del área de influencia

FORMA DE TERRENO	SÍMBOLO	ÁREA (ha)	%
Cauce activo	Fca	3,36	0,67
Complejos de orillales	Fco	3,31	0,66
Plano o llanura de inundación	Fpi	19,42	3,87
Terraza de acumulación	Fta	3,06	0,61
Ladera abrupta de abanico disectado	Vlaad	9,25	1,84
Ladera escarpada de abanico disectado	Vlead	55,35	11,03
Ladera inclinada de abanico fuertemente disectado	Vliafd	337,99	67,33
Ladera muy abrupta de abanico disectado	Vlmaad	70,27	14
<b>TOTAL</b>		<b>502</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.1.1. Cauce activo (Fca)

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de los sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles estrechos en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas o diaclasas. Cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), los cauces son de tipo meándrico o divagante, como producto del cambio súbito de la dirección del flujo, (SGC, 2014). Los cauces activos de la vereda Kerman corresponden a la quebrada Buena Vista, figura 11.

**Figura 11.** Quebrada Buenavista E: 1140174, N: 1001102:



Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.1.2. Complejo de orillales (Fco)

Geoforma de origen fluvial asociado a la dinámica de divagación y sedimentación lateral de un río y compuesta por una sucesión semicircular de canales secundarios de divagación separados por pequeños niveles de albardones con sedimentos gruesos y pequeñas depresiones con depósitos finos, resultantes de las etapas sucesivas de migración lateral de los meandros (SGC, 2014).

Estas barras se originan debido al desplazamiento de la línea del flujo máximo hacia la parte cóncava de un meandro y una disminución de flujo en la parte convexa acompañada por una sedimentación. Las barras constan de material relativamente grueso y tendrán por consecuencia un drenaje bastante bueno (SGC, 2014). Par el caso de la vereda Kerman estos complejos de orillales están constituidos de material fluvial y fluvio-volcánico resultante de la disección de los depósitos de flujos de lodo y escombros que constituyen

de forma general al abanico del Quindío. En este sentido es posible identificar esta subunidad a lo largo de la quebrada Buena Vista.

#### **7.1.3.1.3. Plano o llanura de inundación (Fpi)**

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los planos fluviales menores en formas de “U” o “V”, al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. (SGC, 2014). Las planicies o llanuras de inundación se dan lugar a lo largo de los tributarios del río La Vieja y en el recorrido del mismo de forma intermitente ya que la dinámica de los mismos da lugar a la erosión, depositación, acumulación e invasión por parte de los cuerpos de agua (quebrada Buena Vista).

#### **7.1.3.1.4. Terraza de acumulación (Fta)**

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales y limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su depósito está constituido por gravas arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río (SGC, 2014). Las terrazas de acumulación se dan lugar tanto en el río La Vieja como en la quebrada Buenavista ya que la magnitud de sus caudales permite mayor transporte y acumulación de sedimentos que los demás afluentes.

#### **7.1.3.1.5. Ladera abrupta de abanico (Vlaad)**

Ladera con pendientes entre 16-20 grados de forma recta, cóncava o convexa desarrollada en la zona de “escarpe” del abanico del Quindío como resultado de la incisión de la red de drenaje sobre los depósitos fluvio-volcánicos que lo constituyen generando laderas con diferentes grados de pendiente. Esta subunidad limita la superficie ondulada del abanico (laderas inclinadas de abanico fuertemente disectado) tanto en su parte media como distal en la vereda Kerman, Figura 12.

**Figura 12.** Zona de escarpe del abanico en la vereda Kerman.



Fuente: (Google Maps, 2018)

#### 7.1.3.1.6. Ladera escarpada de abanico disectado (Vlead)

Ladera con pendientes entre 31–45 grados, corresponden a las laderas que conectan los planos del abanico con su base o límite inferior donde se presenta un cambio de pendiente que concuerda con otra forma de terreno, (Figura 13).

**Figura 13.** Ladera escarpada de abanico E: 1138592, N: 1001433:



Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.1.7. Ladera inclinada de abanico fuertemente disectado (Vliafd)

Superficie ondulada del abanico fluvio-volcánico del Quindío con pendientes entre 6-10 grados donde se presenta una alta densidad de drenajes con patrones subparalelos a subdendríticos. El adjetivo de fuertemente disectado se atribuye a la densidad de drenajes lo cual genera ondulaciones prominentes sobre el suelo transportado no cohesivo del abanico del Quindío.

Esa textura del terreno se desarrolla posteriormente a la depositación de los flujos de lodo y escombros como parte de la alta dinámica aluvial en zonas de piedemonte. Esta subunidad geomorfológica es la más representativa de la vereda Kerman Figura 14

**Figura 14.** Relieve ligeramente inclinado E: 1140089, N: 1001914:



Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.1.8. Ladera muy abrupta de abanico disectado (Vlmaad)

Ladera con pendientes entre 21– 30 grados, esta subunidad limita la superficie ondulada del abanico tanto en su parte media como distal, desarrollada especialmente sobre las márgenes de la quebrada Buenavista.

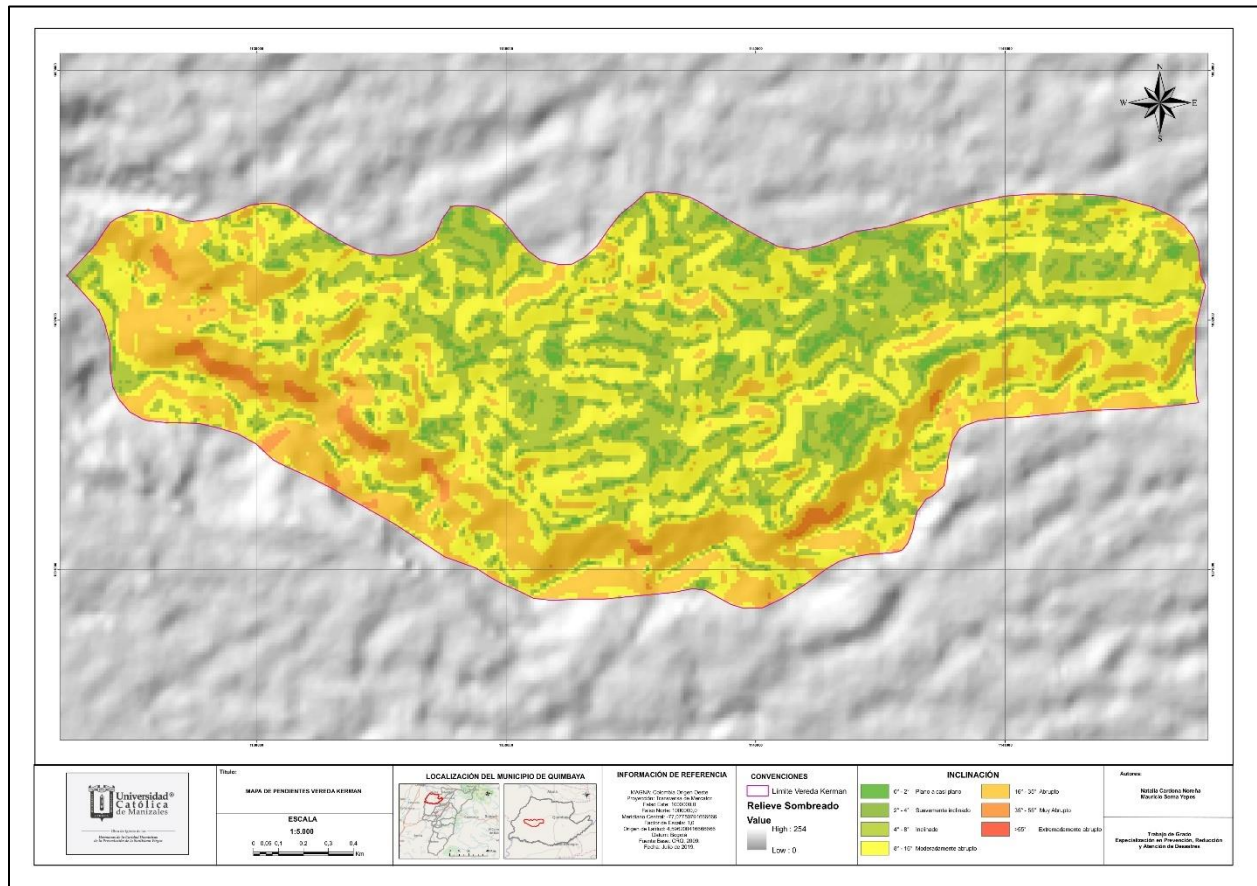
#### 7.1.3.2. Pendientes del Terreno

Representa la influencia de la inclinación de la ladera. En términos de movimientos en masa y para una zona con el mismo material, hay mayor susceptibilidad a mayor pendiente del terreno.

El mapa de la figura 15 muestra la distribución de pendientes del área de influencia, el cual corresponde a la unidad geomorfológica del abanico fluvo volcánico, sus pendientes son por lo general suaves a moderadas, inferiores al 30%, no obstante, se observan sectores de mayor pendiente, correspondientes a los taludes del valle labrados por la quebrada Buenavista.

La distribución de pendientes de la tabla 5 y el mapa de la figura 15 ilustran esta situación:

**Figura 15. Mapa de Pendientes**



Fuente: Autores, 2019.



**Tabla 5.** Clasificación de las pendientes en la zona de estudio.

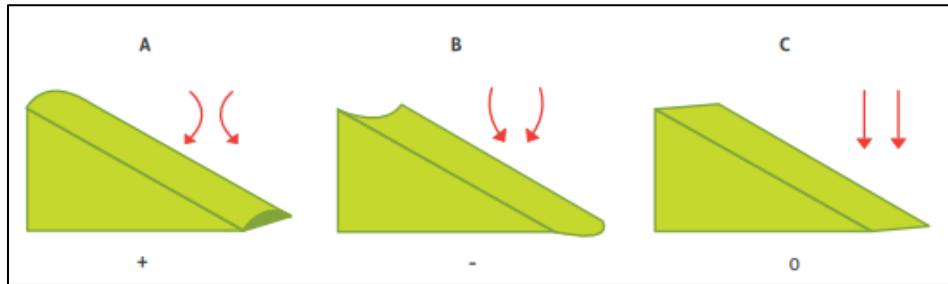
<b>PROCESOS CARACTERÍSTICOS Y CONDICIONES DEL TERRENO</b>	<b>Inclinación (°)</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Plano a casi plano.</b> No hay denudación apreciable.	0 – 2	41,76	8,32
<b>Suavemente inclinado.</b> Movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos de diferentes tipos, especialmente bajo condiciones periglaciares (solifluxión) y fluviales (erosión laminar y en surcos). Susceptible a desarrollar procesos erosivos	2 – 4	103,66	20,65
<b>Inclinado.</b> Condiciones similares a las anteriores. Alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos.	4 – 8	53,35	10,63
<b>Moderadamente abrupto.</b> Movimientos en masa de todos los tipos, especialmente solifluxión periglaciara, reptación y ocasionalmente deslizamientos, también erosión de tipo laminar y en surcos. Susceptible a erosión y deslizamientos.	8 – 16	7,90	1,57
<b>Abrupto.</b> Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos (erosión bajo cubierta forestal, reptación, deslizamientos). Alta propensión al desarrollo de procesos erosivos.	16 – 35	125,67	25,04
<b>Muy abrupto.</b> Afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, depósitos granulares caóticos de poco espesor.	35 – 55	169,62	33,79
<b>Extremadamente abrupto.</b> Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes, especialmente “denudación de escarpe”; susceptible a rodamiento de rocas.	> 55	0	0
<b>Total</b>		<b>502</b>	<b>100%</b>

Fuente: tomado de van Zuidam (1986), SGC 2017.

### 7.1.3.3. Curvatura

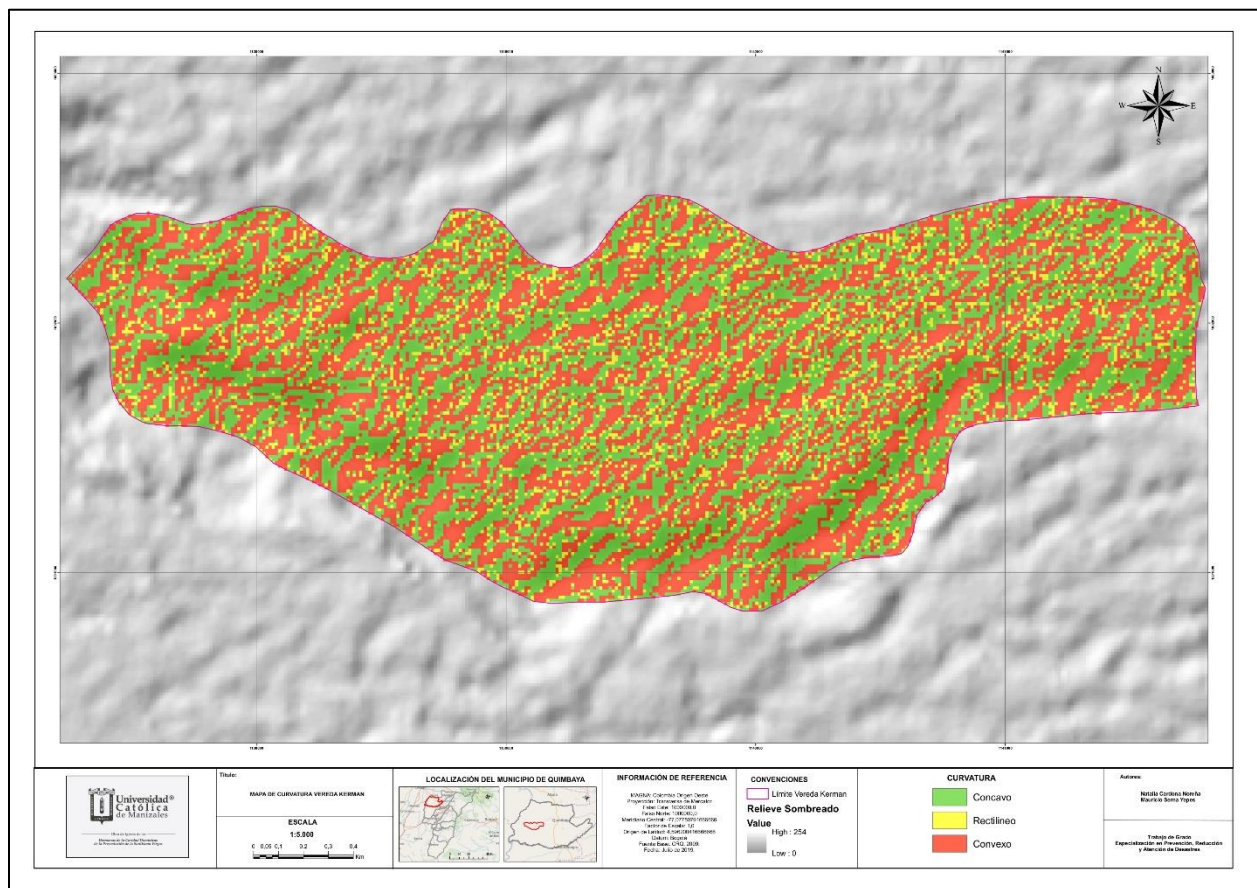
La curvatura indica la forma de las laderas, (Figura 16). Puede observarse como una variable continua cuantitativa continua que se deriva del modelo de elevación digital del terreno (DEM), (Figura 17), permite determinar el grado de concavidad/convexidad mediante el radio de curvatura de una celda según un plano vertical. Un valor positivo indica que la superficie es lateralmente convexa hacia la celda. Un valor negativo indica que la superficie es lateralmente cóncava hacia la celda. Un valor alrededor de cero indica que la superficie es lineal. (SGC, 2017). El Servicio Geológico Colombiano propone el uso de la curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente denominada curvatura de plano.

**Figura 16.** Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente



Fuente: SGC (2017).

**Figura 17.** Mapa de Curvatura



Fuente: Autores, 2019.

**Tabla 6.** Clasificación del tipo de curvatura en el terreno.

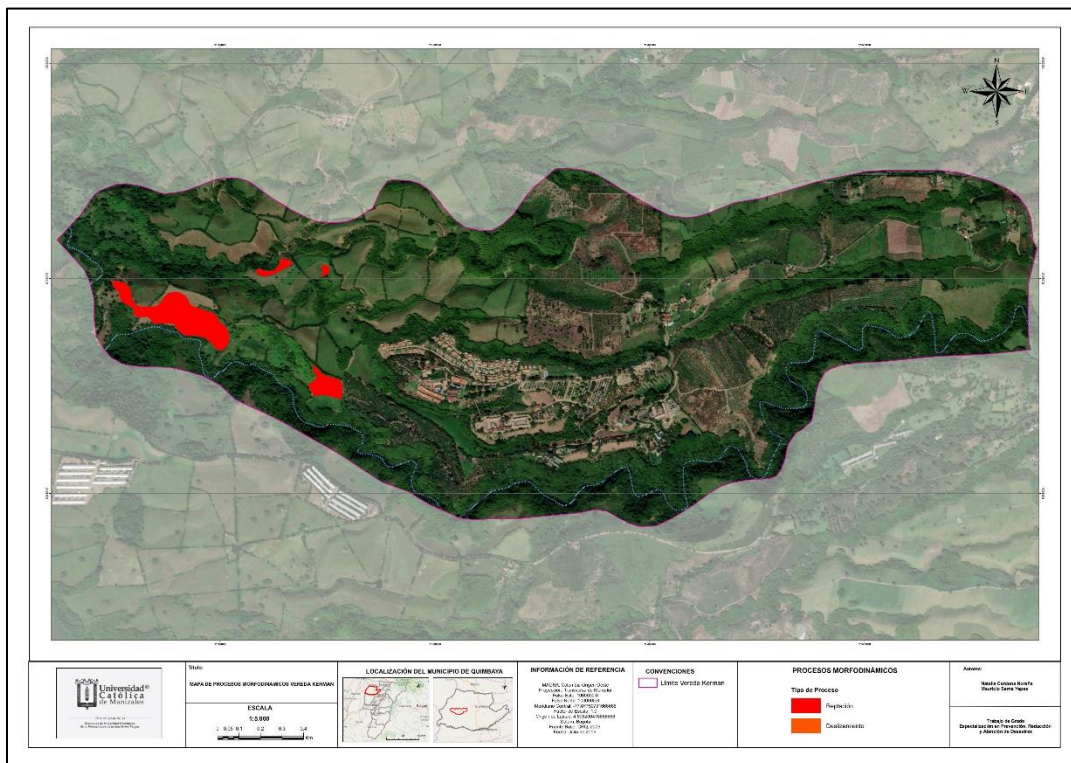
TIPO DE CURVATURA	SÍMBOLO	Área (Ha)	Porcentaje
Cóncavo		206,27	41,09
Rectilíneo		58,96	11,75
Convexo		236,72	47,16
<b>TOTAL</b>		<b>502</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.4. Inventario de procesos Morfodinámicos

El inventario de procesos morfodinámicos en la vereda Kerman se hizo con base a la fotointerpretación de las imágenes satelitales de Google Earth con 50 m de resolución, de los cuales se obtuvo un total de 4 movimientos cartografiados como polígonos, la clasificación del tipo de movimiento en masa se hizo con base en la clasificación de GEMMA: PMA - GCA (2007) obteniendo 4 reptaciones y 1 deslizamientos Figura 18.

**Figura 18.** Mapa de procesos morfodinámicos



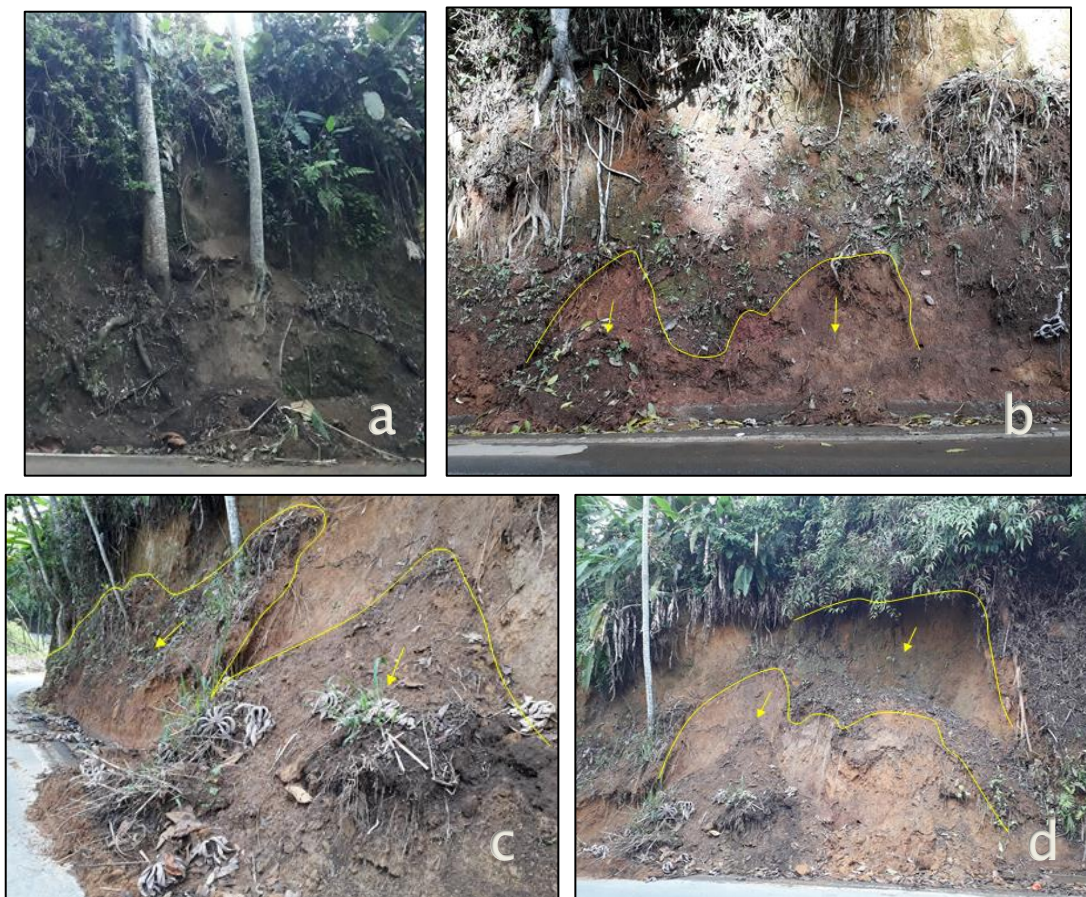
Fuente: Autores, 2019.

En este sentido, el proceso morfodinámico predominante en la vereda Kerman es la reptación, cuya ocurrencia está directamente relacionada, entre otros factores, a la cobertura y uso del suelo (pastizales para ganadería).

Entre los factores que contribuyen al desarrollo de procesos morfodinámicos está el tipo de material, la geoforma en la que se da lugar el movimiento o erosión y el grado de pendiente de las laderas.

En las visitas de campo, sólo se presentan dos tipos de eventos, el primero es un deslizamiento en la vía, donde se registraron varios puntos de incidencia, fotografías tomadas en diferentes días (Figura 19 b, c), se observa el material no consolidado con vegetación y raíces expuestas, generando un riesgo en la vía en temporada de lluvias y el segundo es una socavación de la quebrada La Silenciosa presentando un cambio en el cauce natural (Figura 20).

**Figura 19.** Deslizamientos en la vía hacia Panaca. E: 1140792, N: 1002300:



Fuente: Autores, 2019.

**Figura 20.** Socavación en la Quebrada La Silenciosa E: 1139422, N: 1001621:



Fuente: Autores, 2019.

#### 7.1.3.4.1. Fenómenos existentes en el territorio a partir de los eventos Históricos

Según información suministrada por el coordinador de gestión del riesgo del municipio de Quimbaya, en la Vereda Kerman no se han reportado eventos hasta la fecha, ni en la plataforma SIMMA (Sistema de Información de Movimientos en Masa) del Servicio Geológico Colombiano, que pongan en riesgo a la población; de igual manera, se entrevistó a la comunidad (8 en total) en el tema de Gestión del riesgo (Tabla 7 y Figura 21).

**Tabla 7.** Tabulación de Datos de la ficha de caracterización aplicada en 8 predios:

GESTIÓN DEL RIESGO					
1	¿Cuáles de los siguientes eventos ha presenciado en los últimos 5 años en el sector?				
	Fenómenos amenazantes	1-3 veces x semana	1-2 veces al año	ocasionalmente	nunca
	Deslizamientos o derrumbes	-	-	4	4
	Inundaciones o desbordamientos de ríos o quebradas	-	-	-	8
	Lluvias torrenciales o vendavales	2	3	2	1
	Amenaza volcánica / caída de ceniza	-	-	-	8
	Sismos o temblores	-	2	6	-
	Incendio en cobertura vegetal	-	-	-	8
2	¿Se ha visto afectado por los eventos anteriormente mencionados?		si	no	
			4	4	
3	Si la respuesta es afirmativa, ¿podría nombrar por cuál ha sido afectado?		Lluvias torrenciales o vendavales		

Fuente: Autores, 2019.

**Figura 21.** Gráfico explicativo



Fuente: Autores, 2019.

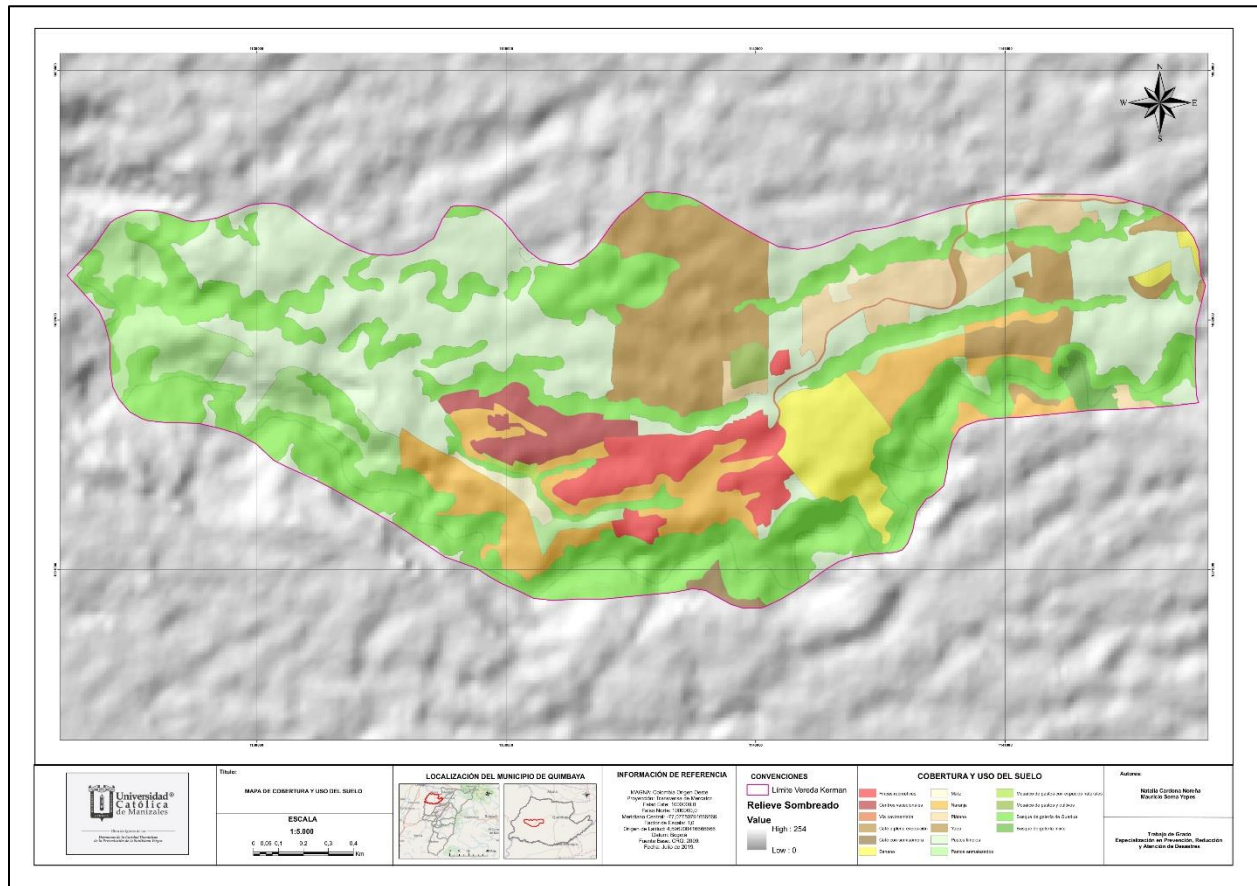
Se evidencia que las lluvias torrenciales más conocidas como vendavales es el fenómeno meteorológico que más se frecuenta, donde los deslizamientos y los sismos son más ocasionales o casi nulos en la zona.

#### 7.1.4. Cobertura de la tierra y uso del suelo

Otro de los factores condicionantes importantes en la ocurrencia de movimientos en masa es el cambio en la cobertura de la tierra, en general son considerados factores estáticos dentro de los análisis de amenaza y pueden ser incluidos como capas de información independientes que representan las condiciones actuales de vegetación o la dinámica antrópica dentro del territorio (van Westen et al., 2008).

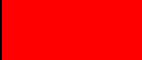





Con base en la información disponible en el SIG Quindío y con interpretación fotogeológica la cobertura y el uso del suelo se distribuye de acuerdo a la Figura 22.

**Figura 22.** Mapa del uso del suelo en la vereda Kerman



Fuente: Modificado a partir del SIG Quindío

**Tabla 8.** Clasificación del tipo de cobertura de la tierra y uso del suelo

FORMA DE TERRENO	SÍMBOLO	ÁREA (ha)	%
Fincas recreativas		19	3,78
Centros vacacionales		171	34,00
Vía pavimentada		3	0,60
Café a plena exposición		42	8,35
Café con semisombra		2	0,40
Banano		11	2,19

Maíz		20	3,98
Naranja		3	0,60
Plátano		1	0,20
Yuca		2	0,40
Pastos limpios		41	8,15
Pastos enmalezados		28	5,57
Mosaico de pastos con espacios naturales		130	25,84
Mosaico de pastos y cultivos		19	3,78
Bosque de galería de Guadua		1	0,20
Bosque de galería mixto		10	1,99
<b>TOTAL</b>		<b>502</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autores, 2019.



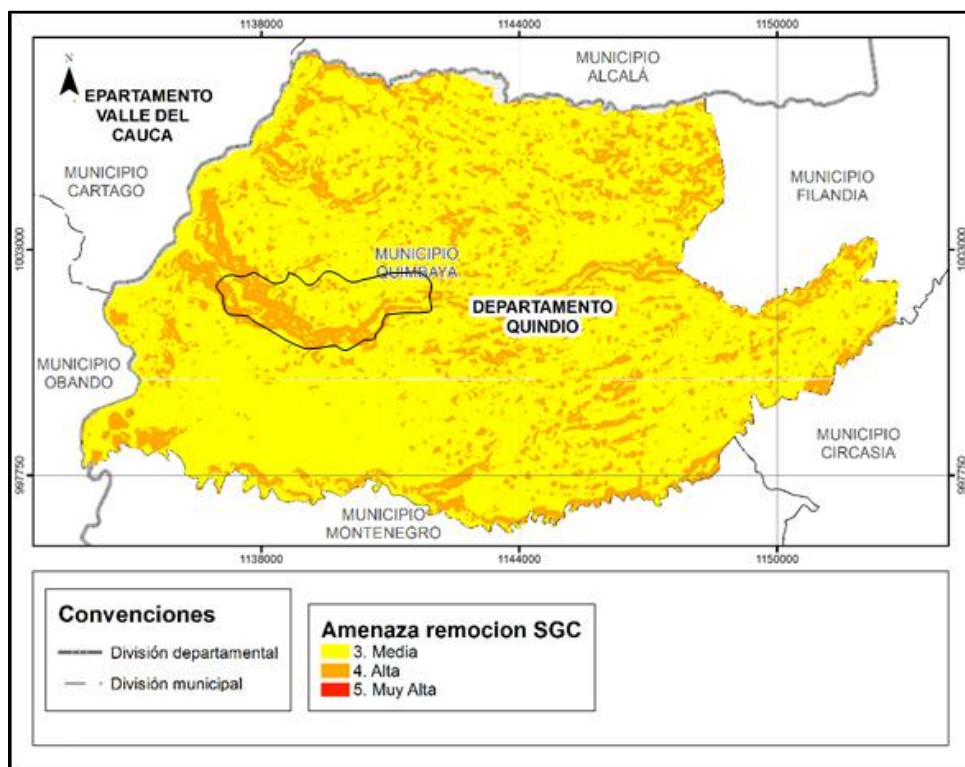
## 8. ANÁLISIS DE LA AMENAZA

### 8.1. Amenaza reportada a nivel regional según el SGC

Los movimientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve, su origen obedece a una gran diversidad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se dan en la corteza terrestre. Si por una parte el levantamiento tectónico forma montañas, la meteorización sumada a otros factores detonantes (sismo, lluvia, acción del hombre) actúa sobre las laderas para desestabilizarlas y cambiar el relieve a una condición de planicie (Portilla, 2012).

El municipio de Quimbaya presenta amenaza alta y media a movimientos en masa (Figura 23), Este tipo de eventos se han presentado a causa de fenómenos como la precipitación y los sismos generados en la región capaces de detonar movimientos en masa; según el catálogo del sistema de información de movimientos en masa (SGC, 2018) la vereda Kerman no se presenta información al respecto.

**Figura 23:** Mapa de amenaza de movimientos en masa, municipio de Quimbaya (2015).



Fuente: Modificado de SGC, 2018.

Las zonas de amenaza media se asocian fundamentalmente con los bajos contrastes morfométricos asociados a bajas pendientes, llanuras aluviales y zonas de alta intervención antrópica, lo cual se refleja en condiciones de estabilidad favorables (CRQ, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río La Vieja, 2010), en la vereda Kerman un buen porcentaje del área se ubica en esta zona.

## 8.2. Método Estadístico Bivariado

Siguiendo las disposiciones contenidas en el Decreto 1077 de 2015, donde se establecen los lineamientos y requerimientos mínimos, para desarrollar estudios básicos de amenaza por movimientos en masa en suelos rurales y urbanos; en el presente análisis se utilizó el método estadístico bivariado wofE (Pesos de evidencia) propuesto por el (SGC, 2017) escala 1: 25.000.

Este método se basa en el análisis de patrones de asociación entre los factores condicionantes (variables intrínsecas y geométricas de las laderas) y las áreas inestables (inventario de procesos morfodinámicos históricos y activos) mediante pesos de importancia para la generación de procesos de inestabilidad en el terreno.

Este método implementado evita la subjetividad de elegir los pesos de evidencia de los factores evaluados a criterio de quien realiza el análisis, puesto que son el resultado del procesamiento estadístico a partir de la información disponible de eventos históricos, levantamiento de información directa en campo y uso de sensores remotos. En el análisis se combina cada factor de mapeo con la distribución de los movimientos en masa en el mapa y se calculan valores ponderados de densidad de procesos morfodinámicos para cada clase evaluada o factor condicionante, ya sea en unidades de área o en píxeles (SGC, 2017). Para este caso se utilizaron unidades de área en Hectáreas.

De acuerdo con van Westen (2013), en un análisis estadístico efectivo se requiere un gran número de zonas inestables relacionadas con varios tipos de mecanismos con una información de edad lo más fiel posible. La aplicación de este método está sujeta a ciertas condiciones que deben tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados obtenidos. Para escala 1:25.000, se recomienda la combinación del método estadístico junto con el enfoque ponderado basado en criterio experto. (SGC, 2017).

El fundamento matemático asume que el deslizamiento  $L$  ha sucedido en un área  $p$  veces; si el área total es  $q$ , entonces la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es:

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q} \quad \text{Bonhan (1994)} \quad (1)$$

Donde  $n$  representa el número de veces que se repite  $L$ ; si  $Wi$  representa un factor condicionante donde se tienen clases de  $i = 1... m$  entonces

$$p(L|wi) = \frac{p(wi \cap L)}{p(wi)} \quad \text{Bonhan (1994)} \quad (2)$$

Si se expresa la ecuación anterior en función de las proporciones en lugar de la probabilidad, se tiene que:

$$O(L) = \frac{p(L)}{p(L)} = \frac{p(L)}{1-p(L)} = \frac{p}{q-p} \quad O(L|wi) = \frac{p(L|wi)}{p(L|wi)} \quad \text{Bonhan (1994)} \quad (3)$$

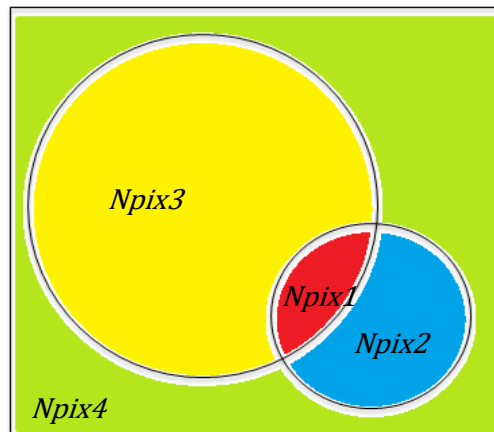
Por lo tanto, se llamará pesos de evidencia a las siguientes ecuaciones:

$$Wi^+ = \ln \frac{p(wi|L)}{p(wi)} \quad Wi^- = \ln \frac{p(\bar{wi}|L)}{p(\bar{wi})} \quad \text{Bonhan (1994)} \quad (4)$$

El detalle de esta formulación matemática se presenta en Bonham (1994). Van Westen (1993) plantea que en términos de pixeles el área que está compuesta por un número total de pixeles  $N$ .

$$N = Npix1 + Npix2 + Npix3 + Npix4. \quad \text{Van Westen (1993)} \quad (5)$$

**Figura 24.** Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante



Fuente: SGC 2017.

Donde:

*Npix1*: hay presencia del factor condicionante (*Npix3*) en el deslizamiento (*Npix2*). Lo cual es indicativo de una muy alta significancia de ese factor en el deslizamiento.

*Npix2*: no hay presencia del factor condicionante (*Npix3*) en el deslizamiento (*Npix2*). Lo cual es indicativo de una significancia alta por efecto de la presencia del deslizamiento.

*Npix3*: factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia media por efector del factor que alguna vez contribuyo al deslizamiento.

*Npix4*: no hay deslizamiento ni factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia baja.

Los pesos se pueden expresar en términos de pixeles para el peso positivo y el peso negativo respectivamente:

$$Wi^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1+Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3+Npix4}} \quad Wi^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1+Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3+Npix4}} \quad \text{Van Westen (1993)} \quad (6)$$

Donde el peso positivo ( $Wi^+$ ) indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

**$Wi^+ > 0$** : Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.

**$Wi^+ < 0$** : Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

**$Wi^+ = 0$** : Indica que el factor no es relevante.

El peso negativo ( $Wi^-$ ) indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento de la siguiente forma:

**$Wi^- > 0$** : Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.

**$Wi^- < 0$** : Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del deslizamiento.

**$Wi^- = 0$** : Indica que el factor no es relevante.

Los pesos de evidencia  $W_i^+$  y  $W_i^-$  se deberán calcular para cada clase del factor el contraste o peso final  $W_f$  es igual a:

$$W_f = W_i^+ - W_i^- \quad \text{Van Westen (1993)} \quad (7)$$

Se define el contraste o peso final  $W_f$ , el cual da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa.

**$W_f = 0$ :** Cuando la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado.

**$W_f > 0$ :** positivo, cuando existe una asociación positiva (la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa).

**$W_f < 0$ :** Negativo, cuando existe una asociación negativa (la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa).

La función final de susceptibilidad o **LSI** (Landslide susceptibility index) corresponde a la sumatoria de cada  $W_f$  calculado para cada factor contribuyente incluido en el análisis:

$$LSI = W_f \text{Pendiente} + W_f \text{Curvatura} + W_f \text{UGS} + W_f \text{Geomorfología} + W_f \text{Uso y cobertura} + W_f \text{D. Fracturamiento} \quad (9)$$

Esta susceptibilidad resultante de la aplicación del método estadístico bivariado, se lleva a un proceso posterior de análisis y calibración de los resultados con base en las evidencias de campo relacionadas con procesos morfodinámicos activos y/o latentes, pendientes escarpadas que evidencien inestabilidad activa, y demás consideraciones a criterio de profesional, para lograr desarrollar un modelo que represente las condiciones reales del territorio. En el capítulo de metodología (página 18) se muestra el procedimiento empleado para el cálculo de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, (Figura 3).

## **8.2.1. Zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa 1:5.000**

### **8.2.1.1. Factores Condicionantes utilizados en el análisis para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa**

El análisis de susceptibilidad a movimientos en masa es el primer paso para la zonificación de la amenaza y evaluación de riesgo. Un mapa de susceptibilidad contiene información sobre los tipos de movimientos en masa, áreas más probables para su ocurrencia y áreas posiblemente afectadas.

#### **8.2.1.1.1. Procesos morfodinámicos históricos y activos en la zona de estudio**

Es el insumo base para el desarrollo del método estadístico de densidad de deslizamientos, ya que a partir de dicha información georeferenciada, es posible establecer el área de masa deslizada en cada variable incorporada en el análisis. Para la conformación del mapa de procesos, se hizo una recopilación de eventos morfodinámicos, reportados en los sistemas de información geográfica disponibles, así como el levantamiento de movimientos en masa directamente en campo y por fotointerpretación. (Ver figura 18).

#### **8.2.1.1.2. Pendientes**

Representa la influencia de la inclinación de la ladera. En términos de movimientos en masa y para una zona con el mismo material, hay mayor susceptibilidad a mayor pendiente del terreno. La pendiente se trabajó en unidades de grados, obteniendo valores entre 0° y 54,21°. Se categorizó usando la metodología de van Zuidam (1986) en SGC (2017) ya que fue considerada como la mejor distribución para el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa; como resultado se obtuvieron 7 intervalos de la distribución, a continuación, se muestran los resultados del procesamiento estadístico de este factor condicionante. (Tabla 9 y 10).

**Tabla 9.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante pendientes.

1	2	3	4	5
Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
0° - 2°	18	0,20249747	46174	8,31294435
2° - 4°	7	0,07874902	59087	10,6377386
4° - 8°	96	1,0799865	139150	25,0518951
8° - 16°	1251	14,0735741	187764	33,8041253
16° - 35°	4736	53,279334	114529	20,619249
35° - 55°	2781	31,2858589	8743	1,57404757
> 55°	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

**Tabla 10.** Pesos finales para la variable pendiente aplicando el método WofE.

6	7	8	9	10	11	12
Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
18	8871	46156	509291	-3,71445185	0,0847266	-3,79917845
7	8882	59080	496367	-4,90577895	0,11166982	-5,01744877
96	8793	139054	416393	-3,1433108	0,27728506	-3,42059586
1251	7638	186513	368934	-0,86959907	0,25747666	-1,12707573
4736	4153	109793	445654	0,99155476	-0,54075326	1,53230802
2781	6108	5962	549485	3,37236322	-0,36442345	3,73678667
0	8889	0	555447	0	0	0

Fuente: Autores, 2019.

Para las tablas se hacen las siguientes observaciones:

- ✓ Las cantidades de la tabla se expresan en número de píxeles.
- ✓ El tamaño del píxel utilizado en los cálculos fue de 3 x 3 m.
- ✓ El mapa de pendientes y mapa de curvatura se realizaron a partir del DEM ALOS-PALSAR DE 12,5 sin embargo estos ráster se exportaron en ArcGIS a un tamaño de píxel de 3m para no perder el detalle de las otras capas temáticas a la hora de la sumatoria de pesos.
- ✓ En la columna **1** se presentan las categorías de pendiente en grados.
- ✓ En la columna **2** se presenta el número de píxeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor pendiente.
- ✓ En la columna **3** se presenta el porcentaje de deslizamientos correspondiente a cada clase del factor pendiente.
- ✓ En la columna **4** se presenta el número de píxeles correspondiente a cada clase del factor pendiente.
- ✓ En la columna **5** se presenta el porcentaje de cada clase del factor pendiente.

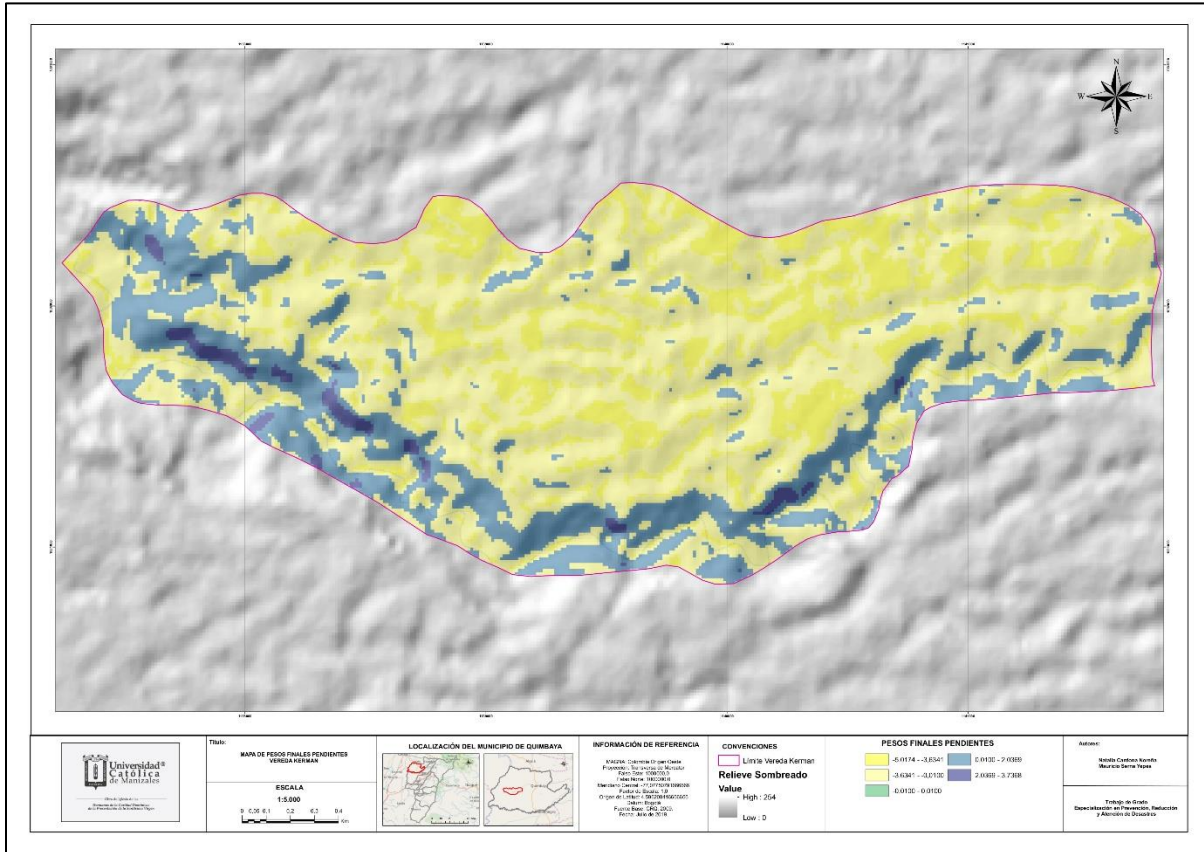
- ✓ En la columna **6** Npix1 representa el número de pixeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor pendiente.
- ✓ En la columna **7** Npix2 representa el Total Mov – Npix1
- ✓ En la columna **8** Npix3 representa la Clase – Npix1
- ✓ En la columna **9** Npix4 representa el Total Clase – Npix3
- ✓ En la columna **10** se presenta los valores para el peso positivo aplicando WofE.
- ✓ En la columna **11** se presenta los valores para el peso negativo aplicando WofE.
- ✓ En la columna **12** se presenta el peso final o contraste.

Con la finalidad de ilustrar la influencia de cada factor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa, se realizaron mapas de la ubicación espacial de los pesos finales de cada componente, se clasificaron en intervalos dependiendo de la distribución de los pesos finales, estandarizando la representación de los pesos, se representaron con tonalidades amarillas los factores con pesos negativos los cuales la ausencia del factor contribuye a la generación de movimientos en masa, de color verde los valores cercanos a cero estos representan condiciones no relevantes para la ocurrencia de procesos erosivos y de colores azules los valores positivos, estos representan los factores que contribuyen a la generación de movimientos en masa. La distribución de los rangos dependió de la distribución de los pesos finales para cada factor condicionante.

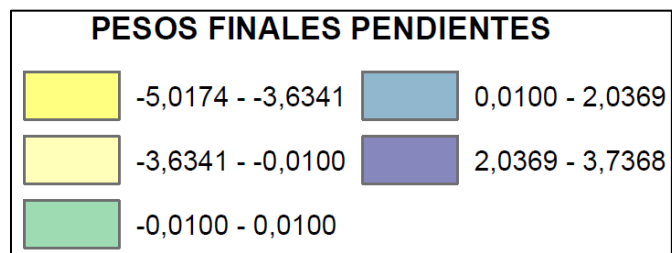
La pendiente topográfica de las laderas es un factor que condiciona el desarrollo de procesos de inestabilidad, por lo cual es un parámetro utilizado sistemáticamente en la mayoría de los métodos de cálculo de estabilidad de taludes. En terrenos homogéneos, cada tipo de material tendrá una altura crítica y un ángulo máximo, a partir de los cuales se producirá un desequilibrio gravitacional, siendo posible la rotura y caída de material. La figura 25, representa espacialmente el peso final del factor condicionante pendientes.



Figura 25. Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante pendientes.



Fuente: Autores, 2019.



Como se explicó en el método estadístico bivariado los valores positivos representados contribuyen a la generación de movimientos en masa, los cuales se concentran principalmente en la zona sur de la vereda asociada al escarpe del abanico con pendientes de  $16^{\circ}$  a  $55^{\circ}$  (representados en azul), en contraste las tonalidades amarillas representan valores negativos representando que la presencia de los mismos aportan condiciones de estabilidad en el terreno, localizados principalmente en la zona de peniplanicie.

### 8.2.1.1.3. Curvatura

Representa las características de forma del terreno diferenciando las laderas cóncavas, convexas y superficies rectilíneas. Es un parámetro importante en este análisis ya que permite entender los procesos de erosión y escorrentía. Se estima como la variación del ángulo de inclinación del terreno respecto a una línea recta de pendiente promedio. Las zonas cóncavas son las de mayor infiltración y por ende las de mayor

susceptibilidad. Las tablas 11 y 12 contienen la información de procesamiento estadístico de los datos de este factor condicionante y la figura 26 representa la respectiva distribución espacial de los valores de peso final ( $W_f$ ) para la curvatura.

**Tabla 11.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante curvatura.

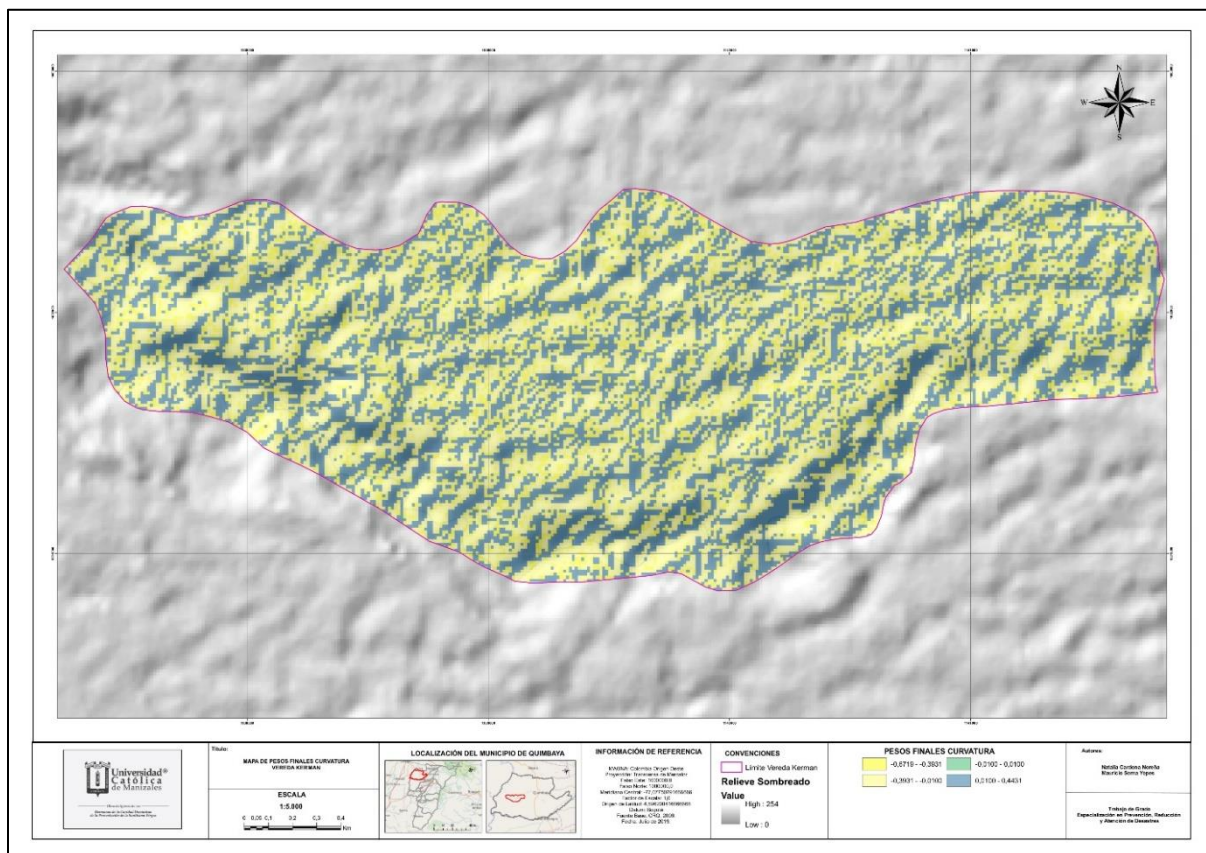
Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
Cóncavo	4554	51,2318596	228288	41,0998709
Rectilíneo	994	11,18236022	110838	19,9547392
Convexo	3341	37,58578018	216321	38,9453899
<b>Total</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

**Tabla 12.** Pesos finales para la variable curvatura aplicando el método WofE.

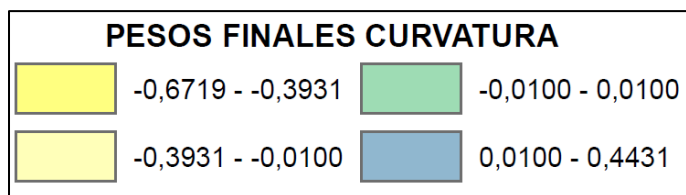
Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
4554	4335	223734	331713	0,24050676	-0,20258989	0,44309665
994	7895	109844	445603	-0,57012061	0,10175986	-0,67188048
3341	5548	212980	342467	-0,01996946	0,01222084	-0,0321903

Fuente: Autores, 2019.

**Figura 26.** Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante curvatura.



Fuente: Autores, 2019.



Analizando los resultados de los pesos finales obtenidos los valores positivos los representados en azul corresponden a superficies cóncavas los cuales contribuyen a la presencia de procesos erosivos, a diferencia, los valores negativos representados en tonalidades amarillas los cuales corresponden a superficies convexas y rectilíneas ilustran que no intervienen en la ocurrencia de condiciones de inestabilidad.

#### 8.2.1.1.4. Unidades Geomorfológicas

Representa la influencia de las formas del terreno y su proceso de formación, siendo más susceptibles aquellas laderas en estado denudativo o formadas a partir de movimientos en masa antiguos.

La morfogénesis, es un factor contribuyente esencial en el análisis de la ocurrencia de movimientos en masa, ya que suministran información de las características del terreno y los procesos que modelaron la superficie. La configuración morfológica y evolución de las laderas juegan un papel determinante en la generación de deslizamientos (Brunsden, 2002; Griffiths y otros, 2002; Hutchinson, 1995). Scheidegger (1998) interpreta los deslizamientos como modificaciones del terreno dentro del ciclo geomorfológico continuo, que corresponden a la respuesta normal del sistema, debido a complejos parámetros exógenos (meteorológicos) y endógenos (tectónicos).

Los procesos morfodinámicos son el producto de la geomorfología local que provisiona información del origen y evolución de las geoformas y materiales, de esa manera hacer énfasis en predicciones de actividad y frecuencia de los procesos y naturaleza de la amenaza.

Para el análisis de susceptibilidad este parámetro fue usado a nivel de elemento morfodinámico. En la Tabla 13 se observa que los elementos geomorfológicos donde más ocurren los movimientos en masa son laderas muy abruptas de abanico disectado con 76,73% de procesos influyentes y las laderas escarpadas de abanico disectado con 12,21% de procesos influyentes. Las tablas 13 y 14 contienen la información de procesamiento estadístico de los datos de este factor condicionante y la figura 27 representa la respectiva distribución espacial de los valores de peso final ( $W_f$ ) para la geomorfología.

**Tabla 13.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante geomorfología

Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
Fca	0	0	3712	0,66829058
Fco	0	0	3677	0,66198935
Fpi	243	2,73371583	21454	3,86247473
Fta	0	0	3395	0,61121943

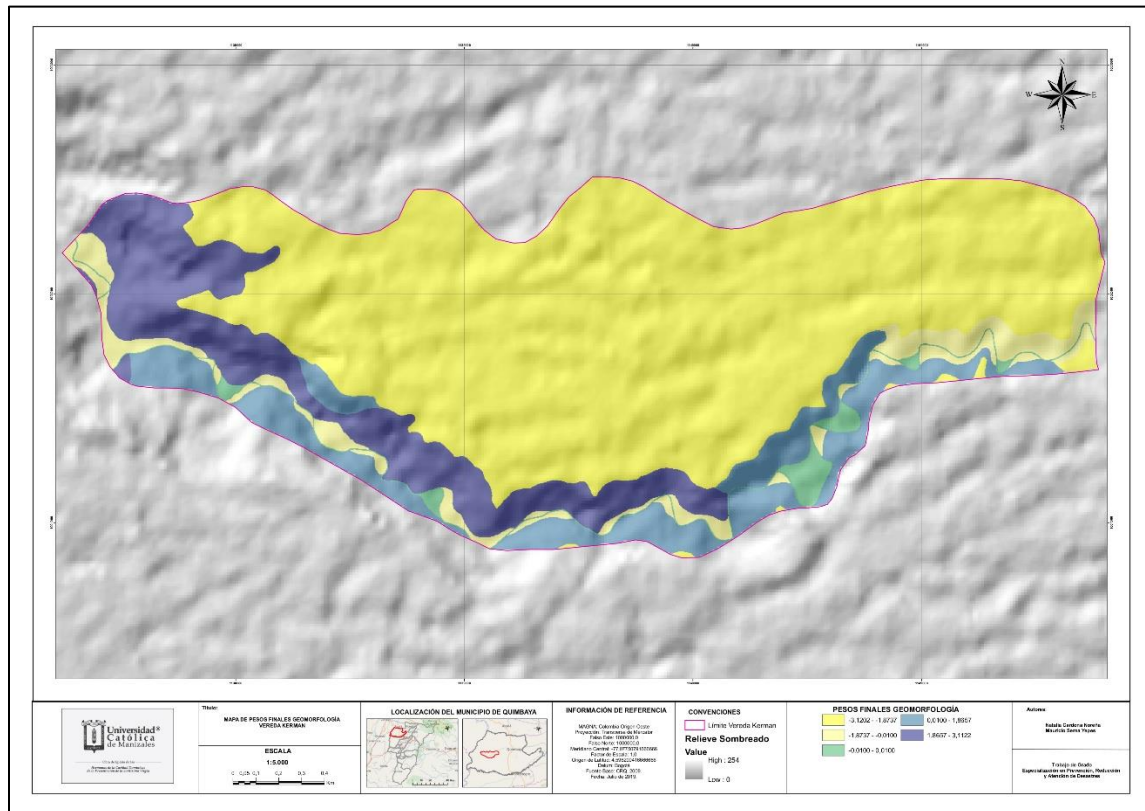
Vlaad	0	0	10242	1,8439203
Vlead	1085	12,2060974	60566	10,9040106
Vliafd	740	8,32489594	374484	67,4202939
Vlmaad	6821	76,7352908	77917	14,027801
<b>Total</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

Tabla 14. Pesos finales para la variable geomorfología aplicando el método WofE.

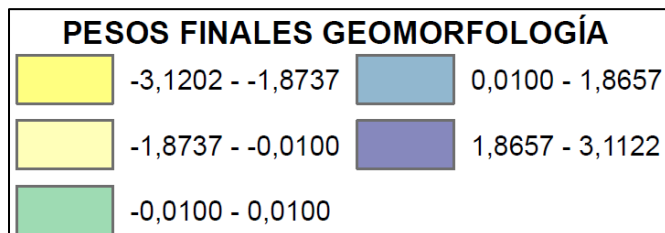
Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
0	8889	3712	551735	0	0,00670534	-0,00670534
0	8889	3677	551770	0	0,0066419	-0,0066419
243	8646	21211	534236	-0,33425511	0,01121774	-0,34547285
0	8889	3395	552052	0	0,00613095	-0,00613095
0	8889	10242	545205	0	0,01861132	-0,01861132
1085	7804	59481	495966	0,13088169	-0,01691232	0,147794006
740	8149	373744	181703	-2,08971753	1,03048037	-3,1201979
6821	2068	71096	484351	1,79093365	-1,32126926	3,112202906

Fuente: Autores, 2019.

Figura 27. Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante geomorfología.



Fuente: Autores, 2019.



En la Tabla 14 y la figura 27 se enmarcan los pesos de evidencia finales  $W_f$ , calculados para cada uno de los elementos geomorfológicos del área de estudio, a partir del procesamiento estadístico, donde fue posible establecer que las laderas muy abruptas de abanico disectado (Vlmaad) con  $W_f=3,11$  es el factor que más contribuye a la presencia de deslizamientos, seguido de laderas escarpadas de abanico disectado (Vlead) con  $W_f=0,15$  representados con tonalidades azules. Los elementos geomorfológicos que arrojaron valores de  $W_f$  negativos fueron las laderas inclinadas de abanico fuertemente disectado (Vliafd) con  $W_f=-3,12$ , y Plano o llanura de inundación (Fpi) con  $W_f=-0,34$ , sugiriendo una menor contribución a la generación de procesos erosivos para el área en la vereda Kerman (espacialmente representados de color amarillo).

#### 8.2.1.1.5. Litología (Unidades Geológicas Superficiales)

Representa el origen del material presente en el talud, su grado de meteorización, consolidación y la resistencia al corte de los mismos. Es una variable de gran relevancia en los movimientos en masa ya que los materiales de menor resistencia y mayor meteorización son más susceptibles al deslizamiento.

El tipo de materiales que conforman las unidades geológicas aflorantes y su grado de meteorización, condicionan las características físico-mecánico propias de cada material, razón por la cual, el comportamiento de estos varía aun cuando se encuentran sometidos a los mismos factores con igual intensidad.

En la Tabla 15 se muestra la información base de cada formación geológica y el proceso respectivamente y en la Tabla 16 se muestra el procesamiento estadístico de los datos para establecer los pesos positivos  $W_i+$ , los pesos negativos  $W_i-$  y los pesos de evidencia finales o contraste  $W_f$  necesarios para hallar la contribución de cada unidad geológica superficial, figura 28.

**Tabla 15.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante unidades geológicas superficiales.

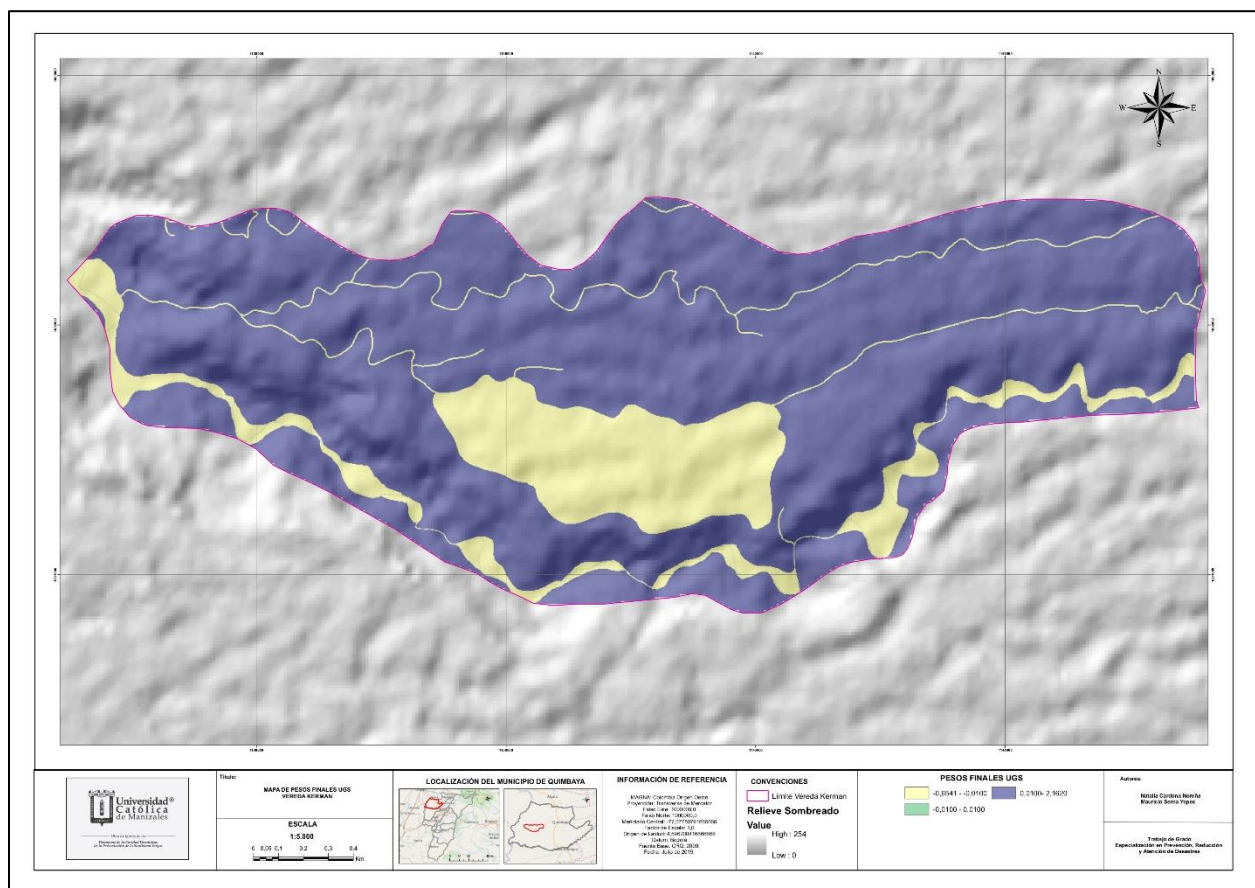
Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
Stncaq	8646	97,2662842	455081	81,9305892
Stncta	243	2,73371583	28731	5,17259072
Stanc	0	0	12504	2,25115988
Stat	0	0	59131	10,6456602
<b>Total</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

Tabla 16. Pesos finales para la variable unidades geológicas superficiales aplicando el método WofE.

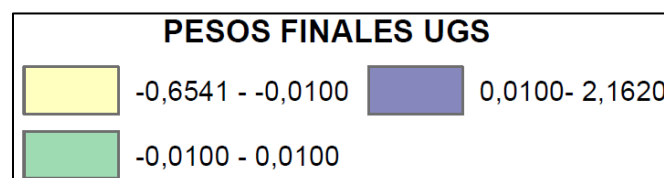
Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
8646	243	446435	109012	0,19076161	-1,97119317	2,16195478
243	8646	28488	526959	-0,62921814	0,02493268	-0,65415082
0	8889	12504	542943	0	0,02276885	-0,02276885
0	8889	59131	496316	0	0,11256037	-0,11256037

Fuente: Autores, 2019.

Figura 28. Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante unidades geológicas superficiales.



Fuente: Autores, 2019.



Una vez se desarrolló el procesamiento estadístico específico para el área de interés, fue posible determinar que las unidades geológicas donde más se generan procesos de inestabilidad es en Suelo transportado no

cohesivo del abanico del Quindío (Stncaq) que ocupan el 92% del total del área de la vereda Kerman, con 7,5 Ha de los procesos morfodinámicos cartografiados, el cual se presenta en color azul debido al peso final positivo. De igual manera se pudo establecer que los demás tipos de materiales: Suelo transportado no cohesivo de terraza aluvial (Stncta), Suelo transportado aluvial no cohesivo (Stanc) y Suelo transportado antrópico (Stat) no contribuyen a la presencia de movimientos en masa, debido que, presentan pesos finales negativos (representadas con tonalidades amarillas).

#### 8.2.1.1.5.1. Densidad de fracturamiento (Geología Estructural)

Representa las franjas o zonas más afectadas por actividad tectónica o que por su fracturamiento puedan ser más susceptibles a movimientos en masa. Se estima como franjas alrededor de las estructuras principales de acuerdo al grado de influencia.

Se incorporó la densidad de fracturamiento en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, debido a que representa la influencia de la estructura geológica como fallamientos, plegamientos, lineamientos o cualquier tipo de estructuras, en la estabilidad de los taludes. La combinación de la disposición geométrica de los materiales aflorantes con la orientación, altura y pendiente de las laderas, así como el grado de fracturamiento, diaclasas, y fallas son características de gran importancia a considerar en análisis de estabilidad, ya que modifican las propiedades originales de los macizos rocosos, provocando una resistencia menor a la de la roca inicial. Para determinar el grado de fracturamiento se generaron franjas de influencia alrededor de las estructuras geológicas, variando la longitud de acuerdo al tipo de estructura como se observa en la Tabla 17.

La definición de las franjas de influencia se hizo a partir de revisar las recomendaciones para el tratamiento y obtención de dicho parámetro a diferentes escalas del servicio geológico.

**Tabla 17.** Distancia en metros de las zonas de influencia dependiendo el tipo de estructura.

Estructura Geológica	Influencia en metros desde el trazo principal						
	125	200	250	325	375	500	>500
Falla Inferida	Alto	Medio			Bajo		Sin Influencia

Fuente: Autores a partir de información del SGC 2016, 2017

En la Tabla 18 se presenta la información en pixeles de la densidad de fracturamiento y movimientos en masa asociados, observándose que en las zonas de influencia a las fallas cartografiadas fractura concentra la mayor cantidad de procesos morfodinámicos, en la figura 29, representa espacialmente el peso final del factor condicionante densidad de fracturamiento.

**Tabla 18.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante densidad de fracturamiento

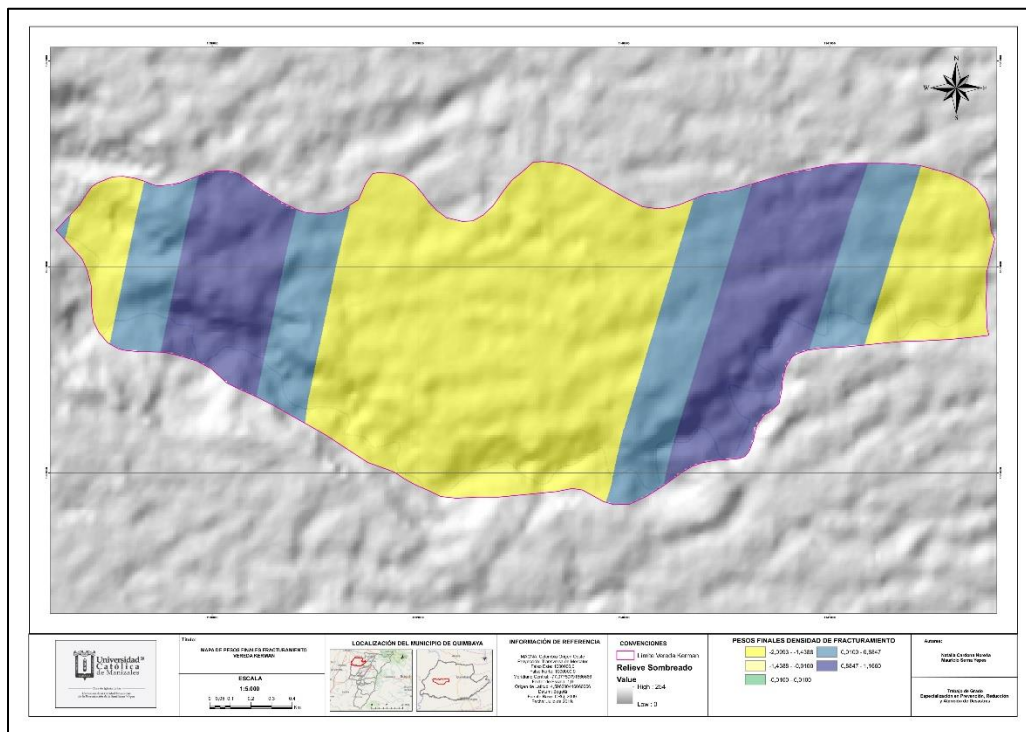
Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
Alto Fracturamiento	4250	47,8119024	127609	22,9741091
Medio Fracturamiento	1763	19,8335021	59372	10,6890486
Bajo Fracturamiento	1707	19,20351	60293	10,854861
Sin Fracturamiento	1169	13,1510856	308173	55,4819812
<b>Total</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

**Tabla 19.** Pesos finales para la variable densidad de fracturamiento aplicando el método WofE.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
4250	4639	123359	432088	0,76677882	-0,39917181	1,16595062
1763	7126	57609	497838	0,64829674	-0,11156602	0,75986275
1707	7182	58586	496861	0,59920032	-0,10177378	0,7009741
1169	7720	307004	248443	-1,43575346	0,66355956	-2,09931302

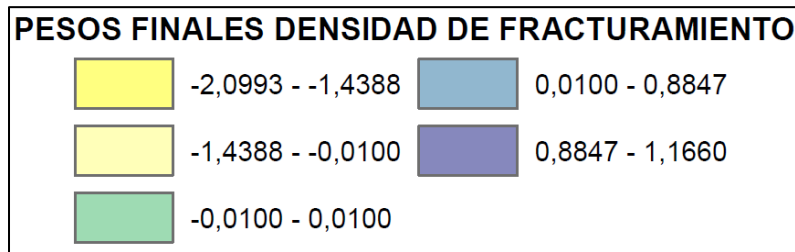
Fuente: Autores, 2019.

**Figura 29.** Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante densidad de fracturamiento.



Fuente: Autores, 2019.





A partir de los resultados obtenidos del análisis estadístico con los pesos de evidencia de la densidad de fracturamiento, se ilustra una relación directamente proporcional entre la densidad de fracturamiento y el peso final de este factor condicionante. El 47,95% de los procesos morfodinámicos cartografiados en la zona se encuentran en zonas de alto fracturamiento, esto asociado a que el 22,98% del área de la vereda presenta esta condición.

#### 8.2.1.1.6. Cobertura Vegetal y Uso del Suelo

Representa la contribución de la vegetación en la estabilidad, siendo menos susceptibles a movimientos en masa aquellas laderas con mayor cobertura vegetal y mayor susceptibilidad aquellas que están intervenidas y expuestas a la intemperie.

El factor cobertura y uso del suelo es en ocasiones un agente regulador de los procesos erosivos, ya que cumple varias funciones importantes que inciden en la estabilidad de taludes. Entre las más destacadas están: interceptar y absorber la energía de la lluvia previniendo el impacto de las gotas de agua directamente en el suelo, el amarre del sistema de raíces que retiene las partículas del suelo, aumenta el coeficiente de rugosidad del terreno disminuyendo la velocidad de escorrentía, las raíces y las plantas ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo, entre otras.

González (1995) anota la importante función que cumple la vegetación en la regulación de humedad el suelo, ya que arboles grandes individuales pueden absorber entre 100 y 150 litros de agua por día soleado, de tal forma que contribuye al agotamiento de la humedad del suelo retrasando la saturación y con ello la aparición de escorrentía superficial.

La vegetación es un parámetro muy controversial ya que, dependiendo del tipo de cobertura en materiales y topografías particulares, puede llegar a ser tan perjudicial y contribuyente en los procesos erosivos. Por ejemplo, el peso de la vegetación ejerce dos tipos de esfuerzos, uno desestabilizante hacia abajo de la pendiente y uno que es componente perpendicular a la pendiente, el cual tiende a incrementar la resistencia al deslizamiento. El acuñamiento de raíces es la tendencia de estas a invadir grietas, fisuras y canales y causar con ello inestabilidad local, especialmente en masas rocosas.

El impacto del viento a través de los troncos de los árboles genera influencia desestabilizante por creación de momentos de remolino al chocar el viento con el tallo. Los cambios en el uso del suelo y la deforestación, dejan los suelos desnudos, expuestos a las condiciones externas y aceleran el proceso de degradación de los mismos.

Observando la Tabla 20 se destaca que los usos y cobertura del suelo que más presentan procesos de inestabilidad en el área de estudio, son pastos enmalezados con el 58,64% de procesos cartografiados, pastos limpios con 34,42% y Bosques de galería de guadua con 6,88%, los demás usos y coberturas presentes en la zona cuentan con áreas deslizadas menores a 1%; en la figura 30, representa espacialmente el peso final del factor condicionante uso del suelo.

**Tabla 20.** Procesamiento estadístico para el factor condicionante uso del suelo.

Categoría	Mov	% Mov	Clase	% Clase
Banano	0	0	20979	3,77695802
Bosque de galería de Guadua	612	6,88491394	188389	33,9166473
Pastos limpios	3060	34,4245697	142261	25,6119846
Café a plena exposición	4	0,04499944	46209	8,31924558
Plátano	0	0	21397	3,85221272
Naranja		0	45352	8,16495543
Pastos enmalezados	5213	58,6455169	30583	5,50601588
Maíz	0	0	3669	0,66054907
Vía Pavimentada	0	0	1419	0,25546992
Yuca	0	0	11543	2,07814607
Fincas recreativas	0	0	22486	4,04827103
Bosque de galería mixto	0	0	3214	0,57863306
Café con semisombra	0	0	1864	0,33558557
Mosaico de pastos y cultivos	0	0	2512	0,45224837
Mosaico de pastos con espacios naturales	0	0	890	0,16023131
Centros vacacionales	0	0	12680	2,28284607
<b>TOTAL</b>	<b>8889</b>	<b>100</b>	<b>555447</b>	<b>100</b>

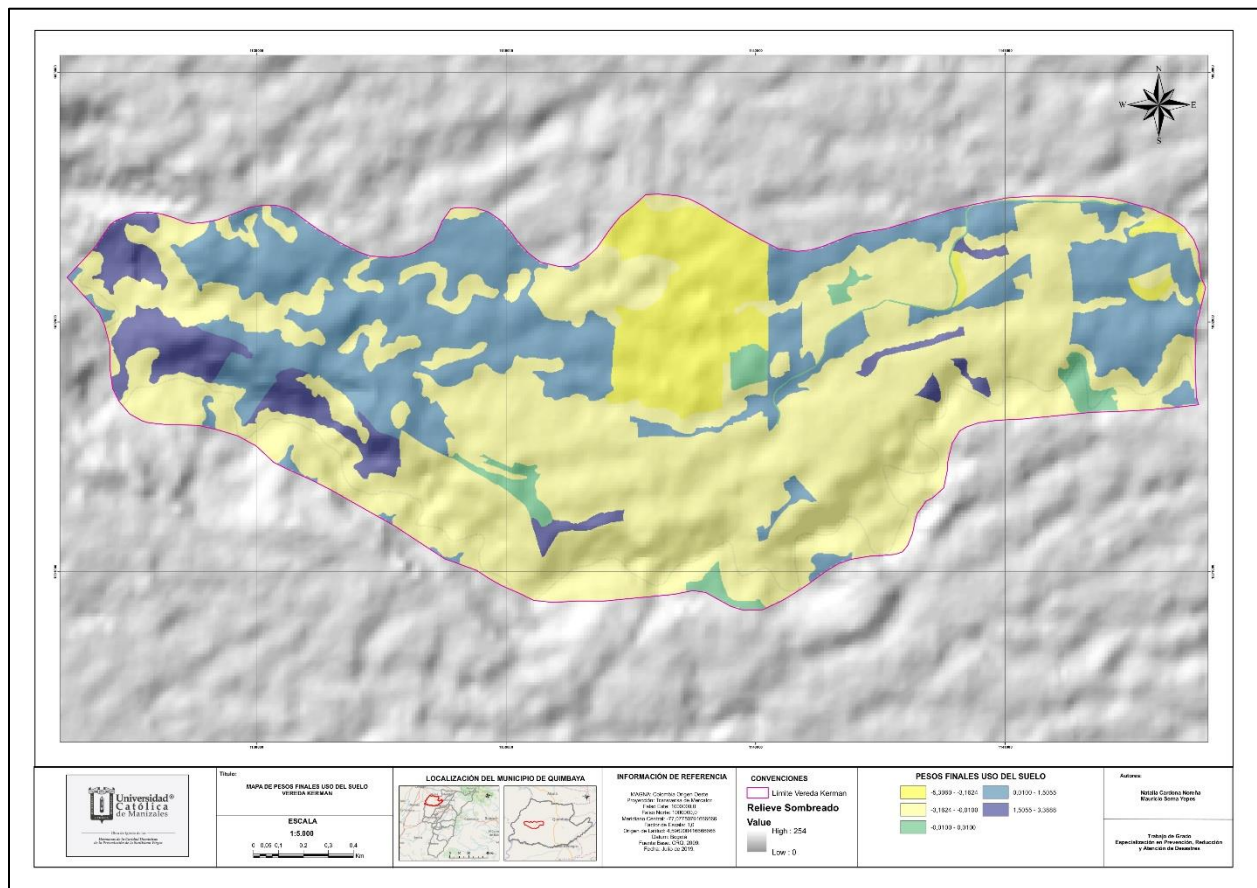
**Tabla 21.** Pesos finales para la variable de uso del suelo aplicando el método WofE.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4	Wi+	Wi-	Wf
0	8889	20979	534468	0	0,03850134	-0,03850134
612	8277	187777	367670	-1,591319447	0,34125342	-1,93257287
3060	5829	139201	416246	0,317454622	-0,13347233	0,45092696
4	8885	46205	509242	-5,219590297	0,08639975	-5,30599005
0	8889	21397	534050	0	0,03928373	-0,03928373
0	8889	45352	510095	0	0,08517621	-0,08517621
5213	3676	25370	530077	2,55254677	-0,83623844	3,38878521
0	8889	3669	551778	0	0,0066274	-0,0066274
0	8889	1419	554028	0	0,00255797	-0,00255797
0	8889	11543	543904	0	0,02100043	-0,02100043

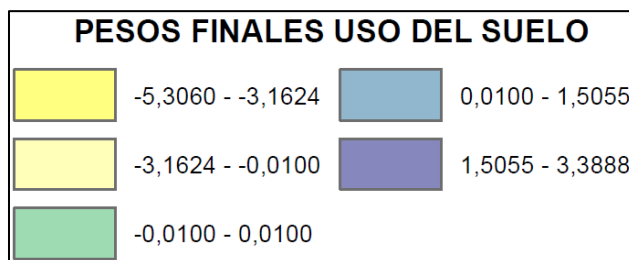
0	8889	22486	532961	0	0,04132494	-0,04132494
0	8889	3214	552233	0	0,00580314	-0,00580314
0	8889	1864	553583	0	0,0033615	-0,0033615
0	8889	2512	552935	0	0,00453274	-0,00453274
0	8889	890	554557	0	0,0016036	-0,0016036
0	8889	12680	542767	0	0,02309306	-0,02309306

Fuente: Autores, 2019.

**Figura 30.** Ubicación espacial de los pesos finales del factor condicionante uso del suelo.



Fuente: Autores, 2019.



A partir del análisis estadístico desarrollado, se puede observar en la Tabla 21 y figura 30 que para el área específica de estudio los usos y coberturas que arrojaron  $W_f$  positivos, es decir, que la presencia de estos contribuye a la ocurrencia de procesos morfodinámicos fueron: pastos enmalezados  $W_f = 3,39$  y pastos limpios  $W_f = 0,45$ .

### 8.2.1.2. Factores detonantes utilizados en el análisis para la determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa

Para obtener la zonificación de amenaza se requiere evaluar los factores detonantes como aquellos elementos externos que cambian las condiciones naturales de las laderas y por ende causan los procesos de inestabilidad.

#### 8.2.1.2.1. Lluvia.

La lluvia acumulada genera saturación del suelo lo que puede causar movimientos en masa, a mayor intensidad de la lluvia mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. Las estaciones hidroclimatológicas más cercanas se encuentran en los municipios de Alcalá, Saleneto y Obando, esta información presenta muy bajo nivel de detalle para determinar las condiciones de precipitación en la vereda Kerman, dificultando la representación espacial de este factor detonante a la escala de trabajo que se desarrolló esta investigación (1:5.000).

#### 8.2.1.2.1. Sismo.

Las ondas sísmicas actúan como una fuerza adicional sobre el talud, disminuyendo la estabilidad del mismo. Respecto a la información sísmica, el Servicio Geológico Colombiano publicó el mapa de amenaza sísmica, el cual estableció la cobertura del detonante sísmico a partir de los procesos y evidencias de inestabilidad documentados a través de sismicidad histórica en el país, los cuales permiten establecer la hipótesis de que a mayor aceleración sísmica horizontal sobre las rocas son mayores las fuerzas que actúan sobre ellas, lo cual ocasiona que ofrezcan menor resistencia frente al fuerte movimiento que pueda generar un sismo. Este insumo está publicado a una escala regional, para integrar este factor detonante espacialmente al cálculo de amenaza con el geoprocetamiento en los sistemas de información geográfica a la escala 1:5.000, es necesario un insumo de microzonificación sísmica el cual no se ha realizado en el sitio de estudio.

## 8.2.2. Cálculo de susceptibilidad

Una vez obtenidos los pesos finales para cada clase y variable se realiza una suma algebraica para el cálculo de la susceptibilidad como se describe en la siguiente ecuación:

$$LSI = WfPendiente + WfCurvatura + WfUGS + WfGeomorfologia + Wf Uso y cobertura + WfD. Fracturamiento$$

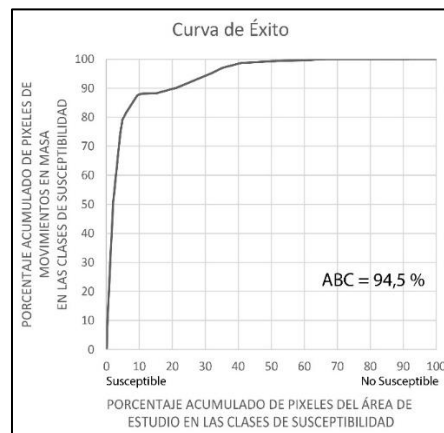
Los valores de susceptibilidad comprenden un rango de -16,24 hasta 14,01.

### 8.2.2.1. Curva de éxito

A partir de la curva de éxito se realizó el ajuste de la función, realizando una normalización para representar para 100 rangos de susceptibilidad y su respectiva área acumulada, el porcentaje de área deslizada en cada una de ellas con la muestra usada para el cálculo de la función de susceptibilidad. Esta curva se construyó en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados (Figura 31).

El área bajo la curva representa la capacidad de la función para representar la susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa, siendo en este caso del 94,5%, según el SGC (2017) un porcentaje aceptable de ajuste debe ser superior al 70%, por lo tanto, un área bajo la curva del 94,5%, evidencia una buena calidad de ajuste de los datos, dando confiabilidad a la zonificación de susceptibilidad realizada en este trabajo. Por la baja cantidad de procesos morfodinámicos presentes en la vereda no fue posible realizar la curva de validación del modelo, debido que se requieren al menos 30 procesos morfodinámicos para realizar este cálculo estadístico.

Figura 31. Curva de éxito.

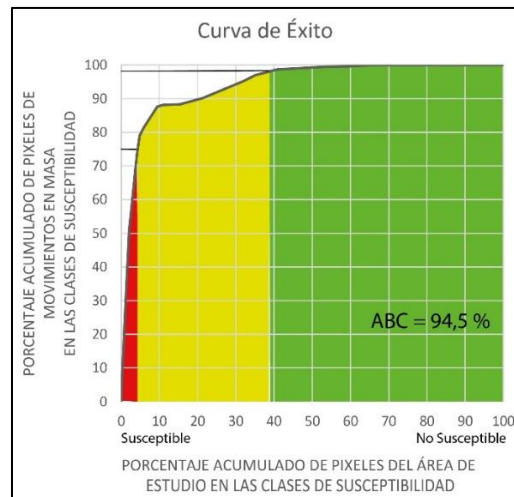


Fuente: Modificado SGC 2017.

### 8.2.2.2. Categorización de los resultados de susceptibilidad

Posteriormente a la realización de la curva de éxito y el cálculo del área bajo la curva, es necesario establecer las categorías de susceptibilidad, para esto como lo señala la guía se debe marcar en la ordenada el porcentaje 75 hasta llegar al punto de intercepción con la curva, en este se debe medir el valor de la abscisa en este punto, este valor es el correspondiente al percentil límite de la susceptibilidad alta; en este trabajo la intercepción en el eje x dio un 4 %, correspondiente al percentil 4 en los valores de susceptibilidad el cuál se representó en color rojo, (figura 32), para determinar el límite entre susceptibilidad media y baja se hace el mismo procedimiento pero en la ordenada se marca el porcentaje 98, la intercepción de este valor con la curva, marcó en la abscisa 38, correspondiente al percentil 38%.

**Figura 32.** Curva de éxito categorizada

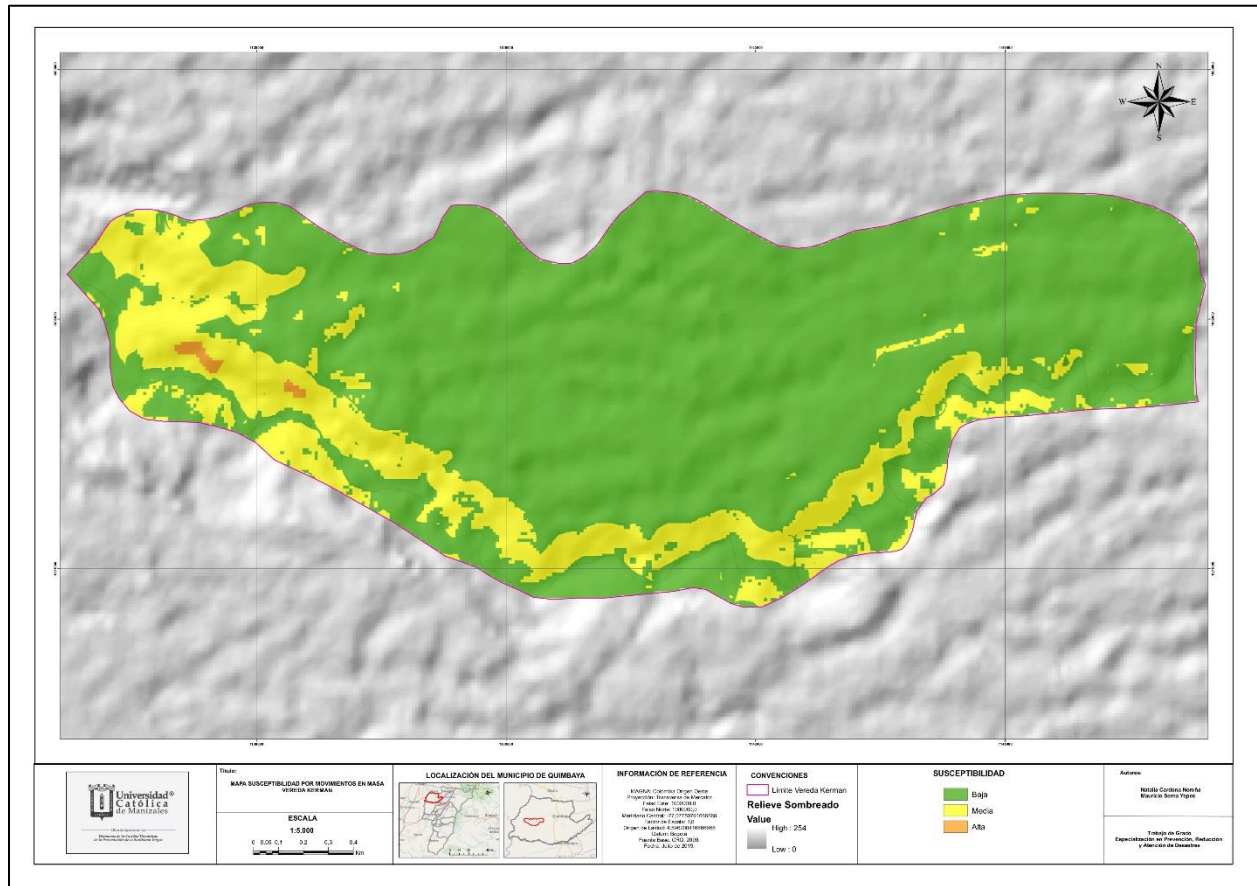


Fuente: Modificado SGC 2017.

### 8.2.3. Mapa de susceptibilidad

Con base en la sumatoria de los pesos finales se generó un mapa en formato ráster, el cual posteriormente se clasificó a partir de la curva de éxito en tres categorías, alta media y baja, a continuación, se ilustra el mapa de susceptibilidad obtenido para la vereda Kerman (figura 33 y tabla 22).

Figura 33. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa para la vereda Kerman.



Fuente: Autores, 2019

Tabla 22. Descripción de las categorías de susceptibilidad.

Susceptibilidad	Descripción	Área ha	Porcentaje
Baja	Corresponden a laderas con topografía regular y bajas pendientes. Se distribuyen principalmente sobre el abanico del Quindío y sobre geoformas asociadas a laderas inclinadas de abanico fuertemente disectado.	401,91	80,75
Media	Corresponden a laderas con valores de inclinación moderada que se distribuyen sobre el abanico del Quindío y sobre geoformas asociadas a laderas muy abruptas del abanico disectado y laderas escarpadas del abanico disectado.	94,44	18,97
Alta	Corresponden laderas con valores de inclinación abruptos y muy abruptos, sobre materiales con condiciones mecánicas débiles del Suelo transportado fluvio-volcánico no cohesivo del abanico del Quindío y sobre geoformas asociadas a laderas muy abruptas del abanico disectado.	1,39	0,28

Fuente: Autores, 2019

### 8.3. Análisis de Amenaza

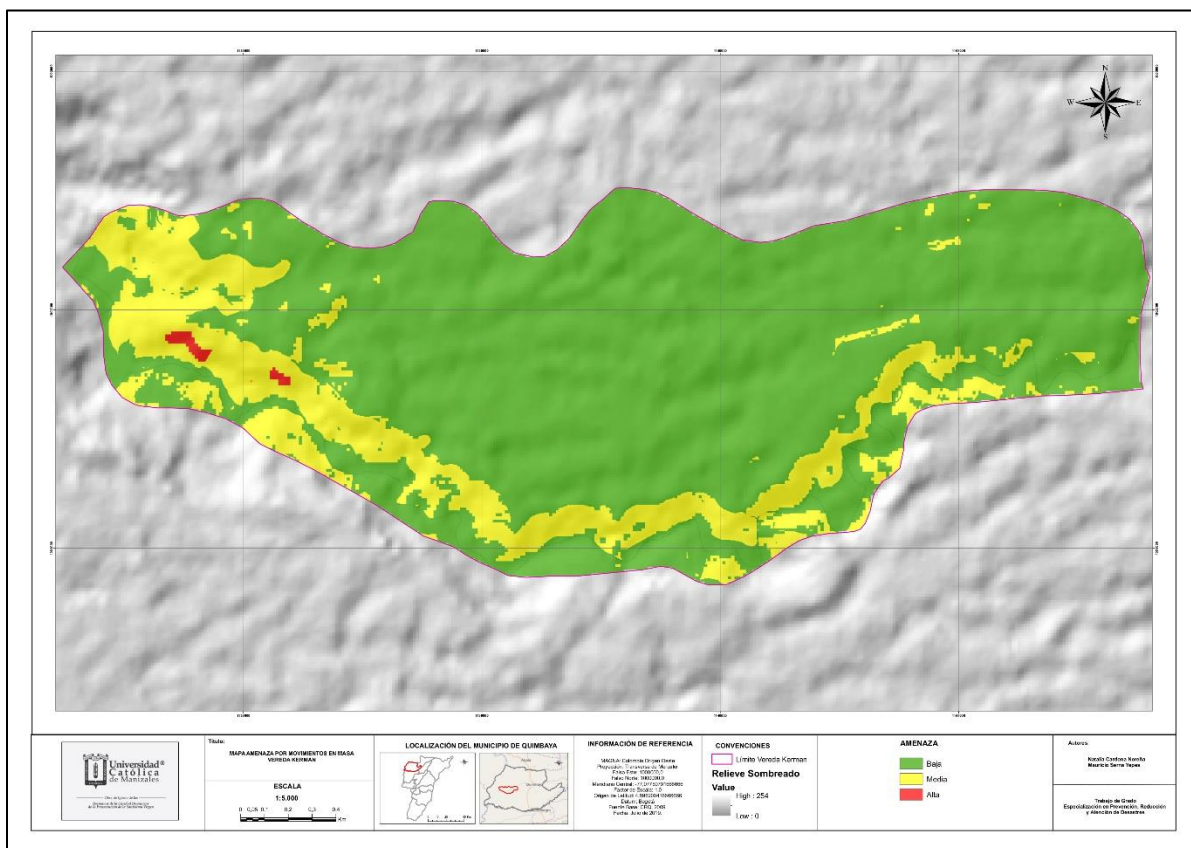
Debido a la falta de detalle en la delimitación de zonas de amenaza sísmica en la información reportada y la limitada información de precipitaciones existente se optó conservar los límites espaciales de las categorías del mapa de susceptibilidad en el mapa de amenaza como lo propone (van Westen *et al.*, 2014) y se clasificó en 3 categoría como lo reglamenta la normativa colombiana (alta, media y baja) (tabla 23).

**Tabla 23.** Categorías de amenaza determinadas a partir del mapa de susceptibilidad

Categoría de susceptibilidad	Categoría de amenaza
Alta	Alta
Media	Media
Baja	Baja

Fuente: Modificado SGC 2017.

**Figura 34.** Mapa de amenaza a movimiento en masa



Fuente: Autores, 2019



**Tabla 24.** Descripción de las categorías de amenaza.

Amenaza	Descripción	Área ha	Porcentaje
Baja	Zonas estables, con poca recurrencia de procesos de inestabilidad que mantienen las condiciones naturales de equilibrio. Usos compatibles: Actividades agrícolas tradicionales, construcción de infraestructura, vías de acceso veredal, ecoturismo, recreación.	401,91	80,75
Media	Zonas con posible ocurrencia de problemas de inestabilidad, dependiendo de las modificaciones rápidas en las condiciones naturales del terreno, como cambios drásticos en los usos del suelo, aumento en la intensidad de las lluvias o intervenciones antrópicas. Usos compatibles: Sistemas agroforestales, actividades productivas, construcción de viviendas, servicios públicos, equipamientos colectivos con estudios detallados.	94,44	18,97
Alta	Zonas Inestables donde se presenta la mayor cantidad de procesos morfodinámicos activos entre los cuales se presentan erosión laminar, erosión en surcos, cárcavamiento y movimientos en masa, con evidencia de antiguos deslizamientos, con probabilidad de reactivarse. Usos compatibles: Obras para el control de erosión, recuperación, restauración, bosque protector. Usos incompatibles: Ganadería y agricultura intensiva, construcción de viviendas, servicios públicos, equipamientos colectivos, minería.	1,39	0,28

Fuente: Autores, 2019

## 9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El propósito principal que motivó la realización de este trabajo, fue la evaluación a la implementación de la guía metodológica para la evaluación de movimientos en masa en la vereda Kerman en la Unidad de Planificación Rural realizada en el año 2018. Al comparar la categorización espacial de la susceptibilidad, es evidente un abrupto contraste; la tabla 25 ilustra los porcentajes de áreas determinadas con categorías de susceptibilidad alta, media y baja, obtenidas en la UPR, 2018 y en este trabajo.

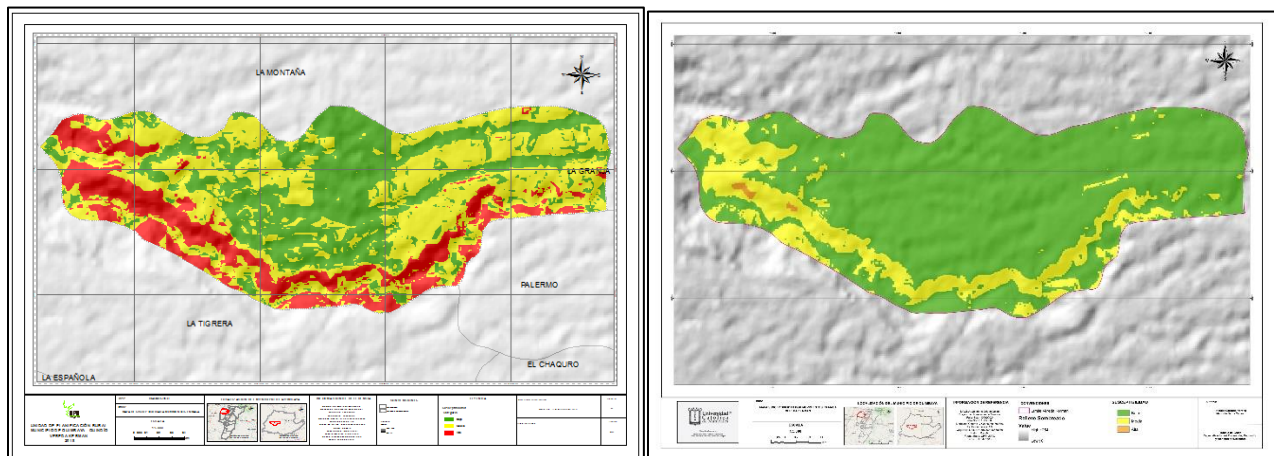
**Tabla 25.** Paralelo entre los porcentajes de las áreas clasificadas especialmente con categorías de susceptibilidad alta, media y baja obtenidos en la UPR, 2018 y este trabajo.

Categoría de susceptibilidad	Porcentaje - UPR 2018	Porcentaje - Este trabajo, 2019
Alta	20 %	0,28 %
Media	44 %	18,97 %
Baja	36 %	80,75 %

Fuente: Autores, 2019

La diferencia es significativa debido a que, los valores porcentuales de las clasificaciones no están relacionados. En los resultados presentados por la UPR (2018), ilustran una alta susceptibilidad en la parte sur de la vereda especialmente asociada a las laderas adyacentes a la quebrada Buenavista, al occidente y oriente del territorio representa principalmente una categoría de susceptibilidad media y en la parte central donde está ubicado el Parque Temático Panaca representa valores de susceptibilidad baja. En contraste, en este estudio el centro poblado de la vereda y la parte norte, en la parte central y oriental presentan una susceptibilidad baja y la ladera norte de la quebrada Buenavista y la parte occidental de la ladera sur exponen valores de susceptibilidad media y únicamente un área en la parte occidental de la ladera norte de la quebrada Buenavista correspondiente al 0,28 % del área el cual expone valores de susceptibilidad alta (figura 35).

**Figura 35.** Comparativa de los mapas de susceptibilidad por remoción en masa en la vereda Kerman.



Fuente: UPR, 2018

Fuente: Autores, 2019.

Analizando el procedimiento empleado en la UPR (2018), se concluye que se implementó correctamente, pero presentó dos principales falencias:

- ✓ Al rasterizar las capas temáticas existentes en formato vector lo hicieron con un tamaño de pixel predeterminado de 6 metros, sin tener en cuenta el tamaño de pixel del Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS-PALSAR, el cual tiene una dimensión de 12,5 metros, además no tuvieron en cuenta la herramienta de ArcGis®, “Snap”. A la hora de exportar los shapefiles a formato ráster, es importante tener presente este parámetro para lograr una correcta superposición de pixeles con el fin de realizar cálculos correctos de los pesos finales ( $W_f$ ) y de los valores de susceptibilidad en el geoprocesamiento con los Sistemas de Información Geográfica como ArcGis®.
- ✓ Determinaron las categorías de susceptibilidad con base en la distribución estadística “Equal Interval”, la cual delimitó las categorías de susceptibilidad en 3 intervalos iguales delimitando las 3 categorías de susceptibilidad alta, media y baja. No obstante, el SGC (2017) sugiere la categorización de las categorías de susceptibilidad a partir de la calibración de los valores de susceptibilidad con la curva de éxito, la cual si se realizó para esta investigación y cambió drásticamente las delimitaciones de las categorías de susceptibilidad.

A pesar de no contar con un Modelo de Elevación Digital más detallado que el ALOS-PALSAR, a los insumos obtenidos a partir de este (pendientes y curvatura de plano), se les hizo una conversión de tamaño de pixel de 12,5 metros a 3 metros, este procedimiento no aumenta en detalle, sin embargo, posibilita que las capas temáticas en formato vector se puedan exportar a formato ráster con un tamaño de pixel más detallado sin perder información a detalle que pueden proporcionar estos factores condicionantes (Unidades Geológicas Superficiales, Subunidades Geomorfológicas, Uso del Suelo y Densidad de Fracturamiento), este tratamiento permitió el aumento de 5 veces del nivel de detalle de la implementación del método estadístico bivariado debido a que, la UPR (2018) empleó una población de 111814 pixeles en la implementación del análisis, en contraste, en esta investigación el cálculo estadístico se realizó con una muestra de 555447 pixeles.

La realización de la curva de éxito permitió establecer la calidad del ajuste de los datos, la cual se verificó con el cálculo del área bajo la curva (ABC), con un resultado del 94,5 %, este dato garantiza la confiabilidad del análisis puesto que el SGC (2017), establece que un porcentaje mayor al 70 % es un valor aceptable, esta curva como ya se ha mencionado permitió clasificar las categorías de susceptibilidad, no obstante, al no evidenciar deslizamientos activos cartografiados a escala 1:5000, no se determinó la categoría de susceptibilidad muy alta como lo propone el SGC, 2017, sin embargo, no fue posible construir la curva de validación debido a la baja densidad de procesos morfodinámicos activos existentes.

El método estadístico bivariado aplicado en la guía es un modelo probabilístico el cual evita la subjetividad de elegir los valores de los pesos como se realiza en los métodos heurísticos, además aplica objetivamente la relación entre procesos activos y factores condicionantes. Una de las principales desventajas del método es que un análisis matemático no puede dimensionar las variaciones en la dinámica externa de la tierra, por tal

motivo, es imprescindible la articulación del criterio experto en la implementación del método, el cual debe ser realizado por un profesional que tenga el entendimiento de los procesos geológicos y geomorfológicos recurrentes en el entorno y verificar la coherencia de los resultados de las categorías de susceptibilidad calculadas.

La guía del SGC (2017), basada principalmente en los conceptos de van Westen (1993, 2008, 2013 y 2014), no es una ruta para determinar susceptibilidad, por lo cual se pueden determinar, factores condicionantes y detonantes el cual el experto considere pertinentes de acuerdo a la naturaleza del territorio, para el caso de esta investigación se consideró imprescindible adicionar la densidad de fracturamiento, debido a que, la actividad tectónica activa deforma el terreno ocasionando variaciones en la estabilidad en las unidades de suelo y roca.

Por otro lado, mencionando las limitaciones específicas en la vereda Kerman de la aplicación de la guía metodológica se debe considerar la baja presencia de procesos erosivos, lo cual limita la aplicabilidad de la guía en el sector, si consideramos que la misma fue diseñada para áreas con alta densidad de deslizamientos, la mayoría de movimientos cartografiados en el sector corresponden a reptaciones, por lo que el insumo generado puede considerarse como un mapa de susceptibilidad por movimientos creep tipo reptación, no obstante, la intensificación de este tipo de procesos pueden generar desplazamientos de material de mayor impacto tales como deslizamientos y flujos.

Para la determinación de la ubicación espacial de las categorías de amenaza se conservaron las mismas áreas determinadas en el mapa de susceptibilidad debido a que, la información existente de precipitaciones es limitada y la escala de amenaza sísmica publicada por el Servicio Geológico Colombiano, no presenta el suficiente nivel de detalle para integrarlo a una cartografía 1:5000, esta dificultad puede considerarse una limitante en la aplicación del método puesto que, es necesario considerar los estímulos externos que pueden afectar el terreno y detonar movimientos en masa.

A pesar de considerarse que la baja cantidad de procesos erosivos puedan limitar la aplicabilidad de la guía en la vereda Kerman, los resultados obtenidos en este estudio son coherentes con la dinámica externa presente en el sector puesto que, el 80,75 % del área de la vereda presenta condiciones de amenaza baja, el 18,97 % presenta condiciones de amenaza media y únicamente un 0,28 % presenta condiciones de amenaza alta. Esta información es consecuente con los procesos morfodinámicos cartografiados y con las características topográficas y geomorfológicas del territorio, sin embargo, para tener un mayor grado de confiabilidad de las condiciones de amenaza y riesgo, se podría realizar una caracterización geotécnica del terreno y determinar la amenaza de las unidades de suelo con el cálculo del factor de seguridad como lo establece el (SGC, 2016).

## 10. CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados de la implementación de la guía metodológica aplicada en esta investigación proporcionaron ubicaciones espaciales de las categorías de susceptibilidad y amenaza coherentes con las condiciones geológicas y geomorfológicas presentes en la vereda Kerman.
- ✓ La información existente de los factores condicionantes y la cartografía de procesos morfodinámicos existentes permitieron implementar el método estadístico bivariado y hacer un cálculo probabilístico de la susceptibilidad.
- ✓ La calidad de la información existente respecto a los factores detonantes no permitió la ubicación espacial de los mismos por lo cual, no se posibilitó implementar esta información en el geoprocesamiento con los Sistemas de Información Geográfica.
- ✓ Al medir la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad con la curva de éxito, el área bajo la curva (ABC) dio un valor de 94,5 %, el cual garantiza confiabilidad en la aplicación del método estadístico bivariado.

## 11. RECOMENDACIONES

- ✓ Elaborar un levantamiento topográfico en la vereda Kerman, con el fin de tener un Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM), con mayor detalle e implementar nuevamente la guía metodológica usada en este trabajo con este insumo.
- ✓ Realizar una actualización en la implementación de la metodología CORINE Land Cover, debido a que, este componente se encuentra desactualizado para la vereda Kerman.
- ✓ Calcular la amenaza de las unidades de suelo con base en el factor de seguridad como lo propone el Servicio Geológico Colombiano, 2016.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Australian Geomechanics Society (AGS). (2007). Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, 42(1), 13-36.
- Bonham Carter, G. F. (1994). *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS* (vol. 13). Ottawa: Pergamon Press.
- Brabb, E.E., Pampeyan, E.H., Bonilla, M.G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California. U.S. Geol. Surv., Misc. Field Studies, Map MF-360. Scale 1:62,500.
- Brunsdon, D. (2002). The fifth Glossop Lecture. Geomorphological roulette for engineers and planners: some insights into a old game. *Quart. J. of Engng. Geol.* 35, 101-142.
- Cardona Arboleda, O. D. (2013). Parte II: Evaluación de la amenaza frente deslizamientos en diferentes niveles territoriales. En: *Piloto de Asistencia Técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidrolimnológicos en el ordenamiento territorial municipal* (pp. 51-127). Bogotá.
- Cardona, F. J.; y Ortiz, M. (1994). Aspectos Estratigráficos de las Unidades del Intervalo Plioceno Holoceno entre Pereira y Cartago. Propuesta de Definición para la Formación Pereira (Tesis de pregrado): Universidad de Caldas - Corporación Autónoma Regional de Risaralda. 124 p., más anexos
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. (2012). Ley 1523: Política nacional de gestión del riesgo de desastres. Bogotá, Colombia.
- CRQ. (2010). Determinantes ambientales para el ordenamiento territorial municipal en el Departamento del Quindío.
- CRQ. (2018). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja. Armenia.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulos, S., et al. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263.
- FAO. (2014). Agriculture and Consumer Protection Department. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Refer/ErosInd.htm#Sheet Erosion>
- Griffiths J.S., Mather A.E., Hart A.B. (2002). Landslide susceptibility in the Rio Aguas catchment SE Spain. *Quart J Engng Geol* 35, 9-17.
- Hutchinson, J.N. (1995). Keynote paper, Landslide hazard assessment. Proceeding of the 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand 3, 1805-1841.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2013). Estudio semidetallado de suelos departamento del Quindío escala 1:25000.
- INGEOMINAS. (1984). Geología de Cordillera Central del Departamento del Valle del Cauca, Quindío y (N.W.) Tolima planchas 243, 261, 262, 280 y 300. Escala 1:100.000, Memoria Explicativa. Ministerio de Minas y Energía. Subdirección Geología Básica. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá.
- INGEOMINAS. (2005). Mapa Geológico para Ingeniería, Plancha 224-III-D Escala 1:25.000. Bogotá
- James, M. (1986). Estudio Sismotectónico en el área del Viejo Caldas: Medellín, Ingeominas, p. 80-90.
- Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1). (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98.
- Kienholz, H. (1978). Map of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10,000. *Artic and Alpine Research* 10, 169–184.
- Lalinde, C. (2004). Evidencias Paleosísmicas en la Región Pereira – Armenia, Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT. Medellín.
- McCourt, W. J. (1984). The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima: British Geological Survey Report, V. Series 84, pp. 8-49.
- Mc. Court, W. J., Aspden, J. A. y Brook, M. (1984). New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion: *Journal of the Geological Society*, London, M. 141, pp. 831-845.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1077 de 2015. *Diario Oficial No. 49.523*.
- Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C., Spangle, W.E. (1979). Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California. U.S. Geological Survey Professional Paper 944: 96.
- Nivia, A. (2001). Mapa geológico del departamento del Valle del Cauca. Escala 1:250.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Portilla, M. (2012). Notas de clase de amenaza. En S. N. Minería, Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades andinas, 2007: Movimientos en masa de la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenaza. Bogotá D.C, Colombia: Maestría en Ciencias - geología. UN - Sede Bogotá-
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA). (2007, noviembre). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas. (Servicio Nacional de Geología y Minería, Ed.) Publicación Geológica Multinacional, (4), 432.
- SAFELAND. (2009-2012). *Living with Landslide risk in Europe: Assesment, effects of global change and risk management strategies. Large scale collaborative research project. The seventh framework programme for research and technological development (FP7) of the European Commission.*
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, Escala 1:25.000. Colección de Guías y Manuales.* Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) & Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2016). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Escala Detallada. Colección de Guías y Manuales.* Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.



- Scheidegger, A. E. (1998). Tectonic predesign of mass movements, with examples from the Chinese Himalaya. *Geomorphology* 26, 37-46.
- van Westen, C. J. (1993). Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation. ITC Publication No. 15, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede.
- van Westen, C. (2013). *Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An*. University of Twente.
- van Westen, C. J., Kappes, M. S., Quan Luna, B., Frigerio, S., Glade, T., & Malet, J.-P. (2014). Medium-Scale Multi-hazard Risk Assessment of Gravitational Processes. In T. Van Asch, J. Corominas, S. Greiving, J.-P. Malet, & S. Sterlacchini, *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (vol. 34, pp. 201-231). Dordrecht: Springer.
- van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3-4), 112-131.
- Yamín, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., & Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilística para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia*. Bogotá: Banco Mundial y Universidad de los Andes.